

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 3115 CON Y SIN
CEMENTACIÓN SÓLIDA UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL
DE CAFÉ**

PRESENTADO POR:
**RAMÓN ERNESTO ESCOBAR MEJÍA
MATHIAS EDUARDO NAVARRO PÉREZ
RICARDO MANUEL ROMERO MARTÍNEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL 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 INTERINO :

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:

**RAMÓN ERNESTO ESCOBAR MEJÍA
MATHIAS EDUARDO NAVARRO PÉREZ
RICARDO MANUEL ROMERO MARTÍNEZ**

Trabajo de Aplicación aprobado por:

Docente asesor:

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, abril de 2025

Trabajo de Aplicación Aprobado por:

Docente Asesor:

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

Tribunal Calificador:

F. _____

Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz

F. _____

Ing. Francisco Alfredo De León Torres

F. _____

Ing. Rigoberto Velásquez Paz

ESTUDIO DE DESGASTE EN ACERO SAE 3115 CON Y SIN CEMENTACIÓN SÓLIDA UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL DE CAFÉ

Estudiantes: Brs. Ramón Ernesto Escobar Mejía¹, Mathias Eduardo Navarro Pérez² y Ricardo Manuel Romero Martínez³
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 de resistencia al desgaste tipo espiga sobre disco, las espigas utilizadas fueron de un acero SAE O1 templadas y revenidas a 200 °C y los discos fueron de un acero SAE 3115 sin y con tratamiento termoquímico de cementación sólida con postratamiento térmico. La mezcla sólida carbón vegetal de café y activador químico carbonato de bario fue 80:20 en peso, respectivamente. La cementación se llevó a cabo a una temperatura de 900 °C durante 8 h. El postratamiento térmico realizado fue de temple desde 850 °C y enfriado en aceite, y un revenido a 200 °C. Los ensayos de desgaste se realizaron a una misma distancia de deslizamiento de 2,000 m, se realizaron a 3 cargas y para cada una de las cargas se realizaron 3 ensayos. Con el análisis metalográfico se determinó un espesor de capa cementada de 3.54 mm y se corroboró mediante el estudio de microdureza Vickers. Finalmente, en el estudio comparativo de pérdida de masa para los discos de acero SAE 3115 con tratamiento termoquímico de cementación con postratamiento térmico se obtuvo una pérdida de masa menor en comparación con los discos de acero SAE 3115 sin tratamiento termoquímico de cementación.

Palabras claves: Cementación; Tratamiento termoquímico; Aceros de cementación

1 E-mail: ramonernestoescobarmejia@gmail.com

2 E-mail: mathnavarro24@outlook.com

3 E-mail: ricardo_rom96@outlook.com

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

DEDICATORIA

A mis amados padres. Este logro académico es el resultado directo del inagotable esfuerzo y sacrificio que han realizado para proporcionarme una educación de calidad. Cada uno de sus sacrificios, cada jornada de arduo trabajo y cada decisión tomada en mi beneficio han sido los cimientos sobre los cuales se erige mi éxito. Su entrega y compromiso con mi formación académica son un tesoro invaluable que aprecio más allá de lo que las palabras pueden expresar. Este trabajo de investigación no es solo un reflejo de mi esfuerzo, sino también un testimonio de su inquebrantable amor y dedicación. Me enorgullece profundamente honrarlos a través de este logro. Gracias por ser las luces que guían mi camino, por iluminar mi sendero hacia el conocimiento y por enseñarme el valor del esfuerzo y la educación. Su amor y apoyo han sido la fuerza motriz detrás de cada uno de mis éxitos. Los amo con todo mi corazón.

Ramón Ernesto

DEDICATORIA

A mi adorada familia. Realizar este trabajo de investigación es el reflejo de haber llegado a una etapa que no sería posible sin el enorme sacrificio de mis padres. Esta etapa es el fruto de muchas madrugadas en las que mi padre tuvo que salir a trabajar para poder brindarme una formación académica excepcional; es el fruto de las atenciones y preocupaciones de mi madre para que yo pudiera estudiar durante la carrera sin mayores complicaciones externas. Ellos fueron, son y serán la motivación necesaria en mi vida para anteponerme ante cualquier reto que se me presente y me congratula profundamente honrarlos a través de este trabajo de investigación, símbolo de su esfuerzo y dedicación, de los valores que me inculcaron desde pequeño y que, sin importar el lugar, siempre ser humilde. Los amo con todo mi ser, y gracias por brindarme una digna formación personal y académica.

Mathias Eduardo

DEDICATORIA

A mis queridos padres. Este logro no habría sido posible sin el esfuerzo y dedicación que me han brindado, las incontables horas de trabajo para sacarnos adelante a mi hermana y a mí, sin ellos, no hubiera sido posible llegar hasta aquí. El amor incondicional de mi madre que siempre me ha brindado su apoyo en cada decisión que he tomado, aunque me equivocara, y los llamados de atención de mi padre que siempre quiso llevarme por el buen camino, me han hecho quien soy ahora. Sin su ejemplo y los valores que me inculcaron, no hubiera llegado hasta aquí, por eso y más me enorgullece llamarme su hijo y espero poder honrarlos con este trabajo de graduación. Los amo con mi vida y les agradezco todo lo que han hecho por mí a lo largo de mi vida.

Ricardo Manuel

AGRADECIMIENTOS

Mí más profundo agradecimiento a mis padres, **María de los Ángeles Mejía** y **Manuel Ángel Escobar**, cuyo amor, comprensión y apoyo incondicional han sido la piedra angular de mi trayectoria académica. Su constante aliento fue crucial para superar cada reto y obstáculo que se presentó en el camino.

A mis hermanos, amigos y compañeros de clase, quienes me brindaron su apoyo y motivación en los momentos más desafiantes.

A la Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura y Escuela de Ingeniería Mecánica, por proporcionarme las herramientas y recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto. Su compromiso con la excelencia académica ha sido una fuente inagotable de inspiración.

A nuestro asesor de investigación y docente Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, por su orientación y apoyo incondicional durante todo el proceso de investigación. Su vasta experiencia y conocimientos fueron esenciales para el éxito de este trabajo.

Al Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador (CIC-UES) por el financiamiento en equipos de laboratorio a través del proyecto N° 11-10.

Ramón Ernesto

AGRADECIMIENTOS

Eternamente a mis padres, **María Vilma Pérez de Navarro** y **José Matías Navarro Aquino**, por ser un apoyo incondicional y soporte en mi vida, por haberme inculcado valores maravillosos y por haber hecho enormes sacrificios con la finalidad de brindarme una formación académica de calidad. Por siempre motivarme con sus palabras y ejemplo a superar cualquier obstáculo, sin importar el tamaño de este.

A mi hermana, **Katya Carolina Navarro Pérez**, por ser un ejemplo de superación y un ejemplo en mi vida, demostrando que formarse profesionalmente es posible con el suficiente esfuerzo y dedicación, por brindarme valiosos consejos para mejorar constantemente en mi preparación para las evaluaciones a lo largo de la carrera.

A mis amigos y compañeros de clase, que fueron fundamentales a lo largo de la carrera para superar obstáculos y actividades, con una cohesión grupal ejemplar y una motivación ideal para seguir adelante ciclo tras ciclo.

A nuestro asesor de investigación y docente en diversas cátedras Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, por siempre brindarnos su apoyo y con paciencia instruirnos durante el trabajo de investigación, tomándose el tiempo y la dedicación necesaria para aclarar cualquier duda o concepto presente.

Al Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador (CIC-UES) por el financiamiento en equipos de laboratorio a través del proyecto N° 11-10.

Mathias Eduardo

AGRADECIMIENTOS

En gran manera a mis padres, **Ana Cecilia Martínez de Romero** y **Ricardo Clodoaldo Romero Zelaya**, por ser el pilar de mi vida y mi primer amor, por su esfuerzo y dedicación para conmigo, por los valores y formación que me inculcaron, y por siempre estar ahí para mí cuando más lo he necesitado. Su apoyo fue el motor que me permitió seguir adelante y querer superarme académicamente.

A mi hermana, **Gisell Alejandra Romero Martínez**, que ha sido un ejemplo de superación personal y de resiliencia, que nunca se rindió y que supo salir adelante.

A Dios por darme una segunda oportunidad para vivir después de aquel fatídico accidente automovilístico del que solo con su ayuda salí vivo.

A mi pareja, **Flor Melissa Portán Guerra**, que siempre ha estado presente, incentivándome a seguir adelante cuando más cerca estaba de rendirme.

A la Universidad de El Salvador, junto a sus docentes y a mis compañeros con los que hemos llevado este viaje hasta este punto, todos los conocimientos y experiencias adquiridas que nos han traído hasta aquí.

A nuestro asesor de investigación y docente Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, por su paciencia y su guía durante esta investigación, por su dedicación intachable y por tantos conocimientos compartidos durante nuestra formación superior.

Al Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador (CIC-UES) por el financiamiento en equipos de laboratorio a través del proyecto N° 11-10.

Ricardo Manuel

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Cementación con carburantes sólidos.....	4
1.1.1. Ejecución de la cementación con carburantes sólidos.....	11
1.1.2. Mecanismo fisicoquímico de transferencia del carbono en el proceso de cementación.....	13
1.1.3. Características que deben cumplir los aceros para cementación.....	19
1.1.4. Selección de los aceros para cementación.....	25
1.1.5. Crecimiento del grano de los aceros en el proceso de cementación.....	26
1.1.6. Propiedades mecánicas de los aceros cementados.....	29
1.1.7. Influencia de los elementos de aleación en los aceros para cementación.....	31
1.1.8. Postratamiento al tratamiento termoquímico por cementación sólida.....	37
1.2. Propiedades de las capas cementadas.....	40
1.2.1. Capa cementada.....	40
1.2.2. Características mecánicas de la capa cementada.....	42
1.2.3. Medida del espesor de la capa cementada y de la capa dura.....	45
1.3. Caracterización metalográfica de las piezas cementadas.....	46
1.4. Desgaste de las capas cementadas.....	49
1.4.1. Tipos de desgaste.....	50
1.4.2. Topografía de las superficies.....	52
1.4.3. Contacto de sólidos.....	53
1.4.4. Fricción.....	56
2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	61
2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.....	62
2.2. Dimensionamiento de los discos y espigas para los ensayos de desgaste.....	64
2.3. Maquinado de las probetas.....	65
2.4. Diseño de la caja para cementación.....	68
2.5. Tratamiento de cementación.....	70
2.5.1. Limpieza de probetas.....	70
2.5.2. Preparación de la mezcla carburante.....	71
2.5.3. Distribución de probetas dentro de la caja.....	72
2.5.4. Tratamiento termoquímico de cementación.....	73
2.5.5. Etapa posterior del proceso de cementación.....	74

	Pág.
2.6. Postratamiento térmico.....	..74
2.7. Tratamiento térmico de las espigas.....	..77
2.8. Preparación previa al ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco.....	..79
2.9. Ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco.....	..81
2.10. Medición del espesor de la capa cementada.....	..85
2.11. Determinación de dureza.....	..85
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	..89
3.1. Medición del espesor de la capa cementada.....	..89
3.2. Determinación de dureza.....	..90
3.3. Resultados de los ensayos de desgaste.....	..93
3.4. Análisis de los resultados de desgaste.....	..98
3.5. Análisis del coeficiente de fricción.....	..99
CONCLUSIONES.....	104
BIBLIOGRAFÍA.....	106

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Contenidos de CO y CO ₂ en la fase gaseosa, en función de la temperatura con un cementante sólido (Sin considerar la cementación del acero) [5].....	7
Tabla 1.2. Condición de equilibrio entre CO y CO ₂ y el contenido de carbono superficial del acero a dos temperaturas diferentes [5].....	7
Tabla 1.3. Aceros que conviene emplear y métodos de enfriamiento recomendables para la fabricación de piezas cementadas [3].....	26
Tabla 2.1. Composición química acero SAE 3115.....	65
Tabla 2.2. Condiciones y variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.....	83
Tabla 3.1. Valores de Dureza Vickers a diferentes distancias desde la superficie de los discos cementados con postratamiento térmico.....	91
Tabla 3.2. Valores de desgaste de discos de acero SAE 1020 sin cementar utilizando espiga de acero SAE O1 templada y revenida, con una distancia de recorrido de 2,000 m...94	94
Tabla 3.3. Valores de desgaste de discos de acero SAE 1020 cementados con postratamiento térmico de temple y revenido utilizando espiga de acero SAE O1 templada y revenida, con una distancia de recorrido de 2,000 m.....	94
Tabla 3.4. Valores de desgaste de espiga de acero SAE O1 templada y revenida sobre discos de acero SAE 1020 sin cementar, con una distancia de recorrido de 2,000 m.....	95
Tabla 3.5. Valores de desgaste de espiga de acero SAE O1 templada y revenida sobre discos de acero SAE 1020 cementados con postratamiento térmico de temple y revenido, con una distancia de recorrido de 2,000 m.....	95
Tabla 3.6. Coeficientes de fricción entre discos de acero SAE 3115 y espiga de acero SAE O1 para una distancia de deslizamiento de 2,000 m a diferentes cargas.....	103
Tabla 3.7. Coeficientes de fricción entre discos de acero SAE 3115 cementados y espiga de acero SAE O1 para una distancia de deslizamiento de 2,000 m a diferentes cargas.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Relación entre el contenido de CO de la atmósfera carburante, la temperatura y contenido de carbono del acero [5].....	8
Fig. 1.2. Esquema de empaquetado de piezas a) Empaquetado de piezas en la caja de cementación; y b) efecto de la temperatura y del tiempo de permanencia sobre la profundidad de cementación con carburante sólido (Carbón + 40% de BaCO ₃) [5].	12
Fig. 1.3. Diagrama de equilibrio para la reacción [4].....	15
Fig. 1.4. Dependencia entre la actividad ac y la Temperatura y contenido de carbono en la austenita [4].....	16
Fig. 1.5. Influencia de los elementos de aleación en la actividad del carbono en la austenita: a) Actividad del carbono constante; y b) contenido de carbono constante [4].....	18
Fig. 1.6. Sección del diagrama de Fe-Fe ₃ C [4].....	18
Fig. 1.7. Templabilidades de la capa y del núcleo en un acero F-1516 (16 Mn Cr5) de composición química 0.13 a 0.19 % de C, 1.00 a 1.30 % de Mn, 0.15 a 0.40 % de Si, ≤ 0.035 % de P, ≤ 0.035 % de S y 0.80 a 1.1 % de Cr [12].....	22
Fig. 1.8. Templabilidades de capa y de núcleo en un acero F-1550 (18 Cr Mo 4) de composición química 0.15 a 0.21 % de C, 0.60 a 0.90 % de Mn, 0.15 a 0.40 % de Si, ≤ 0.035 % de P, ≤ 0.035 % de S, 0.85 a 1.15 % de Cr y 0.15 a 0.25 % de Mo [12].....	23
Fig. 1.9. Templabilidades de capa y de núcleo en un acero F-1522 (20 Ni Cr Mo 4) de composición química 0.15 a 0.21 % de C, 0.60 a 0.90 % de Mn, 0.15 a 0.40 % de Si, ≤ 0.035 % de P, ≤ 0.035 % de S, 0.85 a 1.15 % de Cr y 0.15 a 0.25 % de Mo [12].....	24
Fig. 1.10. Templabilidades de capa y de núcleo en un acero F-1525 (20 Ni Cr Mo 6) de composición química 0.18 a 0.23 % de C, 0.60 a 0.80 % de Mn, 0.15 a 0.40 % de Si, ≤ 0.035 % de P, ≤ 0.035 % de S, 0.40 a 0.60 % de Cr, 1.4 a 1.7 % de Ni, y 0.30 a 0.40 % de Mo [12].....	25
Fig. 1.11. Comparativa esquemática, crecimiento de granos en aceros: a) Crecimiento de grano en aceros de grano fino y grueso; y b) crecimiento de grano en aceros que presentan germinación [3].....	28
Fig. 1.12. Sobrecalentamiento de un acero 18Cr-4Mo, con distintas reducciones de forja [5].	29
Fig. 1.13. Valores máximos de dureza alcanzada en la superficie para los diferentes contenidos de carbono, tomados a una distancia de 3 a 10 mm del extremo templado de la probeta [12].....	31
Fig. 1.14. Curvas Jominy de varios aceros de cementación de uso frecuente [5].....	32
Fig. 1.15. Curvas Jominy correspondiente a varios aceros de cementación de uso más frecuente [5].....	33
Fig. 1.16. Temperaturas críticas de diversos aceros al carbono y aleados [5].....	34
Fig. 1.17. Efecto de la temperatura de revenido en las propiedades mecánicas de un acero SAE 1050.....	38
Fig. 1.18. Austenita retenida (blanca) atrapada entre agujas de martensita (negra).....	39

	Pág.
Fig. 1.19. Cuando se incrementa el carbono se reducen las temperaturas Ms y Mf en aceros al bajo carbono.....	39
Fig. 1.20. Sólo la superficie del acero se calienta por encima de la temperatura A1 y es templada para producir martensita.....	40
Fig. 1.21. Diferentes espesores de capa cementada correspondientes a un acero al carbono de 0.11 % de C [3].....	41
Fig. 1.24. Capa periférica de una pieza cementada y templada de un acero cromo-níquel de la composición siguiente: C = 0.09%, Cr = 0.81% y Ni = 3.10% [3].....	44
Fig. 1.25. Agujas de martensita sobre un fondo blanco de austenita retenida, correspondientes a la zona periférica del acero de la Fig. 1.24.....	44
Fig. 1.26. Ensayo de micro dureza Vickers en la sección transversal de un acero cementado y templado. Se hicieron 7 huellas Vickers, algunas de las cuales son difíciles de observar a 100x [3].....	46
Fig. 1.27. Ensayo de micro dureza Vickers en la sección transversal de un acero cementado y templado [3].....	46
Fig. 1.28. Microestructura austenita [10].....	48
Fig. 1.29. Microestructura perlita [10].....	48
Fig. 1.30. Microestructura martensita [10].....	49
Fig. 1.31. Diferentes tipos de asperezas de una superficie que presenta la misma altura entre cresta y valles, con diferentes longitudes de onda: a) Superficie lisa; b) superficie lisa pero no plana; c) superficie plana rugosa; d) superficie plana rugosa de longitud de onda macrogeométrica; y e) superficie plana rugosa de longitud microgeométrica [6].....	53
Fig. 1.32. Cuerpo hemisférico que presiona sobre una superficie plana [6].....	54
Fig. 1.33. Esfera con microasperezas [6].....	54
Fig. 1.34. Superficie rugosa idealizada penetrada por una superficie plana.....	55
Fig. 2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental de la investigación.....	63
Fig. 2.2. Plano de fabricación dimensiones en mm, discos y espigas.....	64
Fig. 2.3. Proceso de cilindrado acero SAE 3115.....	66
Fig. 2.4. Corte de discos.....	66
Fig. 2.5. Proceso de perforado de discos.....	67
Fig. 2.6. Proceso de refrentado de caras.....	67
Fig. 2.7. Eliminación de filos, proceso de biselado.....	68
Fig. 2.8. Proceso de rectificado.....	68
Fig. 2.9. Vista en planta de la caja para cementación (cotas en mm).....	69
Fig. 2.10. Diseño externo de caja y tapadera. Cotas en mm.....	69
Fig. 2.11. Limpieza y secado de discos.....	71
Fig. 2.12. Secado de carbón vegetal de café.....	71
Fig. 2.13. Pesajes para mezcla carburante.....	72

	Pág.
Fig. 2.14. Distribución de probetas y mezcla cementante en la caja de cementación.....	73
Fig. 2.15. Caja de cementación en horno eléctrico.....	74
Fig. 2.16. Curva de variación temperatura vs tiempo para el postratamiento térmico de temple y revenido para los discos cementados.....	76
Fig. 2.17. Proceso de postratamiento térmico de temple y revenido en acero SAE 3115 con tratamiento termoquímico de cementación.....	76
Fig. 2.18. Tratamiento térmico de recocido, discos de metal base.....	77
Fig. 2.19. Curva de variación temperatura vs tiempo para tratamiento de temple y revenido de las espigas de acero SAE O1.....	78
Fig. 2.20. Disposición espigas en la caja para tratamiento térmico de temple y revenido	78
Fig. 2.21. Lijado en mesa rotativa con suministro de agua para enfriamiento.....	80
Fig. 2.22. Limpieza en máquina de ultrasonido y secado de disco y espiga previo al ensayo de desgaste.....	80
Fig. 2.23. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca Gunt.....	81
Fig. 2.24. Módulo para ensayos tipo espiga sobre disco con sus principales componentes señalados.....	82
Fig. 2.25. Trazado de desgaste.....	82
Fig. 2.26. Balanza analítica.....	82
Fig. 2.27. Extracción de muestras para estudio de dureza y metalografía.....	85
Fig. 2.28. Embutido de muestras.....	86
Fig. 2.29. Ataque químico a la muestra.....	86
Fig. 2.30. Durómetro INNOVATEST, modelo VERZUS 750CCD.....	87
Fig. 2.31. Probeta en el portamuestra bajo la cámara a un aumento de 10x.....	88
Fig. 2.32. Portamuestra bajo el indentador durante la aplicación de carga.....	88
Fig. 2.33. Medición de las diagonales de la huella y lectura de resultados en la pantalla del durómetro.....	88
Fig. 3.1. Metalografías de secciones trasversales de discos cementados: a) Muestra 1; y b) muestra 2.....	90
Fig. 3.2. las fotomicrografías de las secciones en donde se realizaron las indentaciones de dureza Vickers: a) Muestra 1; y b) muestra 2.....	91
Fig. 3.3. Comportamiento de la dureza con respecto a la profundidad del tratamiento termoquímico de cementación en ambas muestras.....	92
Fig. 3.4. Indentaciones de microdureza Vickers en disco de acero SAE 3115 cementadas con postratamiento térmico de temple y revenido, utilizando una carga de 1 kgf realizadas transversalmente desde la superficie en la muestra 1: a) 0.92 mm; b) 1.4 mm; c) 2.06 mm; d) 2.6 mm; y e) 3.35 mm.....	92

	Pág.
Fig. 3.5. Indentaciones de microdureza Vickers en disco de acero SAE 3115 cementadas con postratamiento térmico de temple y revenido, utilizando una carga de 1 kgf realizadas transversalmente desde la superficie en la muestra 2: a) 1.33 mm; b) 2.02 mm; c) 2.42 mm; d) 2.84 mm; y e) 3.16 mm.....	93
Fig. 3.6. Pérdida de masa para los discos de acero SAE 3115 sin y con cementación con PTT para 2,000 m de distancias recorrida en función de la carga aplicada.....	96
Fig. 3.7. Coeficiente de fricción para una misma carga de 15 N en especímenes con tratamiento térmico de recocido y con tratamiento termoquímico de cementación..	97
Fig. 3.8. Coeficiente de fricción para una misma carga de 20 N en especímenes con tratamiento térmico de recocido y con tratamiento termoquímico de cementación..	97
Fig. 3.9. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero SAE 3115 recocidos y espiga de acero SAE O1, con una misma carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	99
Fig. 3.10. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero SAE 3115 recocidos y espiga de acero SAE O1, con una misma carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	100
Fig. 3.11. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero SAE 3115 recocidos y espiga de acero SAE O1, a una carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	100
Fig. 3.12. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero SAE 3115 cementados y espiga de acero SAE O1, a una carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	101
Fig. 3.13. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero SAE 3115 cementados y espiga de acero SAE O1, a una carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	101
Fig. 3.14. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero SAE 3115 cementados y espiga de acero SAE O1, a una carga de 25N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	102

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- ac: Actividad del carbono
- A_e : Área de contacto elástico
- AFNOR: Asociación Francesa de Normalización
- AISI: Instituto Americano de Hierro y Acero
- ASTM: Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales
- DIN: Instituto de Normalización Alemán
- E: Módulo de Young
- EDS: Espectroscopia de dispersión de energía
- F: Carga o fuerza
- f_f : Fuerza de fricción
- F_e : Carga normal
- HRC: Dureza Rockwell C
- ISO: Organización Internacional de Normalización
- K_{eq} : Constante de equilibrio reacción química
- M_f : Temperatura final de transformación martensítica
- MO: Microscopia óptica
- M_s : Temperatura de inicio de transformación martensítica
- n: Número de asperezas por unidad de área; número de ciclos
- N_c : Fracción de carbono
- P: Presión parcial
- P_{CO_2} : Presión parcial del CO_2
- P_{CO} : Presión parcial del CO
- r: Radio
- rad: Radianes
- S: Distancia de deslizamiento
- SAE: Sociedad de Ingenieros de Automoción
- SEM: Microscopia electrónica de barrido
- t: Tiempo
- TEM: Microscopia electrónica de transmisión

Continua.

Continuación.- LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- v: Velocidad lineal
- XRD: Difracción de rayos X
- α : Coeficiente de metales en contacto
- β : Coeficiente de transferencia de masa
- $\gamma_c^{s^x}$: Coeficiente de actividad del elemento disuelto
- ε_c^x : Parámetro que refleja la interacción del elemento disuelto con otros elementos aleantes disueltos en austenita
- θ : Ángulo de inclinación de la superficie
- μ : Coeficiente de fricción
- μm : Micrómetro
- μ_s : Coeficiente de fricción estático
- ω : Velocidad angular

INTRODUCCIÓN

La cementación es un tratamiento termoquímico esencial en la industria metalúrgica, ampliamente utilizado para mejorar la dureza superficial de piezas de acero mientras se mantiene una tenacidad adecuada en el núcleo. Este proceso es especialmente relevante en la fabricación de componentes mecánicos críticos como ruedas dentadas, ejes de transmisión, componentes de dirección y husillos.

La ingeniería de materiales y la metalurgia juegan un papel esencial en el diseño y la fabricación de componentes y estructuras que deben resistir condiciones extremas de carga, temperatura y corrosión. Uno de los métodos más notables para mejorar las propiedades superficiales de los metales, específicamente en aceros, es el tratamiento termoquímico por cementación sólida. Este proceso, arraigado en la historia de la metalurgia, se ha convertido en una técnica esencial para mejorar la durabilidad, la dureza superficial y la resistencia a la corrosión de los aceros.

La cementación sólida es un proceso que involucra la difusión de átomos de ciertos elementos, como el carbono o el nitrógeno, en la matriz del acero a altas temperaturas. A través de este proceso, se logra modificar la composición química de la capa superficial del material, creando una zona endurecida y resistente al desgaste sin comprometer la tenacidad del núcleo. Esta técnica ha sido ampliamente utilizada en una variedad de aplicaciones, desde engranajes y rodamientos hasta componentes de automoción y herramientas de corte.

En este marco teórico se explorará en detalle los fundamentos, los mecanismos y los beneficios de la cementación sólida en aceros, así como examinar sus diversas aplicaciones en la industria. Para ello, se abordarán temas clave, como la cinética de la difusión de átomos, los tipos de cementación sólida, los efectos en las propiedades mecánicas y la influencia de los parámetros del proceso en la calidad de la capa cementada.

A medida que se avanza en esta exploración, se destacará la importancia de comprender los principios subyacentes de la cementación sólida para optimizar los procesos de tratamiento y garantizar la calidad y la fiabilidad de los productos fabricados. Además, se discutirá la evolución de las técnicas de cementación sólida a lo largo del

tiempo, incluyendo las innovaciones tecnológicas que han permitido un mayor control y precisión en el tratamiento.

La parte práctica será fundamental en esta investigación, se hará el proceso de teórico a la vez que se lleva al laboratorio la experimentación y el tratamiento térmico del acero SAE 3115 el cual se someterá a cementación sólida, utilizado carbonato de bario como activador de la mezcla junto a carbón vegetal obtenido del árbol de café.

Después de la cementación se hará un postratamiento térmico de temple y revenido, para así después de lijar hasta 1,200 se coloque en la máquina de ensayos para evidenciar el desgaste de la probeta en el ensayo espiga sobre disco.

Con los resultados obtenidos se realizarán los gráficos y conclusiones del desgaste, tomando en cuenta las variables involucradas, también será importante el análisis comparativo del desgaste entre probetas de metal base y probetas cementadas.

Se tendrá también el análisis metalográfico que evidenciará la microestructura del acero cementado y el que no, de manera que se pueda observar la capa cementada y el cambio en la microestructura con respecto al acero que solo se recoció.

1. MARCO TEÓRICO

Para lograr una mejoría en la vida útil de los elementos de máquinas sometidos a desgaste se pueden mejorar los siguientes aspectos como, por ejemplo; trabajar a una carga de contacto baja o, por otro lado, se puede utilizar uno de los métodos preferidos en la industria; el cual es producir componentes con la profundidad óptima de capa endurecida junto con un buen acabado superficial. El propósito de esta capa externa dura que se obtiene por cementación, carbonitruración, nitruración, entre otros; es proporcionar una 40 superficie con un alto límite de resistencia en una región vulnerable a la iniciación de grietas; en el presente apartado se hará énfasis al tratamiento termoquímico de cementación [3].

La cementación se emplea frecuentemente para endurecer ruedas dentadas de dimensiones medias, ejes de cajas de velocidades para automóviles, piezas de dirección, husillos y muchas otras piezas de máquinas. Las piezas se someten a la cementación después del mecanizado con un sobre espesor para el rectificado final definitivo hasta de 0.25 mm y con más frecuencia, con un sobre espesor para dicho rectificado final de 15 a 25 μm . El sobre espesor para el rectificado no debe superar un 25 a 30% del grosor de la capa cementada. Aunque algunas piezas son sometidas a la cementación después del mecanizado definitivo [1].

Se denomina cementación o carburización al tratamiento termoquímico que consiste en el incremento por difusión de la capa superficial del acero con átomos de carbono a una temperatura entre 850 y 1,000 °C en un medio carburante. Siendo las temperaturas próximas a 900 °C las más utilizadas [2].

Reciben el nombre de aceros de cementación, un grupo de aceros de bajo contenido en carbono (variable generalmente de 0.05 a 0.25 %), que se utilizan para la fabricación de ciertas piezas de máquinas y motores que deben tener gran dureza superficial y buena tenacidad o resistencia al choque. Estas características al parecer opuestas entre sí se pueden obtener cementando la superficie de las piezas, es decir, carburando su zona periférica y dándoles luego a continuación el tratamiento térmico correspondiente. Las piezas así fabricadas en cierto modo están constituidas por dos aceros diferentes. Uno el de la zona interior de bajo contenido en carbono, tenaz y

resistente, y otro el de la zona periférica de alto contenido en carbono, generalmente 0.80 a 1.10 % de C, que después del temple y revenido queda con una dureza muy elevada [3].

A pesar de que teóricamente la cementación es un tratamiento muy sencillo, al emplear este proceso surgen con cierta frecuencia complicaciones derivadas de los muchos factores que intervienen en el mismo, como son la forma y tamaño de las piezas, la composición y calidad de los aceros, los métodos de enfriamiento empleados, la temperatura y duración de los tratamientos, etc., factores muy complejos que se deben estudiar muy detenidamente para poder obtener, en cada caso, con relativa regularidad, resultados satisfactorios [3].

1.1. CEMENTACIÓN CON CARBURANTES SÓLIDOS

Se utilizan diversas materias para suministrar el carbono que ha de absorber el acero durante la cementación. Las más empleadas suelen ser el carbón vegetal, el negro animal, huesos calcinados, cuero, cok, etc., mezclados con carbonatos de bario, calcio y sodio [3].

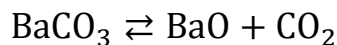
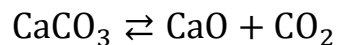
El carbón solo, no se emplea, porque con él no se suelen conseguir concentraciones de carbono en la periferia del acero, superiores a 0.65 % de C. Mezclándolo en cambio con carbonatos alcalinos o alcalinotérreos, en la capa periférica se alcanzan fácilmente contenidos hasta de 1.20 % de C [3].

Durante muchos años, uno de los cementantes más utilizados fue la mezcla carbón preparada con 60 % de carbón vegetal y 40 % de carbonato bórico. El carbón se tritura en trozos de 3 a 6 mm de diámetro y luego se mezcla con el carbonato bórico en polvo. Experimentalmente se ha comprobado que se puede disminuir el porcentaje de carbonato bórico, que se empleaba antiguamente, obteniéndose muy buenos resultados con porcentajes de 10 a 15 %, sin que pierda efecto sensible la acción carburante de la mezcla; bajando en cambio de 8 %, el rendimiento disminuye ya notablemente. Se suele añadir también un 20% de cok como diluyente, porque facilita la penetración del calor a través del compuesto carburante, permite obtener rápidamente temperaturas uniformes

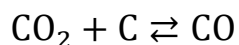
en el interior de las cajas y disminuye el coste de la mezcla. Como activadores también se suelen emplear, aunque menos frecuentemente, el carbonato cálcico y el carbonato sódico. Es importante que el carbón y los demás materiales que se utilizan para preparar los cementantes sólidos estén bien secos, porque pequeñas trazas de humedad pueden dar lugar a descarburaciones locales y luego a puntos blandos en las piezas después del último temple [3].

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

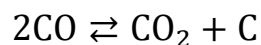
La acción activadora de los carbonatos de calcio, bario y sodio se suele explicar de formas diferentes. La teoría más antigua y generalizada explica el fenómeno en la forma siguiente: primero se realiza la descomposición de los carbonatos a elevada temperatura de acuerdo con las reacciones siguientes:



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

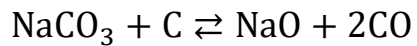
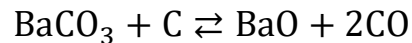


Finalmente, el óxido de carbono se descompone en la superficie del acero según la reacción siguiente:



Así, se obtiene dióxido de carbono y carbono naciente que pasa al acero. En la actualidad, sin embargo, cada día es más admitida otra hipótesis en cierto modo similar a la anterior, aunque no señala la formación de CO_2 y atribuye principalmente la

acción activadora de los carbonatos a la reacción que se produce a alta temperatura con el carbono, formándose óxido de carbono de acuerdo con las reacciones:



Luego el CO producido es el que al se descompone para dar lugar al carbono naciente, que es el que produce la carburación [3].

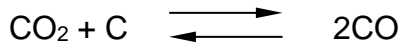
Los óxidos BaO y Na₂O que se producen en esas reacciones tienden luego a reaccionar con el CO₂ producido en la descomposición del CO, obteniéndose así los carbonatos correspondientes y con ello se realiza la regeneración de los carbonatos que no se consumen, sino que al ser elementos productores de CO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

Los principales inconvenientes de los cementantes sólidos son: 1) La gran duración de la operación; 2) Elevado consumo de carbón; 3) Necesidad de mucha mano de obra; 4) Dificultad de templar las piezas directamente; y 5) Irregularidad de temperaturas en las cajas de cementación [3].

En el proceso de cementación tiene gran importancia los porcentajes de los distintos compuestos gaseosos de carbono que existen en el medio que rodea al acero. Los gases procedentes de cementantes sólidos son principalmente monóxido de carbono (CO) y anhídrido carbónico (CO₂). El primero actúa a altas temperaturas por cesión de carbono, que se difunde en el hierro, mientras que el anhídrido carbónico cede oxígeno que se combina con el carbono del acero, por lo que se descarbura la superficie. Con una determinada relación de óxido de carbono a anhídrido carbónico en el medio que rodea al acero se tiene un comportamiento neutro de los gases, es decir que no se produce carburación ni descarbura. La proporción de monóxido de carbono y anhídrido carbónico con la que se consigue este comportamiento neutro depende primeramente de la temperatura y luego del contenido en carbono del acero. Si el efecto sobre el acero entre el monóxido de carbono, el anhídrido carbónico y el carbón incandescente en la

caja cerrada no se considera, se establece un equilibrio llamado Equilibrio de Boudouard que es función de la temperatura [5].

La reacción química se desarrolla tal como sigue:



Esto significa que existiendo gran porcentaje de CO_2 , éste reacciona con el carbón incandescente y una parte de CO_2 se transforma con el carbono en CO . Si se trabaja partiendo de las temperaturas comunes para la carburación resultan, los contenidos en CO y CO_2 (ver Tabla 1.1) [5].

Tabla 1.1. Contenidos de CO y CO_2 en la fase gaseosa, en función de la temperatura con un cementante sólido (Sin considerar la cementación del acero) [5].

Temperatura, °C	Contenidos aproximados	
	%CO	%CO ₂
800	88	12
900	97	3
1,000	99.96	0.04

Por la presencia del acero se tiende a formar un equilibrio entre la atmósfera gaseosa y el contenido de carbono del acero. En la Tabla 1.2 se presenta las condiciones de equilibrio en varios casos [5].

Tabla 1.2. Condición de equilibrio entre CO y CO_2 y el contenido de carbono superficial del acero a dos temperaturas diferentes [5].

Temperatura, °C	%C del acero	Contenidos aproximados	
		%CO	%CO ₂
800	0.4 - 1.2	70	30
		88	12
900	0.4 - 1.2	92	8
		96	4

Asumiendo que el equilibrio no se altera por condiciones externas, por ejemplo, cambio de presiones resulta de estas condiciones una relación entre el contenido de carbono de la superficie del acero y la atmósfera gaseosa. Así ~900 °C de temperatura puede existir un equilibrio entre este medio y un acero con ~1.2 % de C, en cuyo caso no

tendrá lugar una carburación ni una descarburación; es decir, que no se produce ninguna reacción en absoluto. Aunque, si a esta temperatura se tratase un acero que contiene menos del 1.2 % de C, se produciría entonces una carburación. En cambio, en un acero para herramientas conteniendo por ejemplo 1.4 % de C, durante su tratamiento no tendrá lugar una carburación sino una descarburación, hasta que su superficie llegue a un contenido del 1.2 % C. La influencia del contenido de CO y CO₂ de los gases, la temperatura y el contenido de carbono del acero, se han presentado en la Fig. 1.1, en la que se indica con una curva a trazos en forma de S el equilibrio Boudouard; así, como los equilibrios de la atmósfera cementante con el contenido de carbono del acero (líneas continuas de la parte superior derecha de la Fig. 1.1) [5].

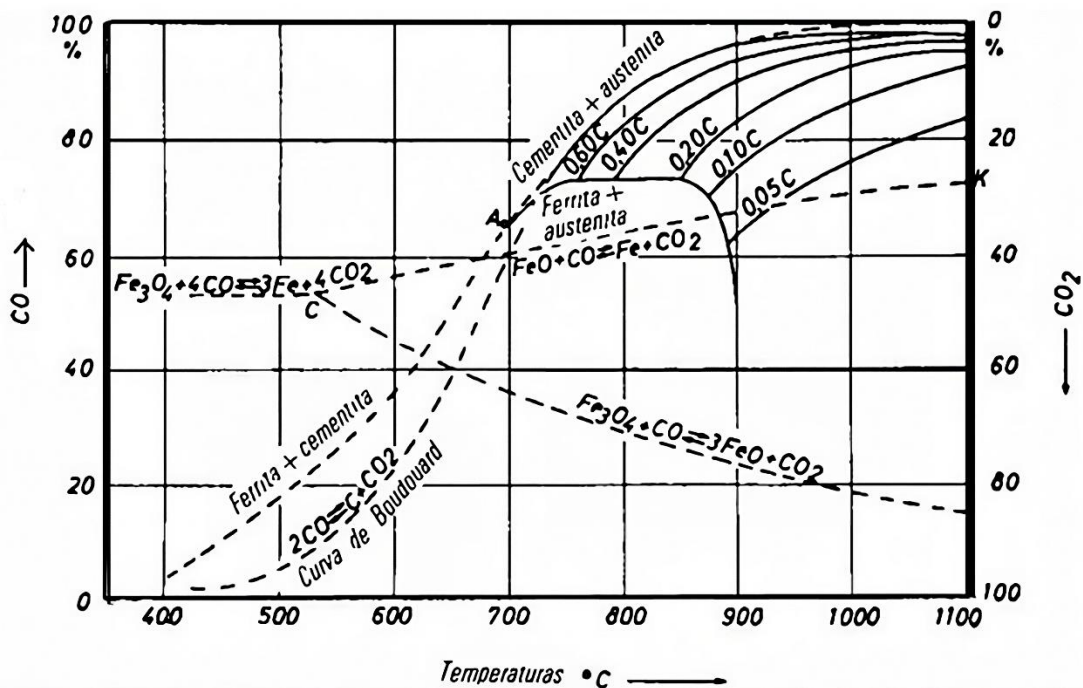


Fig. 1.1. Relación entre el contenido de CO de la atmósfera carburante, la temperatura y contenido de carbono del acero [5].

Con el ejemplo de un acero que contiene 0.1 % de C se explicará el uso de este diagrama para una apreciación práctica de los procesos de cementación:

Un acero de cementación con 0.1 % de C está, por ejemplo, a una temperatura de 900 °C, en equilibrio con gas cementante que contiene un 75 % de CO. Esto se desprende de la intersección de la línea de 0.10 %C con la línea de temperatura para 900 °C [5].

La altura del punto de intersección, medida en la ordenada, indica el contenido de CO (izquierda) y CO₂ (derecha). Si se aumenta, por ejemplo, hasta un 90 % el contenido CO de los gases y a 900 °C el acero admitirá hasta ~0.4 % de C (línea 0.4 de C). Con el mismo medio del horno la absorción de carbono por el acero deberá ser mayor a temperatura baja, y menor a una temperatura más alta. Así, a 800 °C y 90 % de CO en el medio, la absorción de carbono en la superficie de la pieza podrá aumentar, hasta 0.60 % de C y a 820 °C, hasta ~0.9 % de C [5].

En cambio, a una temperatura de 1060 °C, la absorción de carbono disminuye hasta un 0.1 % de C; es decir, que a esta temperatura y con el medio del horno no se produce una cementación en un acero con 0.1 % de C. Si se aumentase más la temperatura, descendería entonces el equilibrio hasta menos del 0.1 % de C en el acero, es decir, el acero cede carbono y se descarburada. A medida que va disminuyendo el porcentaje de CO en el medio del horno, la descarburación se inicia a una temperatura sensiblemente baja. Así, con un 80 % de CO, un acero con 0.1 % de C se descarburada por encima de unos 940 °C [5].

La línea C-K (ver Fig. 1.1) representa la transición entre la descarburación y la oxidación. Esto significa que el acero que contiene 0.1 % de C a 900 °C, en el medio del horno con más de ~75 % de CO lo carbura, de CO hasta ~67 % (corte de la línea C-K con la línea de 900 °C, ver Fig. 1.1) lo descarburada, y por debajo de ~67 % de CO lo oxida [5].

Para la cementación es importante, en primer lugar, la velocidad a la que el carbono es suministrado por el agente generador de carbono, y en segundo por lugar la velocidad a la que el carbono es transferido en el acero por difusión desde la superficie hasta el interior de la pieza. Si el suministro de carbono es muy alto (gran contenido de CO) y la velocidad de difusión en el acero es reducida, se produce, una alta concentración de carbono en la capa superficial de la pieza y las transiciones en el contenido de carbono desde la superficie hasta el núcleo son bruscas [5].

Es deseable evitar concentraciones de carbono mayor a 0.86 % C, porque se forma cementita libre en el acero. La cementita formada se deposita en los límites de grano, lo cual disminuye considerablemente la tenacidad de la capa superficial; por lo que, después de haber realizado el temple se puede producir un desprendimiento de la

capa cementada delgada. Con pequeñas profundidades de cementación, décimas de milímetros y haciendo uso de los aceros corrientes bajos en carbono, no se puede contar normalmente con un incremento de contenido de carbono por encima de 0.86 % de C, aunque se apliquen productos muy carburantes; es decir, que suministren rápidamente carbono esto se debe a que la superficie está saturada de carbono. Por otro lado, si se requiere una cementación de mayor profundidad, la velocidad de difusión del carbono en la superficie exterior es amortiguada por el hecho de que el gradiente de concentración disminuye hacia el interior de la pieza a causa del carbono absorbido. Se producen así fuertes concentraciones de carbono en la superficie exterior, lo cual es cementita. Hasta ~1 mm de profundidad de cementación será siempre posible evitar contenidos de carbono por encima de 0.86 % C. A mayores profundidades de cementación habrá que adoptar cementantes de efecto más suave. Aunque, a profundidades mayores de unos 3 mm, incluso empleando cementantes suaves, no habrá modo de impedir que se forme cementita en la capa superficial, prescindiendo de que apenas se emplean ya cementantes de acción suave, porque en este caso se necesitarían tiempos demasiado prolongados [5].

Los tiempos de cementación están condicionados principalmente por la temperatura de operación y, en menor medida, por el cementante. Con los polvos cementantes de carbón vegetal y carbonato de bario, para una profundidad de cementación de 1 mm y a ~900 °C de temperatura, se tiene que contar con una duración de 4 h. En la primera hora la zona cementada llegará a una profundidad de 0.35 mm, aumentando luego más despacio con el tiempo. Cuando se trata de grandes profundidades los tiempos aumentan considerablemente. Así, para 1.5 mm de profundidad de cementación el tiempo necesario es aproximadamente el doble que el que precisa para llegar a 1 mm. Así, junto al encarecimiento del proceso debido a los prolongados tiempos de operación se debe tener presente también el crecimiento del grano que aumenta con el tiempo, lo cual origina una reducción de la tenacidad. En vista del crecimiento de grano, que aumenta cada vez más con la temperatura, antes se aplicaban temperaturas de carburación relativamente bajas (830 a 850 °C). Aunque los tiempos más prolongados que se requieren a bajas temperaturas conducen prácticamente a los mismos resultados respecto al tamaño de grano, que si se trabaja

con temperaturas más altas y tiempos más cortos para obtener iguales profundidades de carburación. Dado que esto último reporta mayores economías, en la actualidad se trabaja normalmente a temperaturas superiores en el orden de 900 a 950 °C, y para mayores profundidades de cementación se llega incluso a 1,000 °C [5].

Aparte de esto, la temperatura puede alterar la pendiente de la disminución de carbono en la zona de transición desde la capa superficial cementada hasta el núcleo de la pieza [5].

En cuanto la temperatura sea más alta y mayor sea la velocidad de difusión, más suave es el paso de contenido de carbono desde la superficie hasta el núcleo. De este modo, aplicando temperaturas de cementación más altas resultarán mucho más pequeñas los esfuerzos residuales entre capas superficiales y núcleo durante el temple posterior. La indicación del tiempo, utilizando cementantes sólidos, se refiere corrientemente al tiempo de permanencia propiamente dicho durante el cual las piezas están a la temperatura de cementación. Dado que los cementantes sólidos son muy malos conductores de calor y el material a cementar tiene que estar bien rodeado por los cementantes con el propósito de evitar irregularidades se necesitan entonces tiempos de calentamientos prolongados hasta que las piezas lleguen verdaderamente a la temperatura necesaria [5].

1.1.1. EJECUCIÓN DE LA CEMENTACIÓN CON CARBURANTES SÓLIDOS

Los polvos cementantes tienen que estar bien secos, ya que si se emplean cementantes húmedos se pueden producir corrosión en las superficies de las piezas. En caso preciso habrá que calentar los cementantes al aire, por ejemplo, en tambores de chapa dejando libre una pequeña abertura. El contenido de azufre de los cementantes debe ser lo más bajo posible. También, se tiene que procurar que el carbón vegetal no esté en trozos demasiado grandes, pues cuanto menor es el tamaño de grano tanto mayor puede ser la superficie de reacción y mayor la velocidad a que se desarrolla. Dado que al calentar en cajas no se conoce la temperatura exacta a la que se calienta la pieza y las reacciones empiezan antes de alcanzar las temperaturas de carburación elegidas, es conveniente

incorporar dos a tres muestras de alambre grueso del mismo grueso u otro de composición parecida en el centro de la caja, de tal modo de que los alambres se puedan volver a sacar durante la cementación. Estos alambres se retiran a distintos intervalos de tiempo, se enfrían bruscamente y se parten. A base de la muestra rota se puede determinar entonces la profundidad de cementación. Por medio de estas pruebas se puede conseguir con bastante exactitud la profundidad de temple deseada. El empaquetado de las piezas se tiene que hacer de manera que, por una parte, todas las piezas estén rodeadas de mezcla cementantes y entre ellas exista suficiente cantidad de mezcla y, por otra parte, las piezas y la mezcla tengan un descenso uniforme al consumirse el cementante. Para lograr mayores profundidades de cementación se debe procurar que exista la suficiente cantidad de agente cementante. Las partes de las piezas que no se tienen que carburar se cubrirán con una pasta o con barro. Sin embargo, para tener mayor protección contra la cementación (no tratándose de tiempos demasiado prolongados) es más ventajoso un recubrimiento de cobre. Después del empaquetado se coloca una tapa sobre las cajas de cementación y las juntas se cierran con barro.

En la Fig. 1.2 se presenta un esquema de empaquetado de piezas en la caja de cementación [5].

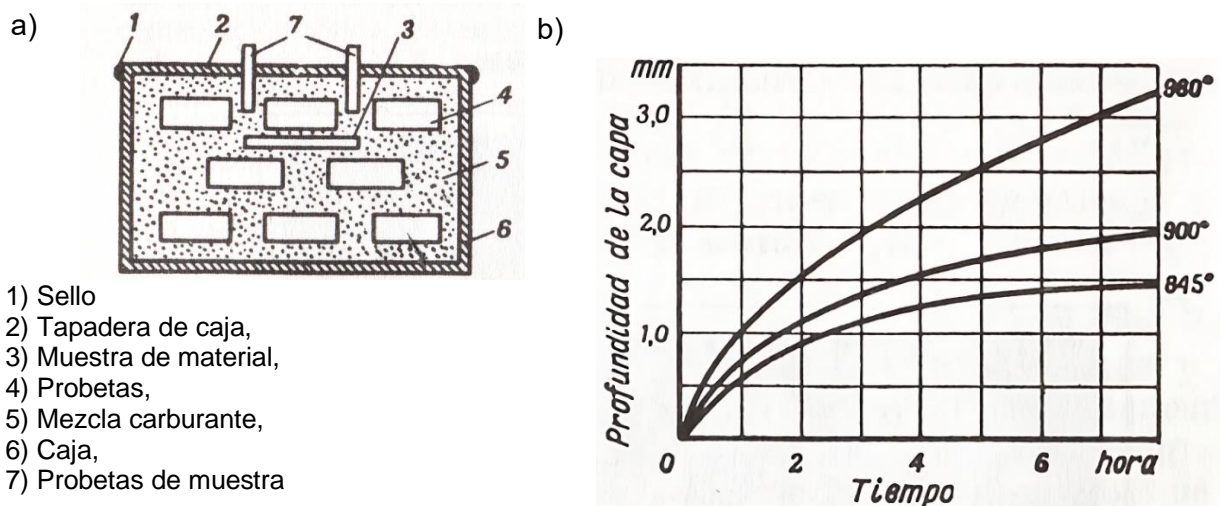


Fig. 1.2. Esquema de empaquetado de piezas a) Empaquetado de piezas en la caja de cementación; y b) efecto de la temperatura y del tiempo de permanencia sobre la profundidad de cementación con carburante sólido (Carbón + 40% de BaCO₃) [5].

1.1.2. MECANISMO FISICOQUÍMICO DE TRANSFERENCIA DEL CARBONO EN EL PROCESO DE CEMENTACIÓN

El carbono se disuelve en el hierro α o γ sólo cuando su potencial químico μ en el medio saturante es más alto que en el acero; es decir existe una diferencia de potencial $\mu_{Fe}^C - \mu_{Fe}^C > 0$ [4].

Al resolver los problemas tecnológicos surgen las preguntas:

¿En qué dirección, en las condiciones indicadas, se produce la transferencia de masa o cual debe ser la composición del ambiente saturante para que la transferencia de masa se efectúe en dirección del ambiente saturante hacia el acero?

¿Hasta qué concentración crece el contenido de carbono en la superficie reactiva de saturación?

¿A qué velocidad transcurre el proceso de cementación?

Así, para dar respuestas a las preguntas relacionadas con la interacción entre la atmósfera saturante y la pieza a tratar, es preciso realizar el análisis de las reacciones posibles valiéndose de las leyes de la termodinámica y de la cinética química.

En el proceso de carburación del acero como fuente de carbono activo sirve el óxido de carbono. La interacción entre C y CO_2 se describe por la reacción siguiente [4].



La constante de equilibrio (K_{eq}) de la reacción anterior se obtiene de la Ec. 1.1, la cual se representa:

$$K_{eq} = \frac{P_{CO_2} ac}{P_{CO}} \quad (1.2)$$

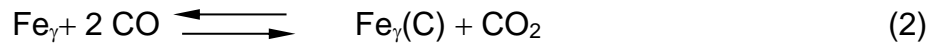
donde: P_{CO_2} es la presión parcial del CO_2 ;

P_{CO} es la presión parcial del CO; y

ac es la actividad del carbono igual a 1 para la reacción (1).

En la Fig. 1.3 se presenta el diagrama de equilibrio para la reacción (1), del cual se deduce que con el aumento de la temperatura la relación entre CO y CO₂ se desplaza en dirección del CO [4].

Como se ve en la reacción reversible (1), en ella participa el carbono puro, cuya actividad es máxima e igual a 1. La saturación del acero con carbono se produce a temperaturas correspondientes a la zona γ . Por lo tanto, en la cementación también se debe considerar como participante de reacción la solución sólida de carbono en el hierro γ (austenita). Si el proceso transcurre en la zona de austenita Fe _{γ} (C) en el sistema Fe-Fe₃C, la reacción toma la forma (2):



La constante de equilibrio para este caso tendrá la forma, según la Ec. 1.2, así:

$$K_{\text{eq}} = \frac{P_{\text{CO}_2} \cdot a_{\text{C}}}{P_{\text{CO}}^2} \quad (1.2)$$

donde: a_{C} es la actividad del carbono disuelto, que ya no es igual a la unidad.

Por consiguiente, a temperaturas de cementación, cuando la difusión se realiza en la región de austenita, las condiciones de equilibrio de la reacción de cementación (2) se determinan no solo por la relación de las presiones parciales de los componentes que constituyen el medio (CO y CO₂), sino que también por la actividad del carbono a_{C} de acuerdo con la reacción (3) [4].



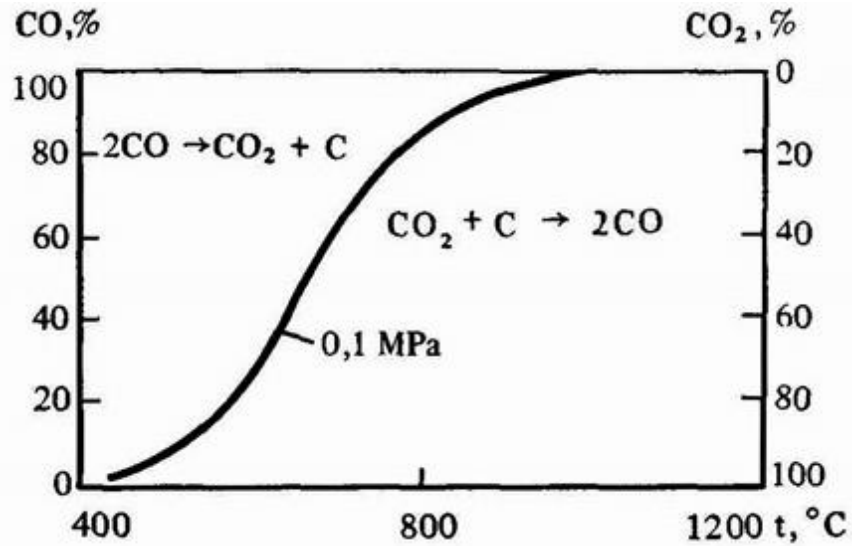


Fig. 1.3. Diagrama de equilibrio para la reacción [4].

Para determinar la actividad del carbono en la austenita se puede hacer uso de la Ec. 1.5:

$$\ln (ac) = \text{Lg} \left(\frac{N_c}{1 - 5N_c} + 0.9N_c \right) + \frac{2105}{T} - 0.6735 \quad (1.3)$$

donde: N_c es la fracción del carbono, y
 T es la temperatura en Kelvin.

Como se presenta en la Fig. 1.4, cuando menor carbono hay en la austenita y más baja es la temperatura, tanto mayor es el valor de ac [4].

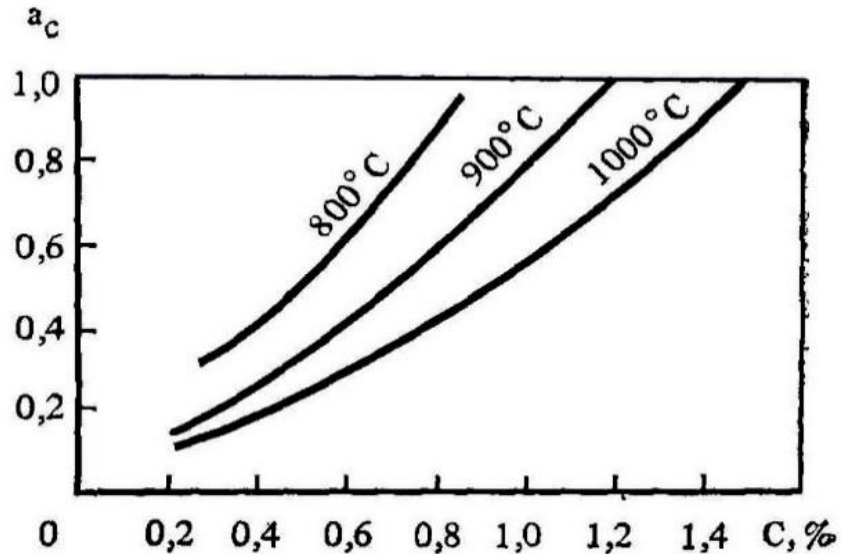


Fig. 1.4. Dependencia entre la actividad a_c y la Temperatura y contenido de carbono en la austenita [4].

Cuando la línea de máxima solubilidad del carbono en la austenita alcanza la línea (ver Fig. 1.4) en el sistema Fe-Fe₃C, la magnitud de a_c es igual a 1; si a_c es mayor que 1, de la austenita precipita la cementita. Los datos citados permiten, en las condiciones de equilibrio, determinar las relaciones entre concentración de carbono en la austenita y la composición del ambiente saturante [4].

La acción carburante de la atmósfera durante la cementación se estima por el potencial de carbono π_c , el cual indica la concentración de carbono que puede ser alcanzada en la austenita, en un medio dado y a una temperatura determinada. El potencial de carbono es proporcional a su actividad $a_c = K_{eq}\pi_c$. La capacidad de cementación de la atmósfera también se caracteriza por la intensidad de carburación [4].

La medida de la intensidad de carburación es el coeficiente de transferencia de masa β (m/ s). Sobre este coeficiente influye mucho la composición de la atmósfera carburante, en particular el hidrógeno, mientras que la temperatura ejerce un efecto relativamente pequeño [4].

La magnitud β en la mezcla CO-CO₂ no es grande (0.54×10^{-9} m/s), aunque aumenta considerablemente en el gas endotérmico) $100 - 130 \times 10^{-9}$ m/s). Entre el coeficiente β y el producto $P_{CO}P_H$, existe una dependencia directa.

Los otros átomos de otros elementos diluidos en la austenita, debido al desarrollo de las interacciones interatómicas, ejercen influencia sobre la actividad de carbono (a_c). Según Wagner, la influencia de aleantes en la austenita sobre la actividad del elemento disuelto (C), puede ser representada por la Ec. 1.6:

$$\ln \gamma_C^{\varepsilon^x} = \ln \gamma_C + N_3 \varepsilon_C^3 + \dots + N_n \varepsilon_C^n \quad (1.4)$$

donde: $\gamma_C^{\varepsilon^x}$ es el coeficiente de actividad del elemento disuelto (carbono), debido a la influencia de los aleantes x_3, x_4, \dots, x_n ; N_3, N_4, \dots, N_n son las fracciones atómicas de los elementos aleantes; ε_C^x es el parámetro que refleja la interacción del elemento disuelto (carbono) con otros elementos aleantes, disueltos en la austenita [4].

$$\varepsilon_C^x = \left(\frac{\partial \ln \gamma_C}{\partial N_x} \right) \quad (1.5)$$

Si los aceros de diversa composición se tratan en una atmósfera con una actividad determinada, entonces el contenido de carbono en la superficie será desigual. Los elementos aleantes disueltos ejercen influencia sobre la transferencia de masa (ver Fig. 1.5) [4].

En los aceros aleados con Ni, Si, Co, B y otros elementos, que incrementan el valor de a_c (ver Fig. 1.5a), el contenido de carbono será inferior (C_1) que en los aceros que contienen elementos formadores de carburos (Cr, Mo, W, Mn, Ti, V, etc.) y que disminuyen la actividad del carbono (C_3) [4].

Si hace falta obtener una concentración prefijada de carbono, entonces los aceros aleados con los elementos que influyen de modo diferente en la actividad del carbono se han de someter a la cementación en un ambiente con diferente actividad [4].

Conforme a los principios considerados anteriormente del análisis termodinámico de las reacciones fundamentales que se desarrollan durante la cementación en la fase gaseosa y en la superficie de contacto gas-metal, se puede construir, un modelo

matemático de cementación, teniendo en consideración la ley cinética de las reacciones heterogéneas [4].

El modelo describe el proceso físico-químico de la cementación y establece los vínculos entre los parámetros tecnológicos del proceso (temperatura y composición de la atmósfera cementante) y la distribución de la concentración de carbono en el espesor de la capa cementada [4].

En la Fig. 1.6 se presenta la región sombreada que corresponde a las concentraciones recomendables de carbono en la superficie de la capa cementada: austenita, A; ferrita, F; y perlita, P [4].

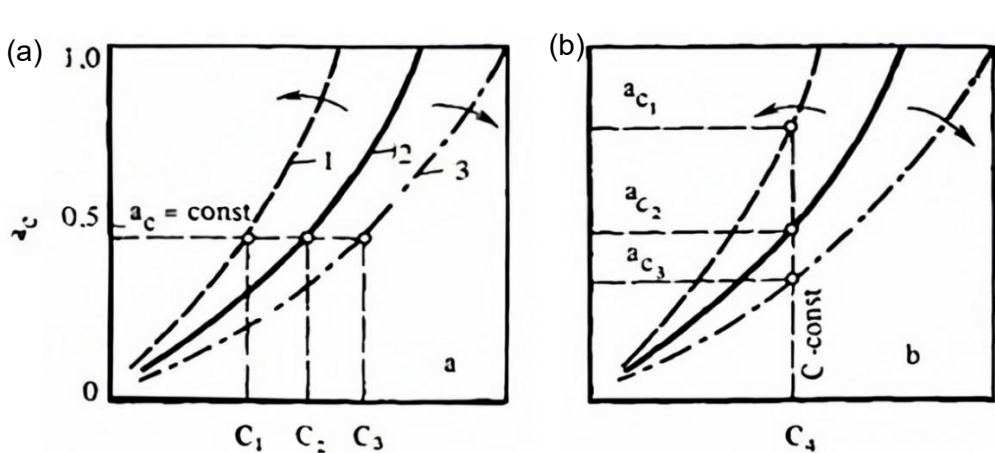


Fig. 1.5. Influencia de los elementos de aleación en la actividad del carbono en la austenita: a) Actividad del carbono constante; y b) contenido de carbono constante [4].

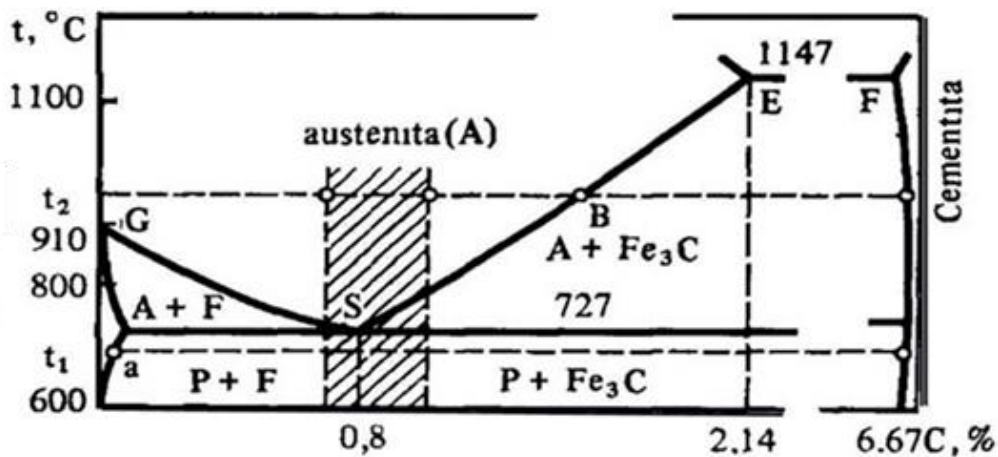


Fig. 1.6. Sección del diagrama de Fe-Fe₃C [4].

1.1.3. CARACTERÍSTICAS QUE DEBEN CUMPLIR LOS ACEROS PARA CEMENTACIÓN

La tecnología ha propiciado grandes avances en los últimos años, fundamentalmente en lo que se refiere a materiales complejos, y no sólo en la consecución de determinadas propiedades, sino también en la combinación de propiedades extremas adecuadas para usos muy específicos y las solicitaciones más variadas. Se pueden tomar como ejemplo los materiales metálicos recubiertos con explosivos, los recubiertos a pistola, los aportes por soldadura, los materiales plásticos reforzados con fibra de vidrio o metálicas, etc. Así entre estos avances tecnológicos sigue destacándose la cementación de los aceros como uno de los más geniales procesos, ya que se obtiene un núcleo tenaz y una capa superficial dura y resistente al desgaste. En estos se combinan idealmente la resistencia y la tenacidad de un acero débilmente aleado de 0.20 %C en el núcleo, con la dureza y la resistencia al desgaste de un acero de herramienta (en la superficie) [12].

En términos generales, las propiedades que debe cumplir un acero cementado son:

- 1) Una buena resistencia al desgaste y a la abrasión en la superficie, para lo cual se precisa una dureza elevada.
- 2) Soportar altas cargas superficiales (esfuerzos), necesitando para ello suficiente resistencia en la capa superficial, la cual debe tener el espesor correcto.
- 3) Una resistencia a la fatiga conveniente para soportar una distribución adecuada de los esfuerzos residuales.
- 4) Resistencia y tenacidad de núcleo apropiadas para cumplir con las solicitaciones a que está sometida la pieza en servicio.

Es bien conocido que la primera, la resistencia al desgaste, depende de la dureza máxima obtenida de acuerdo con el contenido en carbono y de elementos de aleación, de la austenita residual y de la cantidad, forma y distribución de los carburos; la segunda, de la profundidad de cementación y de la austenita residual, la tercera, de la distribución de los esfuerzos residuales que se puede producir durante el enfriamiento en transformaciones y de un adecuado tratamiento térmico, y la cuarta como consecuencia de la transformación correcta del núcleo en dicho tratamiento térmico [12].

Cualquiera de las normas conocidas y en uso, la ISO 683/XI, EURO-NORM 84-70, DIN 17210, AFNOR A35-552, UNI 5332-64, BS 970-55, AISI o SAE, dejan bien claro que para cementación deben cumplir unas exigencias de composición química, templabilidad, de dureza máxima después de la forja o de un recocido de ablandamiento, de dureza después de un tratamiento para mejorar la maquinabilidad, de características mecánicas sobre probetas con un tratamiento de cementación en blanco (simulado) y del tamaño de grano. En algunos casos, se desea también la dureza máxima en estado de estirado en frío [12].

Es importante destacar algunas consideraciones metalúrgicas sobre las características más importantes como la templabilidad, tamaño de grano y propiedades mecánicas que pueden ser de utilidad para explicar resultados experimentales [12].

Respecto a la templabilidad, no cabe duda, ya ha sido aceptado en todas las normas que tiene primordial importancia en las propiedades y en la clasificación de los aceros de cementación; los aceros deben cumplir con una banda de templabilidad normalizada. En las piezas cementadas por su propia forma de tratarlas, el contenido de carbono disminuye desde la superficie hasta el núcleo; así, hay una capa exterior cementada con 0.8 a 1.0% C y un núcleo con ~0.20% C. En el tratamiento de cementación y temple directo toda la pieza se enfría al mismo tiempo por lo que hay que considerar entonces una templabilidad de núcleo y una templabilidad de la capa [12].

El ensayo Jominy tiene la gran ventaja de que las condiciones de temple pueden ser reproducidas con suficiente precisión y los resultados son siempre comparables; el cual es el ensayo normalizado para la templabilidad del núcleo. El ensayo Jominy – Meyer, determinando previamente la curva de cementación, tiene análogas ventajas para la determinación de la templabilidad de la capa cementada [12].

De una manera general, la templabilidad de capa o templabilidad superficial aumenta con el contenido en carbono, aunque tiene un contenido en carbono óptimo, porque al sobrepasar el límite de solubilidad a distintas profundidades aparecen carburos insolubles en cantidades tanto mayor cuanto menor sea la temperatura de temple, los cuales restan elementos de aleación y carbono al núcleo y, consecuentemente, disminuyen la templabilidad. Por otro lado, la tendencia a formar austenita residual aumenta también con los contenidos de carbono elevados y este constituyente es más

blando, siendo ésta otra razón para elegir un contenido de carbono óptimo en superficie, usualmente este óptimo está entre 0.7 y 0.9 %C [12].

En la Fig. 1.7 se presenta este efecto para un acero 16MnCr₅, donde un contenido alto en carbono tiene una influencia muy desfavorable, y en la Fig. 1.8 para un acero 18CrMo₄, donde es menos perjudicial; en las Figs. 1.9 y 1.10, que corresponden a dos aceros NiCrMo, 20NiCrMo₂ y 20NiCrMo₆ de gran producción actualmente, se ve que, con débiles contenidos de cromo, la capa superficial admite una proporción de carbono mayor. La tendencia a la formación de austenita residual y de carburos cuando se realiza el temple desde la temperatura de cementación también es mayor para contenidos de cromo altos y como además el cromo disminuye fuertemente la temperatura M_s, no conviene para estos aceros en proporción elevada [12].

Siendo, según esto, esencial en un acero de cementación obtener una curva de dureza, también lo es, como se dijo anteriormente, obtener una capa superficial de espesor adecuado y con un estado de esfuerzos capaz de soportar altas presiones. Ello implica que la capa cementada debe estar sometida a compresión y para lograrlo es preciso una cantidad importante de martensita excluyendo la presencia de austenita residual o de carburos, cosa que no es difícil de lograr en los talleres de tratamientos térmicos actuales si están bien equipados. La profundidad de cementación útil, para las mismas condiciones de tratamiento y que corresponde a la dureza para 0.4% C, es también menor en los aceros débilmente aleados que tienen una templabilidad del núcleo mayor, circunstancia que tampoco se debe olvidar al elegir un acero de cementación determinado [12].

En las figuras anteriores, en donde se representa la templabilidad de núcleo y de capa cementada para contenidos de carbono entre 0.80 y 1.1% C se puede indicar como singularidad en todos los casos, si bien para distintos diámetros críticos, que aunque las bandas de templabilidad normalizadas admiten una dispersión perfectamente confirmada por la práctica, donde, por ejemplo, para el valor J₁₀ los límites superior e inferior varían entre 10 y 12 unidades HRC, para la templabilidad de capa, a la misma distancia, esta variación es sólo de 3 a 4 unidades HRC. Expresado de otra forma, quiere decir que, si la curva Jominy de un acero cumple con la banda de templabilidad normalizada, tanto si está cerca del límite superior como si lo está del inferior, parece probable que haya de

cumplir también con las bandas señaladas en la templabilidad de capa y con dispersión mucho menor. En la misma figura se han señalado los valores límites de J_{10} en cada caso, que confirman cuanto se ha indicado [12].

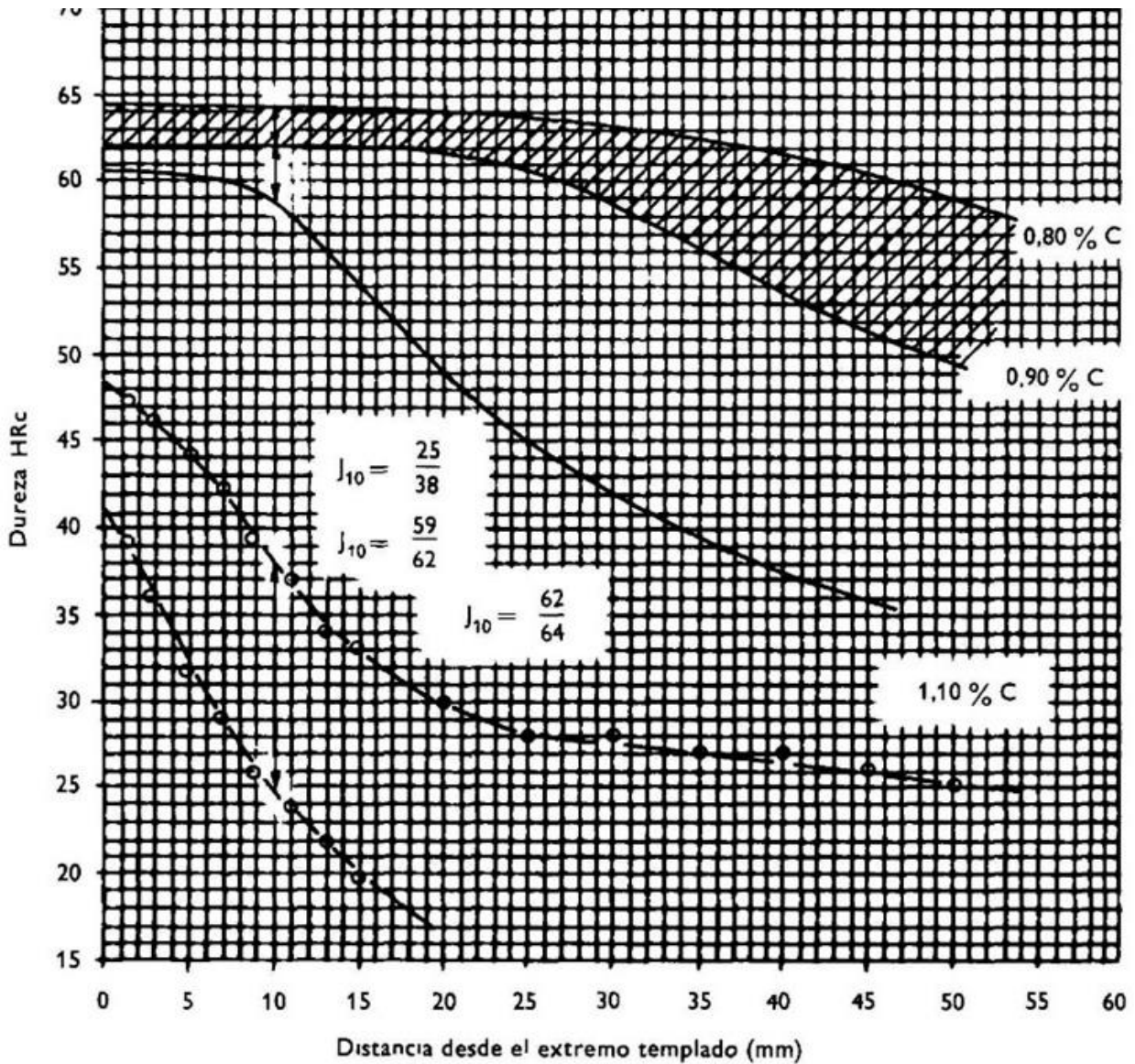


Fig. 1.7. Templabilidades de la capa y del núcleo en un acero F-1516 (16 Mn Cr5) de composición química 0.13 a 0.19 % de C, 1.00 a 1.30 % de Mn, 0.15 a 0.40 % de Si, ≤ 0.035 % de P, ≤ 0.035 % de S y 0.80 a 1.1 % de Cr [12].

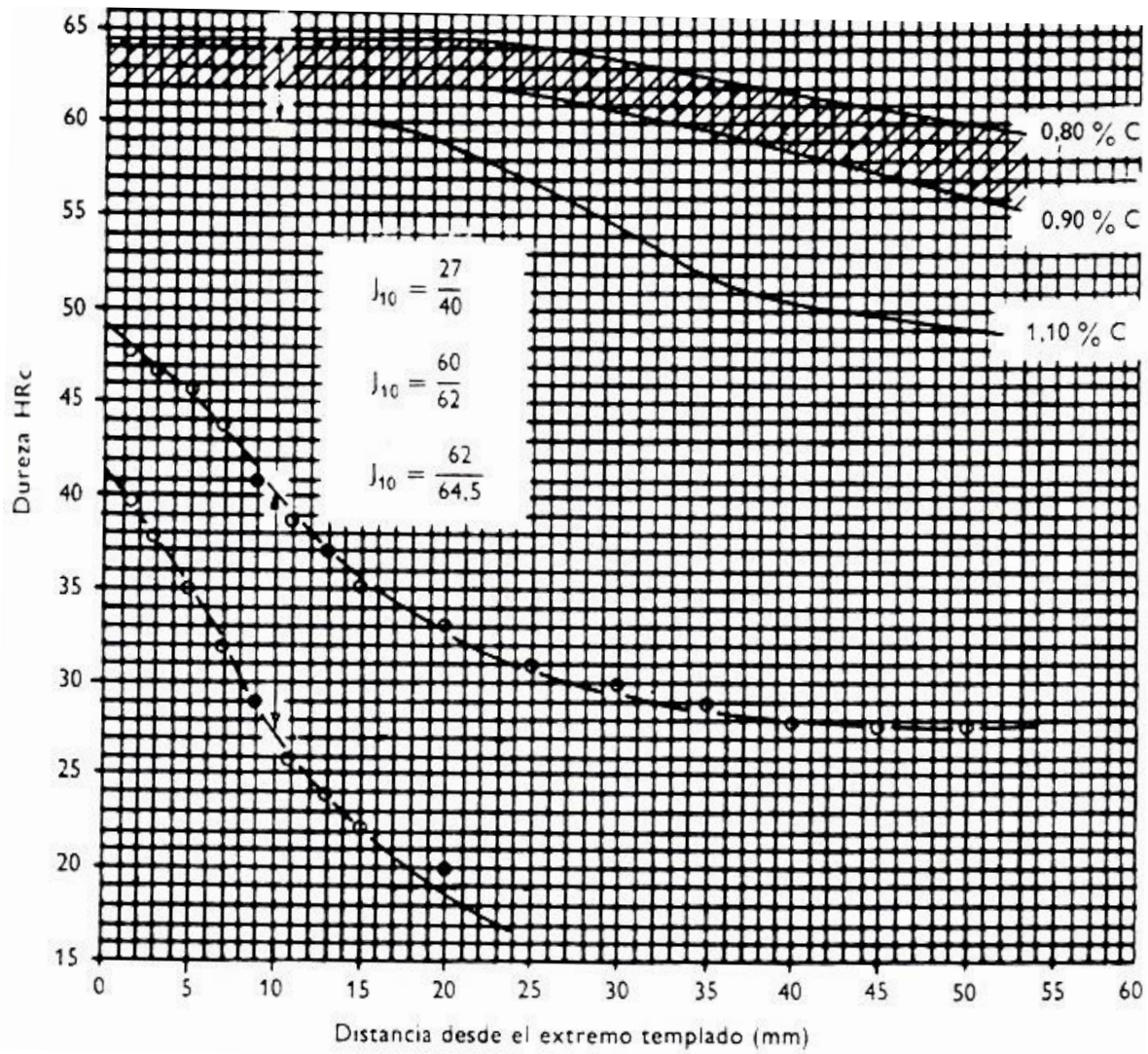


Fig. 1.8. Templabilidades de capa y de núcleo en un acero F-1550 (18 Cr Mo 4) de composición química 0.15 a 0.21 % de C, 0.60 a 0.90 % de Mn, 0.15 a 0.40 % de Si, \leq 0.035 % de P, \leq 0.035 % de S, 0.85 a 1.15 % de Cr y 0.15 a 0.25 % de Mo [12].

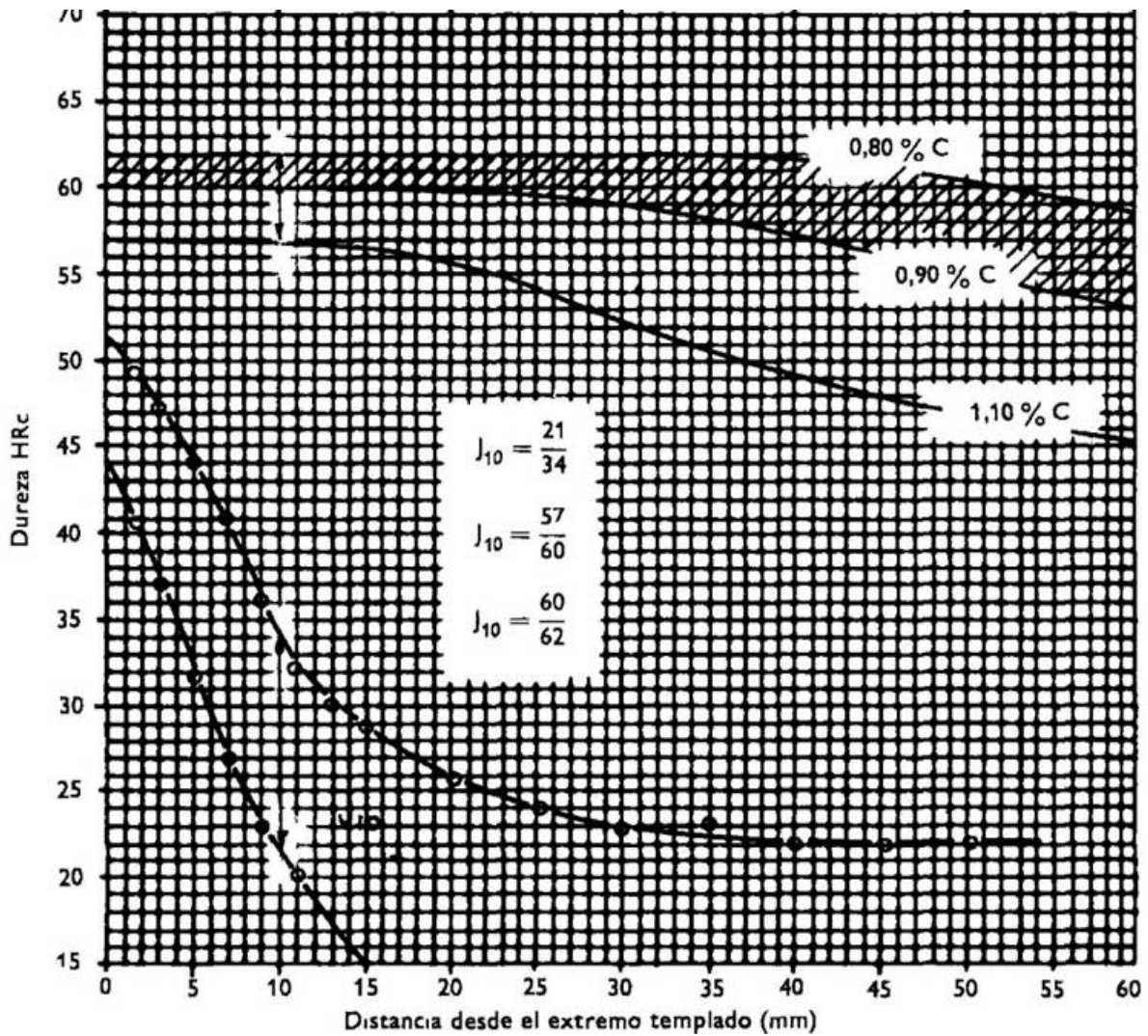


Fig. 1.9. Templabilidades de capa y de núcleo en un acero F-1522 (20 Ni Cr Mo 4) de composición química 0.15 a 0.21 % de C, 0.60 a 0.90 % de Mn, 0.15 a 0.40 % de Si, ≤ 0.035 % de P, ≤ 0.035 % de S, 0.85 a 1.15 % de Cr y 0.15 a 0.25 % de Mo [12].

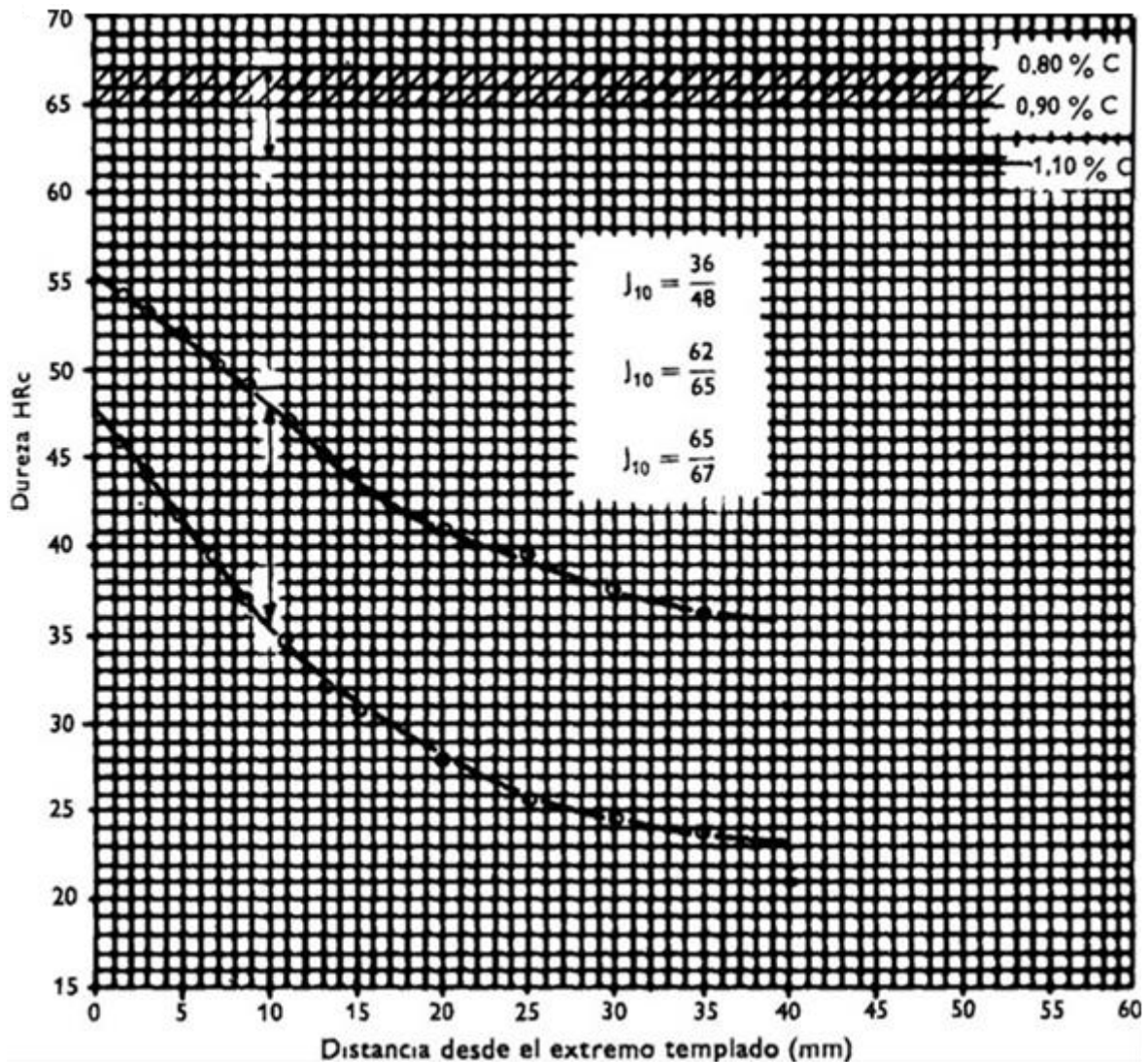


Fig. 1.10. Templabilidades de capa y de núcleo en un acero F-1525 (20 Ni Cr Mo 6) de composición química 0.18 a 0.23 % de C, 0.60 a 0.80 % de Mn, 0.15 a 0.40 % de Si, ≤ 0.035 % de P, ≤ 0.035 % de S, 0.40 a 0.60 % de Cr, 1.4 a 1.7 % de Ni, y 0.30 a 0.40 % de Mo [12].

1.1.4. SELECCIÓN DE LOS ACEROS PARA CEMENTACIÓN

Es muy difícil dar reglas generales para la selección de aceros destinados a la fabricación de piezas cementadas, ya que es un procedimiento extraordinariamente complejo, por ser muchas las variables que intervienen en el mismo; así, a continuación, en la Tabla 1.3 se presenta algunos criterios o sugerencias que pueden servir de base para su selección [3].

Tabla 1.3. Aceros que conviene emplear y métodos de enfriamiento recomendables para la fabricación de piezas cementadas [3].

Piezas a fabricar	Clase de acero	Tratamiento Térmico posterior
Piezas pequeñas de formas regulares, en las que no es probable que se presenten problemas de deformaciones, ni es de gran interés la resistencia ni tenacidad del núcleo.	Aceros al carbono	Temple en agua
Piezas de tamaño pequeño y mediano en las que se deben cuidar las deformaciones y en las que interesa buena tenacidad y resistencias en el núcleo desde 70 a 90 kg/mm ²	Aceros de media aleación	Temple en aceite o en agua
Piezas de cualquier tamaño en las que no se permiten deformaciones sensibles en el temple y en las que interesa buena tenacidad y alta resistencia en el núcleo desde 90 a 150 kg/mm ²	Aceros de alta aleación	Temple en aceite

1.1.5. CRECIMIENTO DEL GRANO DE LOS ACEROS EN EL PROCESO DE CEMENTACIÓN

Una de las características de calidad que con más frecuencia se exige a los aceros para cementación es su tamaño de grano, en la normalización se señala la exigencia de grano ASTM 5 o más fino para los aceros de grano fino y ASTM 5 o más grueso para los aceros de grano grueso. El grano del acero influye, como es bien conocido, en las propiedades mecánicas y fundamentalmente en las distorsiones y deformaciones que se producen como consecuencia del tratamiento. Conviene destacar, sin embargo, que se refiere casi siempre a un tamaño de grano potencial, el tamaño de grano austenítico, es decir, el grano de austenita que puede alcanzar el acero con un tratamiento determinado por encima de la temperatura de transformación. Este tamaño grano alcanzado depende de la temperatura y tiempo de mantenimiento y también de la distribución y cantidad de los elementos que convenientemente se adicionan al acero en el proceso de fabricación, tales como aluminio, titanio, vanadio entre otros [3].

La ley de crecimiento de grano, definida por la curva que expresa el tamaño de grano alcanzado para cada temperatura y tiempos de mantenimiento, es distinta e influenciada por estos factores, mientras que, para los aceros de grano grueso, éstos empiezan a crecer a una temperatura de unos 50 °C por encima de A_{c3} , denominada temperatura de sobrecalentamiento, en los aceros de grano fino, esta temperatura se sitúa entre 125 y 150 °C por encima de A_{c3} . Esquemáticamente, en la parte superior de

la Fig. 1.11a se presenta ambas leyes de crecimiento y en ellas se puede observar la importancia de la configuración de las curvas para cada caso. Inicialmente el tamaño de grano podría ser cualquiera; así, en los aceros de grano grueso, el crecimiento es continuo y constante en cuanto se rebasa la temperatura crítica Ac_3 ; en los aceros de grano fino tardan más en empezar el crecimiento, aunque, una vez rebasada la temperatura de sobrecalentamiento, es muy rápido su crecimiento [3].

Frecuentemente, el crecimiento del grano no se realiza de una manera uniforme, sino que, a una temperatura determinada, normalmente cerca de la temperatura de sobrecalentamiento, unos cuantos granos comienzan a crecer desproporcionadamente a expensas de otros, es un fenómeno de germinación y coalescencia semejante al que ocurre en la recristalización y aparecen consecuentemente granos finos y gruesos mezclados. En la parte inferior de la Fig. 1.11b se presenta esquemáticamente el crecimiento de grano. Así, una estructura que a temperaturas próximas a Ac_3 suelen tener un grano muy homogéneo, cuando se incrementa la temperatura, se presentan granos muy diversos que se llegan a diferenciar en dos y tres números ASTM y aún más si el fenómeno de crecimiento es completo. En estos casos, resulta difícil establecer un índice de tamaño de grano, conviene adoptar el criterio de tamaño de grano medio o mejor aún indicar el porcentaje de granos que han crecido por sobrecalentamiento respecto al inicial [3].

Aunque con los procedimientos actuales de la fabricación de acero el tamaño del grano oscila generalmente entre los números 6 y 8 de la clasificación ASTM, la tendencia a realizar los tratamientos de cementación a temperaturas altas por encima de $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, indudablemente, acorta el tiempo de cementación y mejoran los rendimientos en toneladas de las instalaciones, lo cual produce un serio problema para los fabricantes de acero en cuanto a las exigencias de tamaño de grano [5].

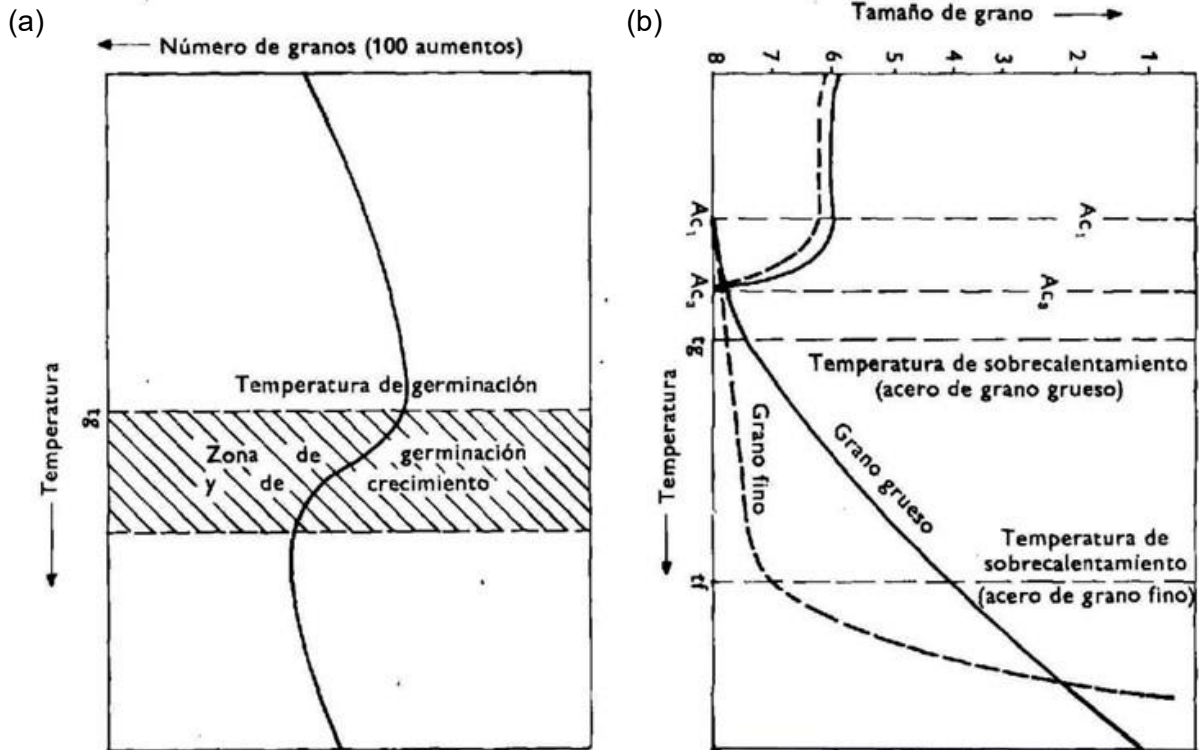


Fig. 1.11. Comparativa esquemática, crecimiento de granos en aceros: a) Crecimiento de grano en aceros de grano fino y grueso; y b) crecimiento de grano en aceros que presentan germinación [3].

Usualmente los aceros para cementación son para forja, esto no debe eliminar la posibilidad de que el propio proceso de forja, que supone ya un calentamiento a temperatura muy elevada y, por supuesto, muy por encima de la temperatura de sobrecalentamiento, tenga alguna influencia sobre la curva de crecimiento de grano, ya no sólo como simple consecuencia del calentamiento sino también por encima de las posibles variaciones sobre la solubilidad de los elementos que se añaden para impedir dicho crecimiento. Ensayos experimentales han demostrado que, al incrementar el trabajo de forja la susceptibilidad al sobrecalentamiento aumenta, tanto en aceros de grano grueso como en aceros de grano fino, aunque este efecto sea más acusado en los primeros. En la Fig. 1.12 se presenta resultados de laboratorio obtenidos sobre probetas de un acero al Cr-Mo de grano fino reducido por forja y para el cual se determinaron las curvas de crecimiento de grano [5].

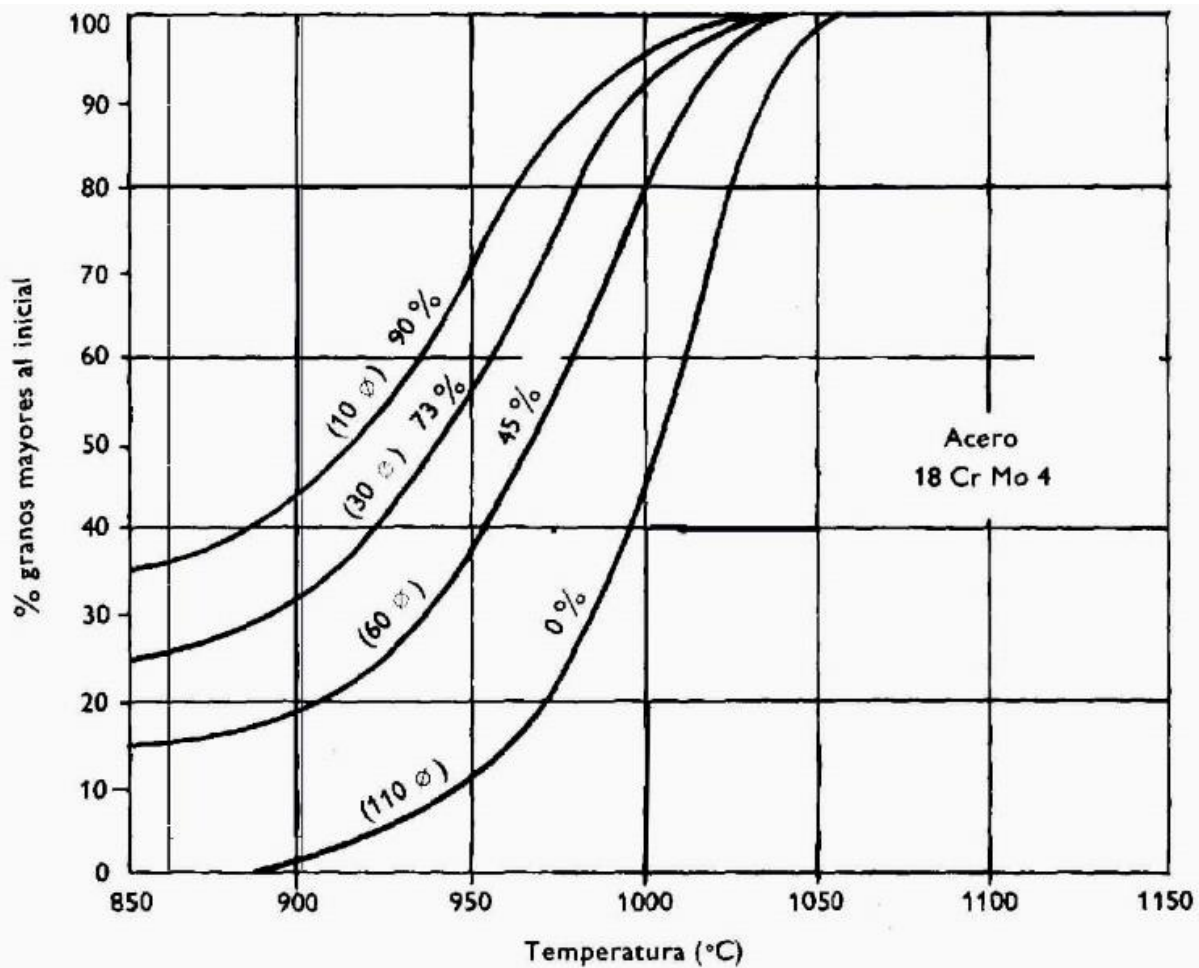


Fig. 1.12. Sobrecalentamiento de un acero 18Cr-4Mo, con distintas reducciones de forja [5].

1.1.6. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS CEMENTADOS

En estos tipos de aceros, las propiedades mecánicas tienen un carácter singular, puesto que, en definitiva, sólo les exige una resistencia y tenacidad de núcleo, como se ha indicado al principio, apropiadas para soportar las sollicitaciones de la pieza en servicio. En la práctica, el tratamiento térmico a que fue sometido el núcleo, que se puede separar de la capa cementada es un simple temple en aceite seguido de un revenido a baja temperatura (180 a 200 °C) para eliminar los esfuerzos residuales. Con tratamientos de recocido de ablandamiento para mejorar la maquinabilidad la propiedad exigible es la dureza máxima, a un valor, dentro de un amplio margen de magnitud, que ya figura en la norma correspondiente. Son exigibles, también, según norma, características mecánicas

de resistencia, límite elástico, alargamiento y resiliencia sobre probetas, preparadas según la norma y sometidas a un tratamiento de cementación simulada. Aunque no es lo correcto, es habitual realizar un temple en una rodaja y medir la dureza de la superficie y del núcleo [12].

La dureza superficial necesaria para obtener una buena resistencia al desgaste se consigue con relativa facilidad si el tratamiento de cementación es correcto y el potencial de carbono se regula y mantiene en el valor adecuado durante todo el tiempo del mismo. En la industria se dispone de instalaciones de cementación gaseosa convenientemente equipadas para lograrlo. Los aceros desarrollados para aprovechar al máximo las ventajas de una buena regulación del potencial de carbono que evita la sobre carburación y poder realizar el temple directo tienen como características su contenido de cromo limitado a 0.6 %. La disminución de templabilidad se compensa con la adición de molibdeno y de níquel. La austenita retenida causa disminución de la templabilidad de la capa. En la Fig. 1.13 se resume los valores máximos de dureza alcanzadas en la superficie para diferentes contenidos de carbono en distintos aceros, tomados a distancias 3-10 mm del extremo templado de probetas Jominy, que responden a velocidades de enfriamiento cercanas a las obtenidas en la práctica industrial. Para un contenido de carbono en superficie de 0.8 %C en todos los aceros se alcanzan 62 HRC, aunque disminuye marcadamente la dureza para 1.0 y 1.10 %C. Estos valores son significativos en cuanto que ellos pueden indicarnos en una composición determinada y para un contenido de carbono dado en la capa endurecida, la influencia que puede tener la formación y presencia de austenita retenida y el efecto de los carburos [12].

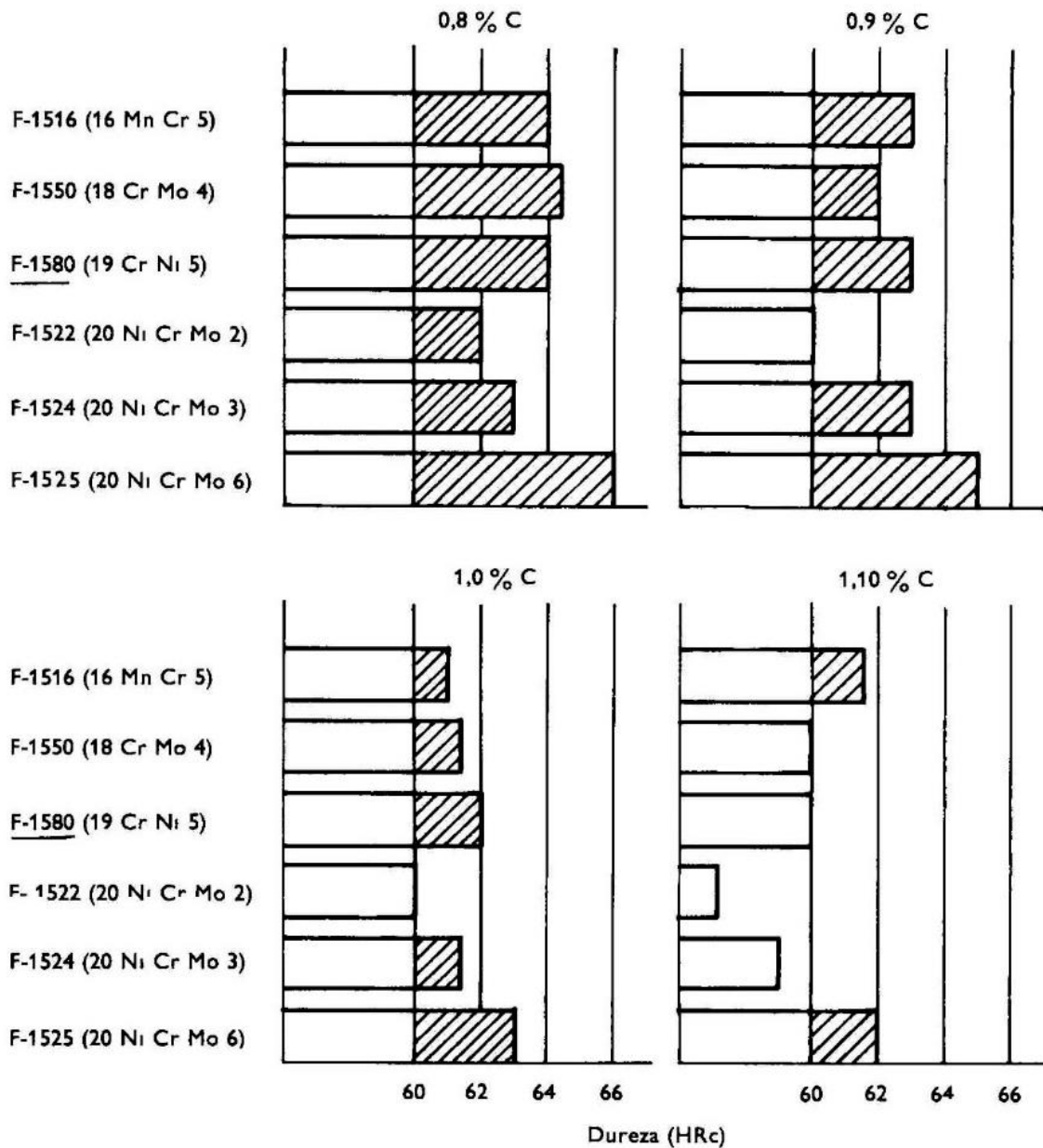


Fig. 1.13. Valores máximos de dureza alcanzada en la superficie para los diferentes contenidos de carbono, tomados a una distancia de 3 a 10 mm del extremo templado de la probeta [12].

1.1.7. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LOS ACEROS PARA CEMENTACIÓN

A continuación, se presentan los detalles más importantes que los elementos de aleación ejercen en los aceros para cementación.

La templabilidad de la parte periférica y del núcleo central de las piezas cementadas queda muy modificadas por la presencia de elementos de aleación, circunstancia que modifica notablemente las características mecánicas que con cada acero se pueden obtener [5].

En las Figs. 1.14 y 1.15 se presentan las curvas Jominy de diversos aceros de cementación, también las curvas Jominy que corresponden a las composiciones del acero de las capas cementadas. Observando estas curvas, se aprecian fácilmente diferencias importantes entre ellas y se comprende por qué unos aceros deben ser templados en agua y otros en aceite [5].

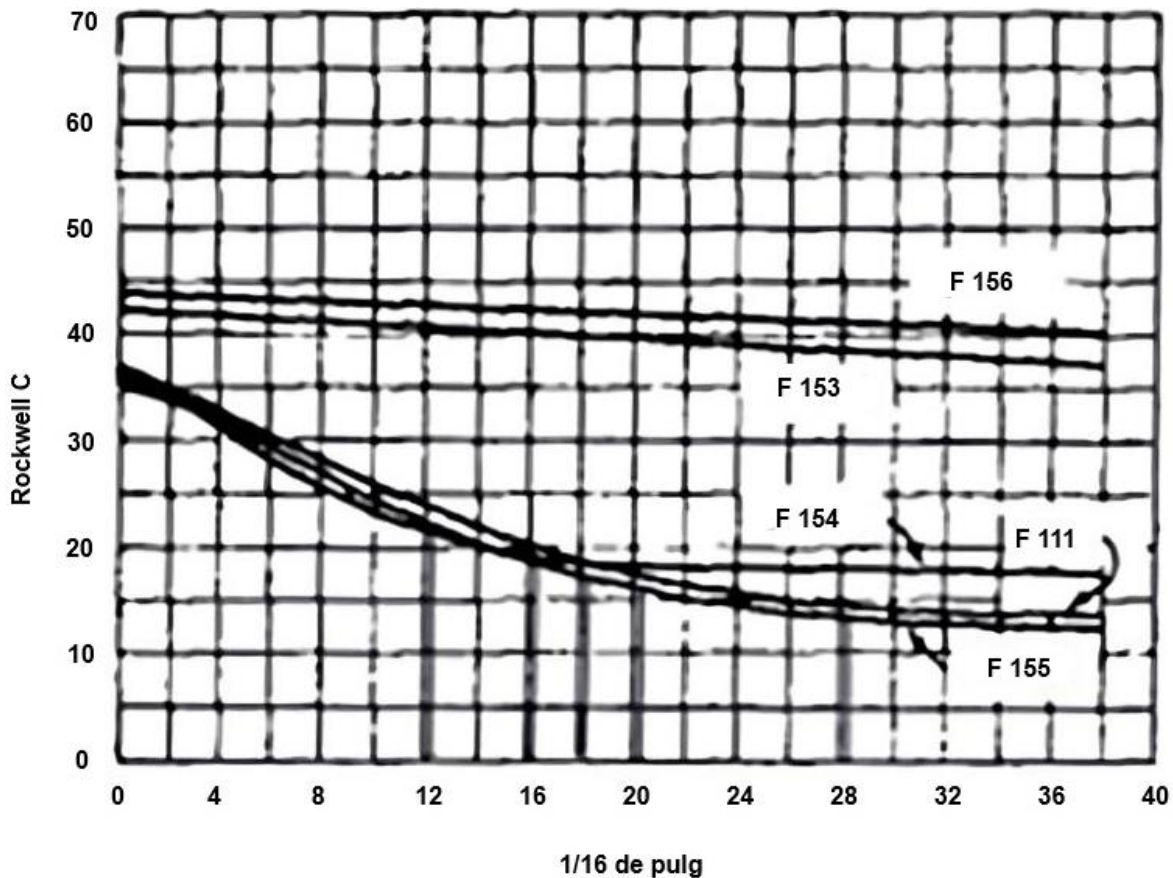


Fig. 1.14. Curvas Jominy de varios aceros de cementación de uso frecuente [5].

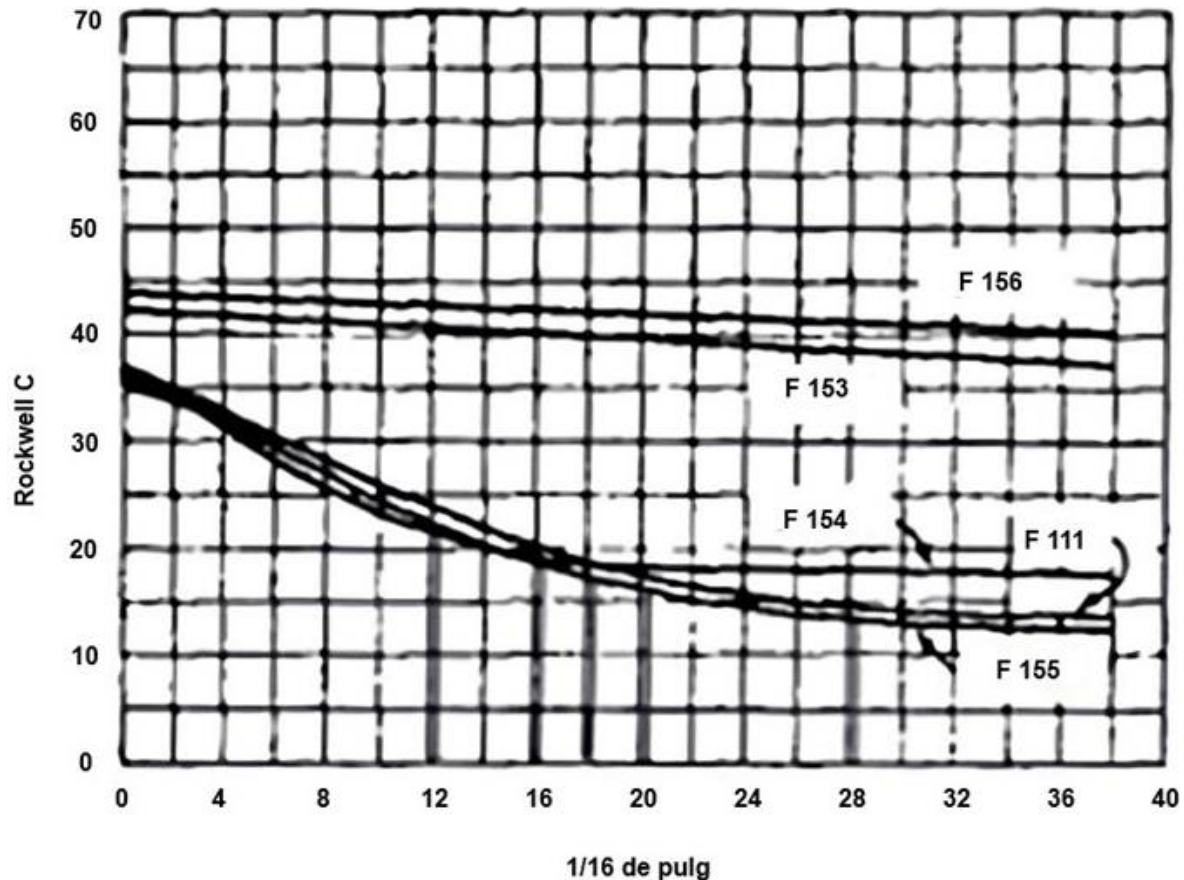


Fig. 1.15. Curvas Jominy correspondiente a varios aceros de cementación de uso más frecuente [5].

Los elementos de aleación también tienen una influencia bastante importante sobre las temperaturas críticas del material, tanto en lo que corresponde a la parte cementada, como a la zona sin cementar, y también, influyen en las temperaturas de tratamiento que se deben emplear en cada caso [5].

El níquel y el manganeso hacen descender los puntos críticos y el cromo y el molibdeno los elevan. En la Fig. 1.16 se señala las temperaturas de diversos aceros, por medio de las líneas AD, A'D', etc. [5].

La línea A'D' corresponde a los aceros de 5 % de Ni; la A''D'' a los aceros cromo-níquel y la A'''D''' a los aceros cromo molibdeno y cromo-vanadio con 1 % de Cr. Las temperaturas críticas de un acero al carbono de 0.12 % de C son: $Ac_1 = 732 \text{ }^\circ\text{C}$ y $Ac_3 = 870 \text{ }^\circ\text{C}$. Las de un acero cromo-níquel de 0.10 % de C, 0.60 % de Cr. y 3 % de Ni, son: $Ac_1 = 715 \text{ }^\circ\text{C}$ y $Ac_3 = 790 \text{ }^\circ\text{C}$, y las de un acero cromo-molibdeno de 0.12 % de C, 1 % de Cr y 0.20 % de Mo, son: $Ac_1 = 775 \text{ }^\circ\text{C}$ y $Ac_3 = 875 \text{ }^\circ\text{C}$ [5].

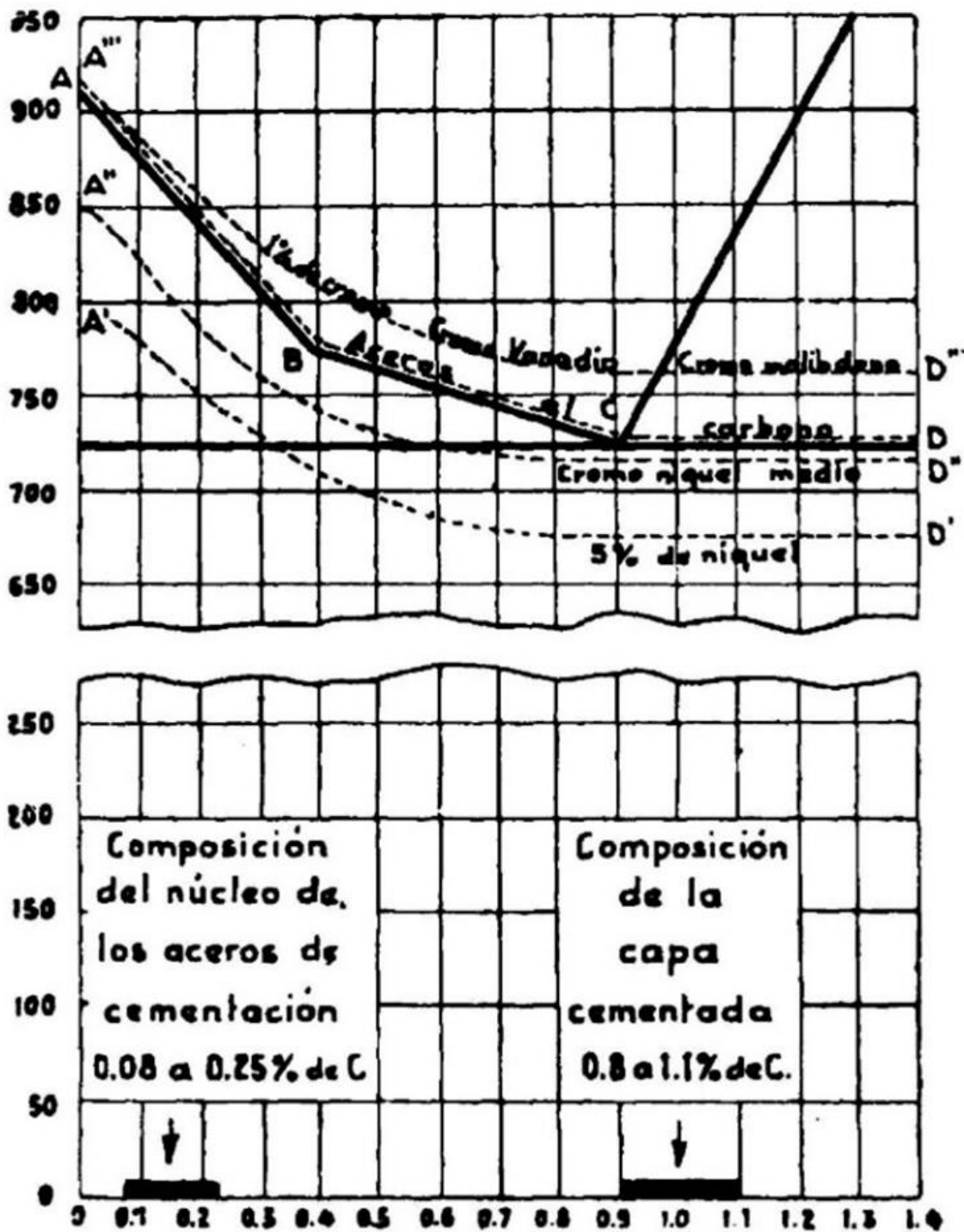


Fig. 1.16. Temperaturas críticas de diversos aceros al carbono y aleados [5].

Teniendo en consideración que la cementación se debe hacer a temperaturas superiores en 30 a 60 °C al punto A_{c3} , pues así el acero se encuentra en estado

austenítico, que disuelve con gran facilidad el carbono, las temperaturas de cementación serán:

- Acero al carbono..... 900 - 950 °C,
- Acero al cromo-níquel..... 850 - 900 °C, y
- Acero al cromo molibdeno..... 900 - 950 °C.

En los procesos antes mencionados esas temperaturas son:

Recocido de regeneración (pre o postratamiento térmico)

Acero al carbono

Temple de núcleo central, 890°.

Temple de la periferia, 780°.

Acero cromo-níquel

Temple del núcleo central, 825°.

Temple de la periferia, 760°.

Acero cromo-molibdeno

Temple del núcleo central, 890 °C.

Temple de la periferia, 825 °C [5].

La velocidad de penetración y la distribución del carbono en el interior del acero no se modifican muy sensiblemente por la presencia de elementos de aleación en el acero. Sin embargo, se observa que el Ni y el Si tienden a retardar esa penetración, y en cambio los elementos formadores de carburos, como el Cr, Mo y Mn, incrementan la misma.

A continuación, se indicará la influencia que ejercen aisladamente el Mn, Cr, Ni y Mo en los aceros para cementación [5].

El manganeso en general da lugar a aceros de grano grueso, aunque este problema se resuelve en parte, haciendo durante el proceso de fabricación del acero adiciones especiales generalmente de aluminio para conseguir afinar el grano. Además, el manganeso baja los puntos críticos de los aceros, por lo que el temple de los aceros

al manganeso se realiza a temperaturas más bajas que lo normal, lo cual tiene ciertas ventajas, porque evita descarburaciones y deformaciones. El manganeso mejora notablemente la maquinabilidad, por lo que a veces es posible templear en aceite piezas que con bajo contenido de manganeso sería necesario templabilidad en agua [5].

El níquel mejora la tenacidad y la resistencia de los aceros para cementación. Baja los puntos críticos y al poder utilizar (lo mismo que con los aceros al manganeso) temperaturas de tratamiento más bajas que lo normal, se disminuyen los peligros de formación de cascarilla, y de aparición de descarburaciones y deformaciones. El níquel tiende a retrasar la transformación de la austenita en martensita. Si en los tratamientos se calienta el acero a temperatura demasiado elevada, en la zona periférica de las piezas cementadas de aceros altos en níquel aparece austenita retenida y el material no queda tan duro como le corresponde a su composición. Empleando las temperaturas de temple correctas (más bajas que las que corresponden a otros aceros) se resuelve fácilmente este problema [5].

El cromo aumenta en la zona central de las piezas cementadas, la resistencia y la dureza que se obtiene después del temple, así como la dureza y resistencia al desgaste de la capa periférica. A veces estos aceros son de grano gruesos, frágiles y muy sensibles a pequeñas diferencias en las temperaturas de temple. Esas dificultades se pueden resolver lo mismo que en el caso de los aceros al manganeso, fabricando los aceros al cromo con grafito fino (adicionando aluminio en la cuchara de colada) [5].

En los primeros años de empleo de los aceros al cromo, estos problemas impidieron que se difundiera rápidamente su empleo, aunque posteriormente cuando se ha estudiado con detalle el tamaño de grano de los aceros y se ha llegado a regularlo, su empleo se ha extendido extraordinariamente [5].

El molibdeno mejora la templabilidad y la resistencia al desgaste. Además, mantiene endurecida la capa periférica a pesar de que durante el trabajo llegue por el roce a calentar la superficie de las piezas y se alcancen temperaturas relativamente elevadas [5].

Con la adición de níquel y cromo a la vez se ha conseguido en los aceros para cementación, alcanzar excelentes características mecánicas. El níquel da a los aceros gran tenacidad que precisamente les falta a los aceros al cromo y por otro lado imparte

gran dureza y resistencia al desgaste que no tiene los aceros al níquel. Ambos aumentan la templabilidad y la resistencia del núcleo. Añadiendo, además, molibdeno a los aceros al níquel se mejora notablemente su templabilidad y con los aceros cromo-níquel-molibdeno ha sido posible fabricar piezas cementadas de gran tamaño con resistencias y durezas muy elevadas” [5].

1.1.8. POSTRATAMIENTO AL TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO POR CEMENTACIÓN SÓLIDA

Para asegurar los altos requisitos que se requieren de los artículos cementados en las fábricas se emplea el control complejo de la calidad de los artículos y de los parámetros del proceso tecnológico. Se verifican los parámetros siguientes: el espesor de la capa, que se determina en la macro y microestructura o por la distribución de la dureza; en algunos casos para ejercer un control sin destrucción el espesor de la capa se determina en el aparato Briro-E, por penetración sucesiva del cono de diamante aplicando diferentes cargas; la dureza de la superficie que se determina según Rockwell (Vickers) después del temple y el revenido; la dureza Rockwell del núcleo, la microestructura de la capa cementada; la apreciación sobre la admisibilidad de la estructura se efectúa de acuerdo con la escala graduada aceptada en la empresa dada para tal o cual pieza; el contenido de carbono en la capa a una profundidad de 0.1 a 0.2 mm.

Dentro del templado se sabe que dicho tratamiento térmico endurece casi todos los aceros y que a su vez se acompaña con un revenido para incrementar la tenacidad del metal. A medida que se aplica el proceso de templado se produce una gran expansión de volumen en el acero cuando se forma martensita a partir de austenita. A medida que se forman placas de martensita durante el templado las placas aíslan y rodean pequeños depósitos de austenita que se deforman para dar espacio a la martensita de menor densidad [13].

La martensita se ablanda y se hace más dúctil durante el revenido, tal como se presenta en la Fig. 1.17. Así, debido a que la martensita fuerte se resiste a la transformación, la martensita existente se agrieta o permanecer atrapada en la estructura

como austenita retenida, lo cual puede ser un problema serio [13]. En la Fig. 1.18 se presenta como se ve la austenita retenida en agujas de martensita.

Después del revenido, la austenita retenida se enfría por debajo de las temperaturas M_s y M_f , como se presenta en la Fig. 1.19, y se transforma en martensita dado que la martensita revenida se puede deformar. Es posible que se necesite un segundo paso de revenido para eliminar la martensita formada de la austenita retenida que genera más de un problema para los aceros al alto carbono [13].

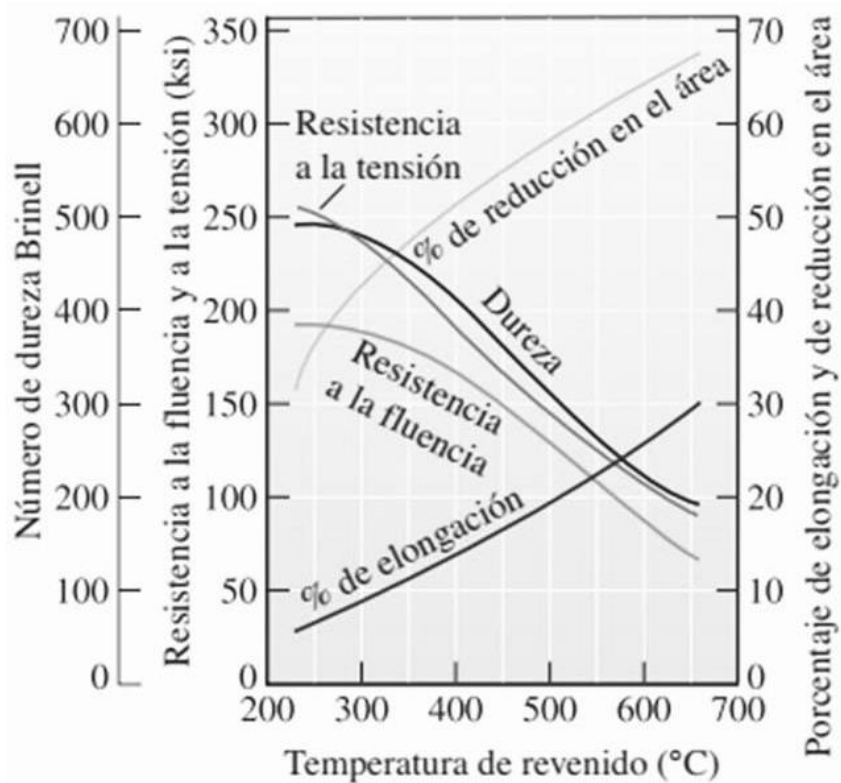


Fig. 1.17. Efecto de la temperatura de revenido en las propiedades mecánicas de un acero SAE 1050.



Fig. 1.18. Austenita retenida (blanca) atrapada entre agujas de martensita (negra).

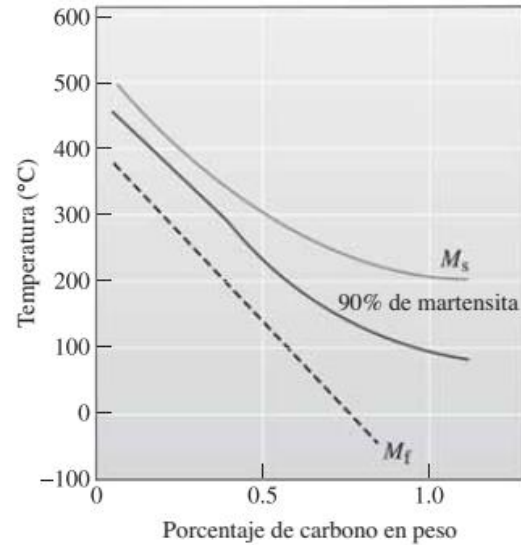


Fig. 1.19. Cuando se incrementa el carbono se reducen las temperaturas M_s y M_f en aceros al bajo carbono.

Dado un proceso de temple los esfuerzos residuales también se producen por el cambio de volumen o por el trabajo en frío. Los esfuerzos también son inducidos por la expansión y contracción térmicas. Cuando los aceros se templean, la superficie del acero templado se enfría rápidamente y se transforma en martensita. Cuando la austenita del centro se transforma después, la superficie dura se somete a tensión en tanto que el centro se comprime. Si los esfuerzos residuales rebasan la resistencia a la fluencia, se forman grietas por templeado en la superficie. Para evitar este defecto primero se puede enfriar a apenas arriba de M_s y mantener así hasta que la temperatura del acero se iguale. Este tratamiento térmico se denomina templeado arriba de M_s o temple martensítico ininterrumpido.

Dentro del carburizado se entiende previamente como una técnica de difusión controlada de carbono en un acero determinado. Para otorgar una mejor tenacidad es necesario iniciar con un acero bajo en carbono. Cuando este mismo acero es templeado y revenido, la superficie se convierte en martensita revenida al alto carbono en tanto que el centro ferrítico continúa blando y dúctil. El grosor de la superficie endurecida llamada profundidad de cementado es mucho menor en aceros carburizados que en aceros endurecidos por flama o inducción. En la Fig. 1.20 se presenta mejor esta descripción.

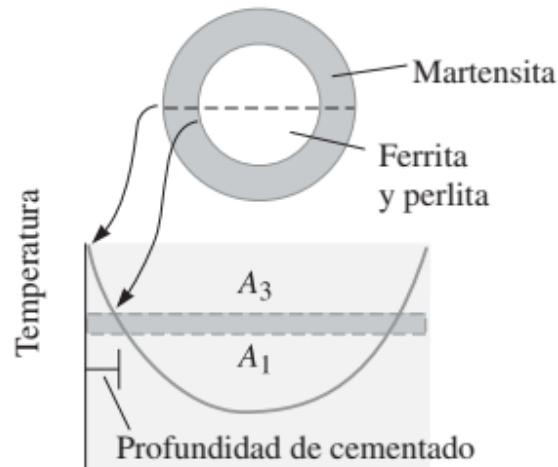


Fig. 1.20. Sólo la superficie del acero se calienta por encima de la temperatura A_1 y es templada para producir martensita.

1.2. PROPIEDADES DE LAS CAPAS CEMENTADAS

La cementación y el tratamiento químico ulterior tienen como finalidad dar a la capa cementada superficial una alta dureza y resistencia al desgaste, además de elevar el límite de resistencia al contacto y el límite de fatiga durante la flexión, conservando dúctil el núcleo [4].

1.2.1. CAPA CEMENTADA

Se da el nombre de capa cementada a la zona que después de la cementación queda con un contenido de carbono superior a la del acero. Generalmente recibe el nombre de capa dura la zona superficial que después del último tratamiento queda con una dureza superior a 700 Vickers, y que suele corresponder a la zona cuyo porcentaje de carbono es superior a 0.50 % de C [3].

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

- 1) Capas delgadas con menos de 0.50 mm de espesor de cementación. Estas profundidades de cementación se utilizan para pequeñas piezas de acero al carbono,

endurecidas generalmente con sales de cianuro y templadas directamente desde la temperatura de cementación. Estas piezas se deben utilizar siempre sin rectificado posterior [3].

- 2) Capas medias de 0.50 a 1.50 mm. Estos espesores son los más corrientes para la mayoría de las piezas que se utilizan en la fabricación de máquinas y motores. Se pueden obtener empleando cementantes sólidos, líquidos o gaseosos, con aceros al carbono, débilmente aleados o de alta aleación [3].
- 3) Capas de gran espesor, superiores a 1.50 mm. Son obtenidas generalmente por cementación con materias sólidas y con cementantes gaseosos y algunas veces, aunque más raramente, con cementantes líquidos. Las chapas de blindaje, que se suelen fabricar con capas cementadas superiores a 3 mm suelen ser cementadas con gases [3].

Cualquiera que sea el proceso que se emplee, no conviene en general que el contenido en carbono de la capa cementada pase de 1% y se debe procurar que la parte periférica después de rectificada quede entre 0.80% a 0.90 % de C, con lo que se obtienen en el temple durezas de 62 a 65 Rockwell-C (ver Fig. 2.21). Siempre conviene obtener durezas superiores a 60 Rockwell-C, que es aproximadamente el límite de dureza en que la lima ya no marca el acero [3].

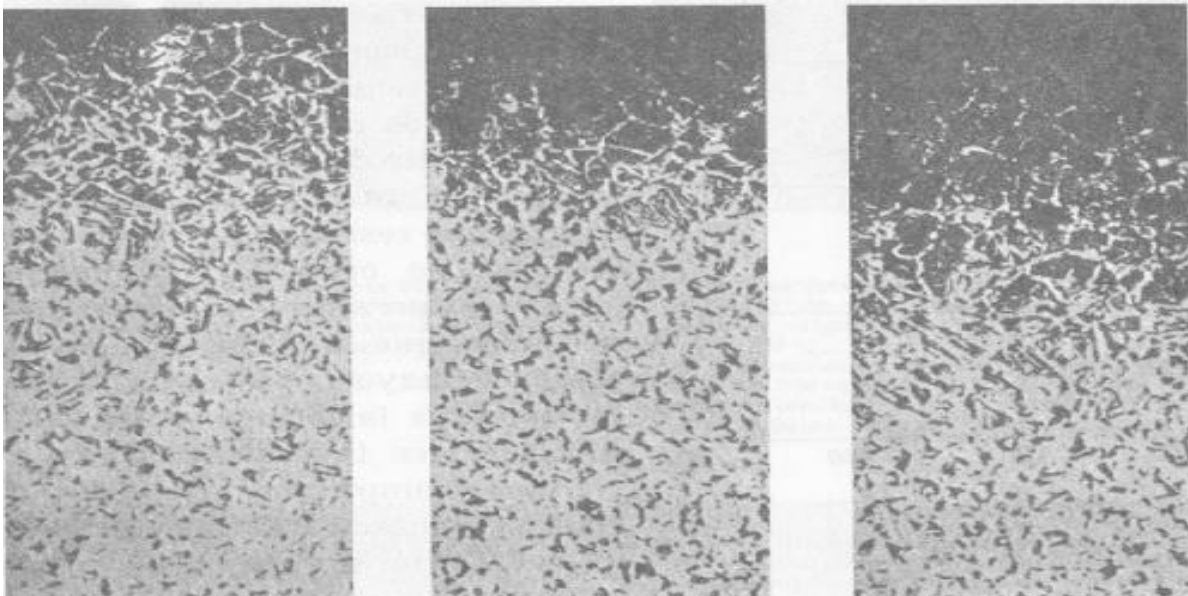


Fig. 1.21. Diferentes espesores de capa cementada correspondientes a un acero al carbono de 0.11 % de C [3].

Cuando el contenido en carbono de la zona periférica es superior a la composición eutectoide de 0.90 % de C, suelen aparecer redes de cementita o de carburos muy marcadas que pueden hacer frágil a la capa cementada y con tendencia a descascarillarse. En estos casos conviene dar a las piezas después de la cementación un recocido de difusión entre 800 – 900 °C en una atmósfera o baño apropiado para disminuir el porcentaje de carbono de la periferia. Con este tratamiento se uniformiza bastante el contenido de carbono de la capa periférica y se evitan posibles descascaramientos en las piezas cementadas [3].

1.2.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA CAPA CEMENTADA

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

Se consideran durezas muy buenas las mayores de 63 Rockwell-C; buenas las comprendidas entre 62 y 63 Rockwell-C y aceptables entre 60 y 62 Rockwell-C (ver Fig. 1.22) [3].

En piezas pequeñas, estas durezas se consiguen de igual manera con los aceros al carbono (templados en agua) que con aceros aleados (templados en aceite), siendo ventajosa la utilización de estos últimos, porque al templar en aceite disminuyen las deformaciones y se obtiene una gran uniformidad en los resultados. Con los aceros aleados con cromo y molibdeno se obtienen durezas ligeramente superiores a las que se consiguen con otros aceros y mayor resistencia al desgaste, debido a la formación de carburos complejos en la zona periférica [3].

Para comprobar la dureza de la capa cementada, además de las máquinas de dureza Rockwell y Vickers, es muy útil el uso de la lima. Una lima fina y nueva puede servir para distinguir las piezas que tienen una dureza inferior a 60 Rockwell, que son rayadas con la lima, de las de mayor dureza que no son rayadas [3].

En algunas ocasiones, no muy frecuentes, no se llega a alcanzar en el temple de las piezas cementadas la dureza conveniente, debido a que en el calentamiento realizado para templar las piezas se descarburan la capa periférica y entonces la zona superficial queda con dureza baja (ver Fig. 1.23) [3].

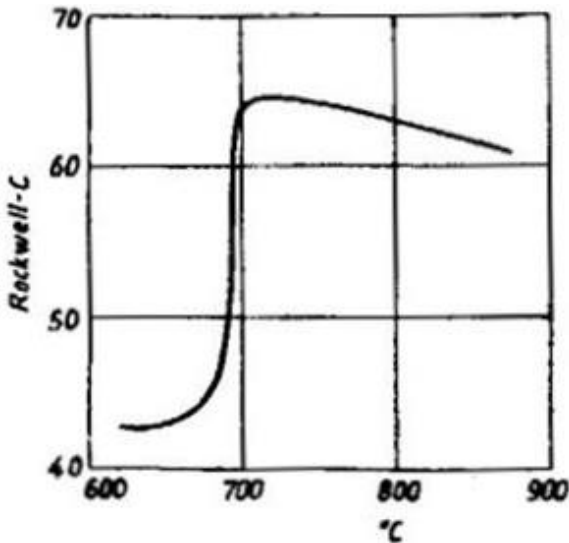


Fig. 1.22. Influencia de la temperatura de temple en la dureza de la capa cementada de un acero de cementación cromo-níquel de la composición siguiente: 0.08 % de C, 0.76 % de Cr, y 3.10 % de Ni [3].

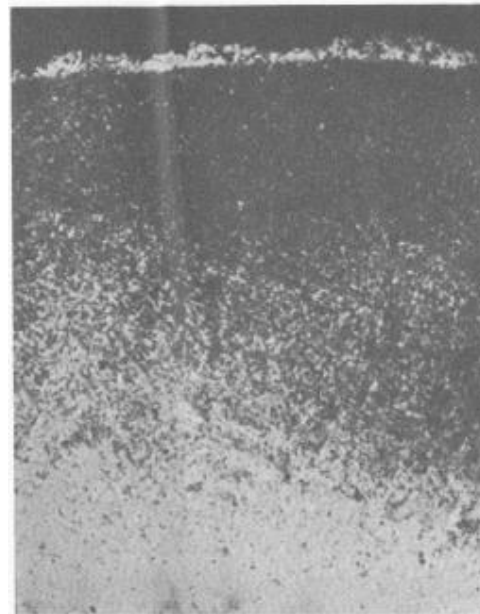


Fig. 1.23. Capa exterior descarburada (de color blanco) de una pieza de acero cementada que se ha descarburado durante el calentamiento que se le ha dado para realizar el temple [3].

También suele ocurrir, en los aceros de alta aleación cromo-níquel o cromo-molibdeno, que después del temple de las piezas cementadas se obtienen durezas relativamente bajas de 60 a 61 Rockwell-C, inferiores a las que normalmente interesa obtener (62 a 65 Rockwell-C) e inferiores también a las que se suelen obtener sin dificultad cuando esas piezas se fabrican con aceros de cementación al carbono o de baja aleación. Esta baja dureza ocurre debido a la presencia de austenita retenida en la capa cementada como consecuencia del empleo de temperaturas de temple demasiado elevadas (ver Figs. 1.24 y 1.25). Al realizar el temple desde una temperatura demasiado elevada (850 °C) aparece en la periferia, austenita retenida (blanca) y grandes agujas negras de martensita [3].



Fig. 1.24. Capa periférica de una pieza cementada y templada de un acero cromo-níquel de la composición siguiente: C = 0.09%, Cr = 0.81% y Ni = 3.10% [3].



Fig. 1.25. Agujas de martensita sobre un fondo blanco de austenita retenida, correspondientes a la zona periférica del acero de la Fig. 1.24.

En estos casos, la presencia de un elevado porcentaje de níquel en un acero de alto porcentaje de carbono y el empleo de altas temperaturas de temple, bajan las temperaturas correspondientes al comienzo y al fin de las transformaciones de austenita en martensita. Para solucionarlo, se debe templar a temperaturas inferiores a las que dieron durezas bajas. El problema se presenta también en parte porque al ser temperaturas de temple de la capa cementada de estos aceros relativamente bajas, 740 a 770 °C, inferiores a las que normalmente se emplean para los demás aceros de cementación, hay una tendencia natural en todos los talleres a emplear temperaturas de temple demasiado altas [3].

1.2.3. MEDIDA DEL ESPESOR DE LA CAPA CEMENTADA Y DE LA CAPA DURA

Para conocer la penetración del carbono en los procesos de cementación, se pueden emplear varios procedimientos. El más sencillo consiste en cementar junto con las piezas, dos o tres varillas, del mismo material, de 6 a 12 mm de diámetro. Después de cementadas se templen a 800 °C en agua y se rompen, se puede observar en la fractura una capa periférica dura, que presenta un grano mucho más fino que el núcleo central y que señala con bastante aproximación la penetración del carbono. Al mismo tiempo se puede conocer si ha crecido o no el grano del núcleo central durante la cementación [3].

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

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

El análisis químico da también una idea muy exacta de la operación. Para realizarlo, conviene utilizar unos cilindros del acero que se quiere estudiar, de 15 a 20 mm de diámetro y 100 a 200 mm de longitud, que después de cementados con el resto de las piezas son torneados con ligeras pasadas de 1/10 de mm. Recogiendo y analizando la viruta de cada uno de los escalones, se conoce perfectamente la distribución del carbono en el acero [3].

Un método para determinar el espesor de la capa dura es el microscopio. Se cortan transversalmente las piezas a ensayar y se hacen ensayos de micro dureza (ver Figs. 1.26 y 1.27), observando a partir de qué punto la dureza del material es inferior a 700 o

750 Vickers, por ejemplo. En los ensayos de micro dureza se suelen emplear cargas variables de 10 a 150 g [3].

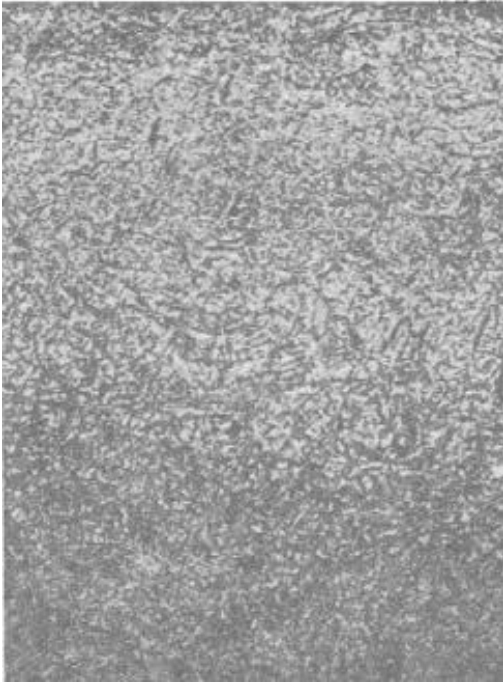


Fig. 1.26. Ensayo de micro dureza Vickers en la sección transversal de un acero cementado y templado. Se hicieron 7 huellas Vickers, algunas de las cuales son difíciles de observar a 100x [3].

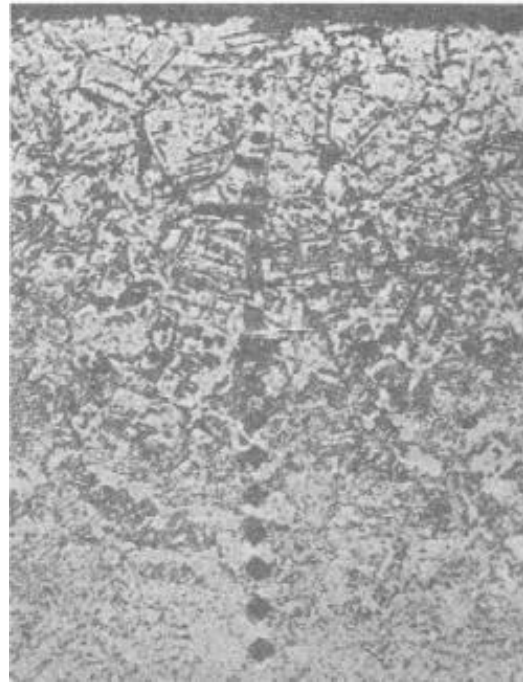


Fig. 1.27. Ensayo de micro dureza Vickers en la sección transversal de un acero cementado y templado [3].

1.3. CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA DE LAS PIEZAS CEMENTADAS

La caracterización metalográfica es un conjunto de técnicas y métodos utilizados para analizar y estudiar la microestructura, la composición y las propiedades de los materiales metálicos y sus aleaciones a nivel microscópico. Esta caracterización es esencial para comprender cómo se forman, procesan y comportan los materiales en diferentes condiciones y cómo estas propiedades afectan su rendimiento en diversas aplicaciones.

La microestructura se refiere a la disposición y configuración de los granos, fases y otras características microscópicas presentes en un material. La caracterización metalográfica permite obtener información detallada sobre la estructura cristalina, los

tamaños de grano, las fases presentes, las inclusiones, las porosidades y otros aspectos microscópicos que influyen en las propiedades mecánicas, térmicas y químicas de los materiales.

Para realizar una caracterización metalográfica se tienen los métodos siguientes:

Microscopía Óptica (MO): La microscopía óptica es un método inicial para examinar las muestras. Permite la observación de la estructura y la distribución de fases en la superficie cementada. Las imágenes obtenidas a través de MO pueden ayudar a identificar inclusiones, porosidades y características microestructurales generales.

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM): El SEM proporciona imágenes de alta resolución de la superficie de la muestra. Además, se puede utilizar para analizar la morfología de las capas cementadas, así como para obtener información sobre la topografía y la composición elemental a través de microanálisis por dispersión de energía de rayos X (EDS).

Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM): La TEM es útil para observar la microestructura interna de las capas cementadas a nivel nanométrico. Puede revelar detalles sobre la disposición de átomos y defectos cristalinos.

Difracción de Rayos X (XRD): La XRD se utiliza para analizar la composición cristalina de las capas cementadas y determinar la presencia de nuevas fases o cambios en la estructura cristalina debido al proceso de cementación.

Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS): La EDS se utiliza en conjunción con el SEM para analizar la composición química de las diferentes regiones en la muestra, lo que puede proporcionar información sobre la difusión de elementos durante la cementación.

Análisis de Dureza: La medición de la dureza a lo largo de la profundidad de las capas cementadas puede proporcionar información sobre la eficacia de la cementación y la posible formación de gradientes de dureza.

Análisis de Microdureza: La microdureza se utiliza para evaluar las diferencias locales en la dureza de las capas cementadas y la matriz base.

Análisis de Inclusiones y Porosidad: La observación de inclusiones y porosidad en las capas cementadas es importante para evaluar la calidad y la integridad del proceso de cementación.

Análisis de Fases y Estructuras: Utiliza técnicas como la difracción de electrones retrodispersados (EBSD) para analizar la orientación cristalina, la textura y la presencia de fases específicas.

Las fases presentes en todo el proceso de cementación son las siguientes:

Austenita: Es el nombre dado a la solución sólida intersticial de carbono disuelto en hierro como se puede observar su forma en la Fig. 1.28. La máxima solubilidad es del 2 % de C a 2065 °F. Generalmente no es estable a temperatura ambiente [10].

Perlita: Es una mezcla eutectoide que contiene 0.8 % de C y se forma a 1333 °F a un enfriamiento muy lento. Es una mezcla muy fina, tipo placa o laminar de ferrita y cementita como se presenta en la Fig. 1.29 [10].

Martensita: Es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. La martensita es conocida por su dureza excepcional y su capacidad para aumentar la resistencia de un material, se puede observar su forma en la Fig. 1.30. Sin embargo, también es bastante frágil y puede tener una baja tenacidad, lo que significa que es propensa a la fractura repentina en lugar de la deformación plástica gradual [10].



Fig. 1.28. Microestructura austenita [10].

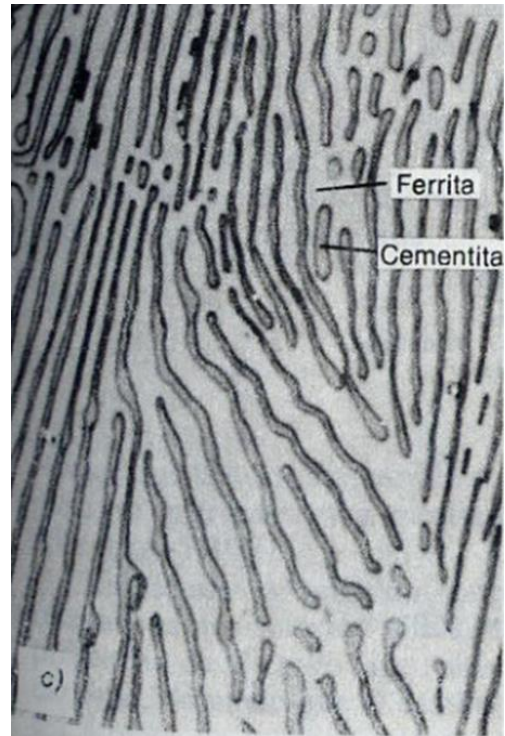


Fig. 1.29. Microestructura perlita [10].



Fig. 1.30. Microestructura martensita [10].

Para el proceso de la cementación, el aumento de la temperatura permite la formación de austenita, de esta forma se permite la difusión del carbón en el acero de forma gradual desde la superficie hasta las partes internas, creando una capa rica en contenido de carbono, al terminar el proceso este se deja enfriar de manera lenta lo que causa la formación de perlita en la superficie del acero. Luego para el postratamiento de temple se vuelve a elevar la temperatura del material lo que hace que se genere austenita y al enfriarse de manera brusca genera martensita, lo que le da a la superficie del material una dureza elevada que es lo que se busca con el proceso termoquímico de la cementación [10].

1.4. DESGASTE DE LAS CAPAS CEMENTADAS

Siempre que haya un movimiento relativo entre dos sólidos que soportan carga, existe una situación potencial de desgaste, dicho movimiento se puede considerar unidireccional o de vaivén, ya sea deslizante o de rodamiento. Para el caso de estos dos últimos, también se puede dar una combinación de estos o el desgaste se puede dar debido a un movimiento oscilatorio de pequeñas amplitudes [6].

Para comprender el desgaste, es necesario el estudio de la topografía y la naturaleza de las superficies. Es por ello por lo que el grado de deformación superficial y

subsuperficial de los sólidos representa una parte fundamental en el mecanismo de fricción y desgaste, por lo que, al analizar la naturaleza y cantidad de desgaste de dos superficies en contacto, se deben estudiar los esfuerzos de contacto y los tipos de movimiento [6].

Junto al concepto de desgaste, es importante definir el concepto de fricción, el cual se define cómo la resistencia al movimiento que se produce cuando dos objetos sólidos que se encuentran en contacto son puestos en movimiento relativo uno con respecto del otro [6].

1.4.1. TIPOS DE DESGASTE

Un metal puede ser sometido a un movimiento relativo ya sea con un cuerpo sólido o no sólido, así como también puede existir interacción entre metal y líquidos (agua o aceites lubricantes). Los tipos de desgaste se clasifican según la naturaleza del movimiento o los medios involucrados en una interacción de metales bajo carga. Según el último criterio, la clasificación del tipo de desgaste es la siguiente:

- a) Metal contra metal,
- b) Metal contra sólido no-metálico, y
- c) Metal contra fluido.

No obstante, debido a que la naturaleza de las superficies en contacto puede cambiar de manera inesperada, y lo que antes era metal contra metal se puede volver metal contra no-metal, o bien una lubricación que en un principio era adecuada podría fallar posteriormente; la clasificación anterior pierde validez al aplicarla en situaciones reales. Por lo tanto, se prefiere clasificar al desgaste en virtud de la naturaleza del movimiento o de los medios que intervienen en una interacción de metales bajo carga. Los tipos principales de desgaste son: por adhesión, por abrasión, por erosión, por cavitación y por vibración [6].

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. El material desprendido tiene forma de partículas pequeñas que normalmente se transfieren a la otra superficie o se encuentran como partículas sueltas fuera de dicha superficie. 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 [6].

El desgaste por abrasión tiene lugar siempre que estén presentes partículas extrañas duras entre las superficies en contacto. Las partículas abrasivas se incrustan en una de las superficies y actúan como herramienta de corte, removiendo material de la otra superficie. Estas partículas pueden proceder del ambiente (arena y/o polvo) o como consecuencia del desgaste por adhesión y/o por un proceso de corrosión [6].

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. La pérdida de material puede ser significativa, provocando roturas por fatiga. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula con respecto a la superficie [6].

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 [6].

El desgaste por cavitación se origina en superficies entre las que existe fluido, el cual da origen a la formación de burbujas de vapor cuando éste llega a una presión menor que la presión de vapor. Estas burbujas son transportadas por el fluido hasta una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de forma súbita aplastándose bruscamente las burbujas. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una de las superficies cuando cambian de estado se producen presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras en dicha superficie [6].

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 desbaste 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 [6].

1.4.2. TOPOGRAFÍA DE LAS SUPERFICIES

Con el propósito de comprender la interacción entre las superficies de las partes móviles de una maquinaria, es importante conocer la naturaleza original de dichas superficies. Para ello es necesario conocer aspectos importantes como si éstas se encuentran libres de contaminantes u óxidos y si es mecánicamente suave. Aunque lo más importante que se tiene que comprender sobre los mecanismos de fricción y desgaste es conocer que no existe una superficie perfectamente plana a escala microscópica [6].

Mediante los métodos conocidos de preparación de superficies como maquinado, pulido, cepillado, entre otros; no se puede llegar a obtener una superficie perfectamente lisa, ya que éstas presentan asperezas, es decir ondulaciones en forma de colinas y valles. En la Fig. 1.31 se presenta diferentes tipos de asperezas de una superficie, en el caso de la Fig. 1.31a se presenta una superficie perfectamente lisa, para el caso de las Fig. 1.31b-e todas las protuberancias poseen la misma profundidad, aunque la longitud de onda es macrogeométrica como en la Fig. 1.31b; por lo tanto, esta superficie se define como lisa, pero no plana. La longitud de onda también puede ser microgeométrica, como en el caso de la Fig. 1.31e la longitud de onda es corta o microgeométrica, a esta superficie se le define plana pero rugosa. En las Figs. 1.31c-d se presentan superficies cuya rugosidad están entre la Fig. 1.31b y d [6].

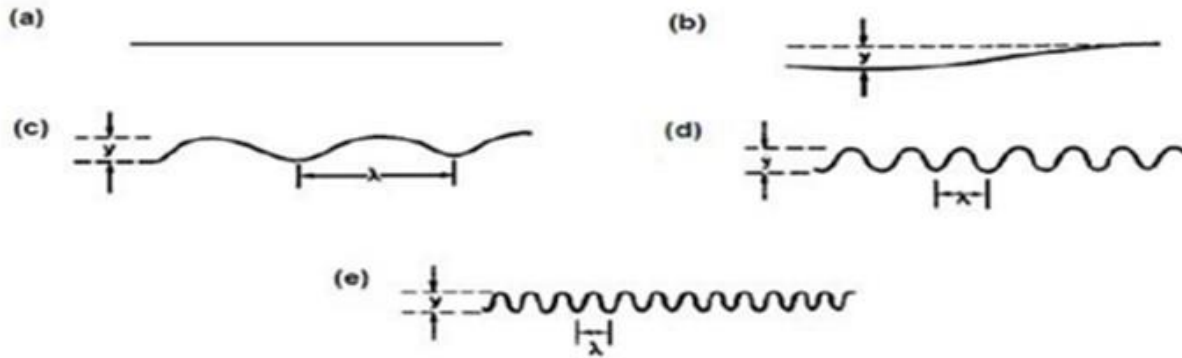


Fig. 1.31. Diferentes tipos de asperezas de una superficie que presenta la misma altura entre cresta y valles, con diferentes longitudes de onda: a) Superficie lisa; b) superficie lisa pero no plana; c) superficie plana rugosa; d) superficie plana rugosa de longitud de onda macrogeométrica; y e) superficie plana rugosa de longitud microgeométrica [6].

1.4.3. CONTACTO DE SÓLIDOS

Si se presiona una superficie sobre otra, la carga se soporta por los bordes de unas cuantas crestas en la superficie inferior, suponiendo que el miembro superior del par metálico sea perfectamente plano. Así pues, existe un área de contacto aparente en la intercara de ambas superficies, aunque en las puntas de las asperezas el área real de contacto sólo es de unos cuantos puntos [6].

Si se considera que un cuerpo hemisférico duro se desliza sobre una superficie blanda y lisa bajo la acción de una carga (F) como se presenta en la Fig. 1.32, y se supone que la espiga y la superficie son perfectamente lisas, entonces se puede demostrar que el área real de contacto es proporcional a la raíz cúbica de la carga al cuadrado si el contacto es de naturaleza elástica (ver Ec. 1.6), esto significa que la carga es baja y ninguno de los dos materiales alcanza el esfuerzo de fluencia [6].

$$A_e = \pi \left[\frac{3Fr}{4E} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (1.6)$$

donde: F es la carga normal aplicada en N,
 r es el radio de la curvatura en mm,
 E es el módulo de Young en MPa, y

A_e es el área de contacto elástico en mm^2 .

Sin embargo, las superficies ingenieriles, nunca son perfectamente lisas ya que además de tener asperezas, éstas a su vez estarán cubiertas de micro asperezas tal como se presenta en la Fig. 1.33. Archard demostró que el área real de contacto elástico es casi proporcional a la carga cuando en el análisis se consideran las asperezas y se toma en consideración su rugosidad (micro asperezas) [7].

Dejando de lado la presencia de microasperezas, Halling idealizó una superficie rugosa con asperezas perfectamente esféricas, cada una de radio R [8]. Otra asunción que se hizo en lo que a la superficie lisa respecta es la penetración de estas protuberancias y la carga normal aplicada (F) es tal que la deformación es totalmente elástica. Así, estas suposiciones le sirvieron para demostrar que, si el contacto es elástico, el área real de contacto no es directamente proporcional a la carga normal aplicada, lo cual se presenta en la Fig. 1.34.

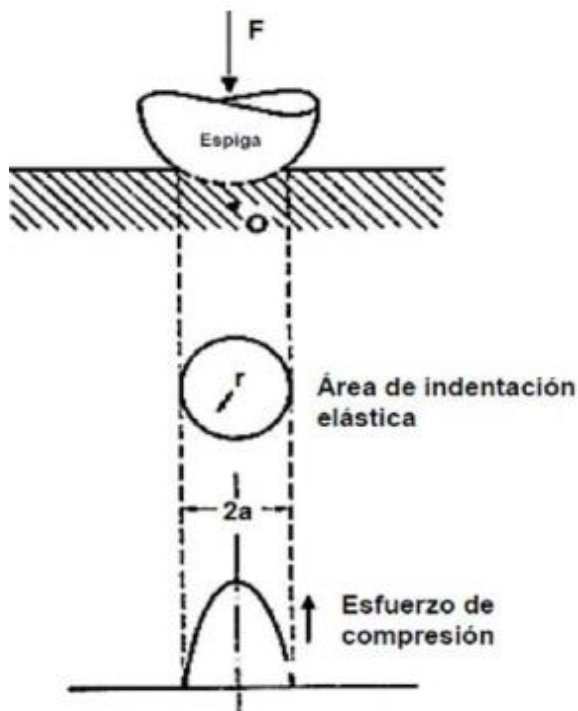


Fig. 1.32. Cuerpo hemisférico que presiona sobre una superficie plana [6].

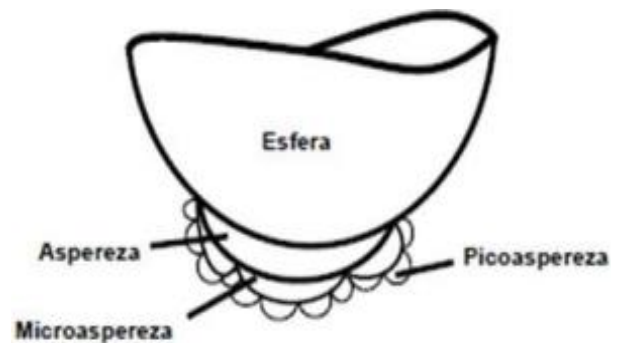


Fig. 1.33. Esfera con microasperezas [6].

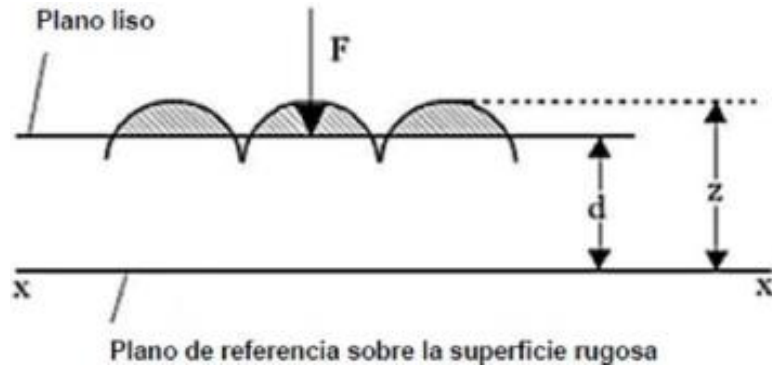


Fig. 1.34. Superficie rugosa idealizada penetrada por una superficie plana [6].

A partir de lo cual se dedujo la Ec. 1.7:

$$F_e = \frac{4E}{3\pi^2 n^2 r} A_e^{\frac{3}{2}} \quad (1.7)$$

donde: F_e es la carga normal aplicada en N, y

n es el número de aspereza por unidad de área en mm^2 .

En el mismo sentido de la Ec. 1.2 se puede deducir que:

$$A_e = \alpha F_e^{\frac{2}{3}} \quad (1.8)$$

El análisis anterior se basó en una distribución de aspereza idealizada, ya que las superficies reales tienen asperezas de altura variable y distribución aleatoria, tal como se presenta en la Fig. 1.35.



Fig. 1.35. Una superficie real penetrada por una superficie plana [6].

Greenwood y Williamson encontraron que el área real de contacto es directamente proporcional a la carga normal aplicada, aunque el contacto sea elástico, este resultado fue obtenido al realizar estudios en superficies rugosas reales [9].

Si a la superficie de la Fig. 1.34 se le aplica una carga normal que provoque el flujo plástico en dicha superficie, ésta presentará endurecimiento por trabajado en frío. En este sentido, los contactos posteriores con esta superficie serán de naturaleza elástica [6].

1.4.4. FRICCIÓN

La fricción es la resistencia al movimiento de un cuerpo sobre otro. La palabra proviene del verbo latino "fricare", que significa frotar. Los cuerpos en cuestión pueden ser un gas y un sólido (fricción aerodinámica), o un líquido y un sólido (fricción líquida); o la fricción se puede deber a procesos internos de disipación de energía dentro de un cuerpo (fricción interna). En esta ocasión, se limitará a los efectos de la fricción sólida [11].

Dos de los inventos más significativos de los primeros humanos están relacionados con la fricción: aprendieron a usar el calor por fricción para encender sus fuegos de cocina y descubrieron que la fricción de rodadura es mucho menor que la fricción deslizante (es decir, es más fácil mover objetos pesados si están sobre rodillos que arrastrarlos). Este segundo descubrimiento eventualmente llevó a la invención de la rueda [11].

La fricción juega un papel importante en una cantidad significativa de nuestras actividades diarias y en la mayoría de los procesos industriales. Ayuda a iniciar el movimiento de un cuerpo, cambiar su dirección y detenerlo posteriormente. Sin fricción, no se podría mover con facilidad, agarrar objetos, encender una cerilla ni realizar una multitud de otras tareas cotidianas comunes. Sin fricción, la mayoría de las uniones roscadas no se mantendrían, los molinos de laminación no podrían funcionar y la soldadura por fricción obviamente no existiría. Sin fricción, no se escucharía ni la canción del violín ni el chirrido del freno [11].

En maquinaria en movimiento, la fricción es responsable de la disipación y pérdida de mucha energía. Se ha estimado, por ejemplo, que el 10% del consumo de aceite en Estados Unidos se utiliza simplemente para vencer la fricción. La energía perdida por fricción es una entrada de energía que se debe proporcionar continuamente para mantener el movimiento deslizante. Esta energía se disipa en el sistema, principalmente como calor, que puede tener que ser eliminado mediante enfriamiento para evitar daños y puede limitar las condiciones bajo las cuales se puede operar la maquinaria. Parte de la energía se disipa en diversos procesos de deformación, que resultan en el desgaste de las superficies deslizantes y su degradación eventual hasta el punto en que se hace necesario reemplazar componentes completos. El desgaste de las superficies deslizantes agrega otro componente muy grande a la importancia económica de la fricción, porque sin la fricción deslizante estas superficies no se desgastarían [11].

Las leyes experimentales fundamentales que gobiernan la fricción de los cuerpos sólidos son bastante simples. Por lo general, se les atribuye a Coulomb, quien las formuló en 1875 (gran parte de su trabajo se basó en trabajos anteriores de Leonardo da Vinci y Amontons). Las leyes se pueden expresar en términos muy generales:

- ✓ La fricción estática puede ser mayor que la fricción cinética (o dinámica).
- ✓ La fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.
- ✓ La fuerza de fricción es proporcional a la carga aplicada.
- ✓ La fuerza de fricción es independiente del área de contacto.

Es importante enfatizar que estas "leyes" son muy generales en su naturaleza y que, aunque son aplicables en muchos casos, también hay numerosas condiciones en las que dejan de ser válidas [11].

La fricción se representa comúnmente mediante el coeficiente de fricción, para el cual generalmente se utilizan los símbolos μ o f . El coeficiente de fricción es la relación entre la fuerza de fricción, F , y la carga, N como en la Ec. 1.8:

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1.8)$$

donde: μ es el coeficiente de fricción,

F es la fuerza de fricción y,

N es la carga.

El coeficiente de fricción típicamente varía desde 0.03 para un rodamiento muy bien lubricado, hasta 0.5 a 0.7 para deslizamiento en seco, e incluso 5 para superficies metálicas limpias en un vacío. Un valor de 0.2 a 0.3 permite caminar cómodamente; sin embargo, caminar sobre hielo es muy difícil porque el valor de μ para la combinación hielo/zapato puede ser <0.05 , y un piso resbaladizo puede tener un valor de μ de 0.15. La naturaleza ha proporcionado una lubricación altamente eficiente a otro componente de la marcha, la articulación de la rodilla, que tiene un valor de μ de 0.02 [11].

Un cuerpo de peso W sobre una superficie plana comenzará a moverse cuando la superficie se incline a un cierto ángulo. El coeficiente de fricción estático se da por la Ec. 1.4:

$$\mu_s = \operatorname{tg} \theta \quad (1.9)$$

donde: μ_s es el coeficiente de fricción estático y,
 θ es el ángulo de inclinación de la superficie.

Esto representa una forma simple de medir μ_s , aunque las mediciones de fuerza generalmente se utilizan para medir tanto los coeficientes de fricción estática como dinámica, o cinética. Sin embargo, los resultados obtenidos de estas mediciones dependen de la naturaleza y la limpieza de las superficies y también en cierta medida de las diversas características del sistema de medición. Esta dependencia resalta el hecho básico de que el coeficiente de fricción no es una propiedad de materiales única y claramente definida, como se puede hacer evidente a partir de la breve discusión de los mecanismos básicos de la fricción siguiente [11].

Las superficies no son completamente planas a nivel microscópico. A alta magnificación, incluso la superficie mejor pulida mostrará crestas y valles, asperezas y depresiones. Cuando dos superficies se juntan, se tocan íntimamente solo en las puntas de algunas asperezas. En estos puntos, la presión de contacto puede ser cercana a la dureza del material más suave; la deformación plástica ocurre en una escala muy local,

y la soldadura en frío puede formar uniones fuertemente enlazadas entre los dos materiales. Cuando comienza el deslizamiento, estas uniones se deben romper mediante la fuerza de fricción, lo que proporciona el componente adhesivo de la fricción. Algunas asperezas se pueden desplazar sobre la superficie del material emparejado, y la deformación plástica resultante o la histéresis elástica contribuyen a la fuerza de fricción; contribuciones adicionales se pueden deber al desgaste por partículas de desechos que quedan atrapadas entre las superficies deslizantes [11].

Debido a que tantos mecanismos están involucrados en la generación de la fuerza de fricción, está claro que la fricción no es una propiedad única de los materiales, sino que depende en cierta medida de las condiciones de medición, de la rugosidad de la superficie, de la presencia o ausencia de óxidos o películas adsorbidas, y así sucesivamente. A pesar de esta complejidad, los valores de μ obtenidos por diferentes métodos y laboratorios tienden a caer en rangos que son representativos del par de materiales en cuestión bajo condiciones razonablemente similares. Es decir, los valores obtenidos por diferentes laboratorios tienden a estar dentro del 20 al 30% uno del otro si las condiciones de prueba son generalmente similares. Sin embargo, es importante entender que los valores de μ listados en este Manual están destinados solo a proporcionar pautas aproximadas y que los valores más exactos, si son necesarios, se deben obtener a partir de mediciones directas en el sistema en cuestión bajo sus condiciones operativas típicas [11].

La deformación en asperezas y uniones es extremadamente localizada, y se pueden generar temperaturas muy altas en períodos de tiempo muy cortos. En estos puntos locales, puede tener lugar una rápida oxidación, flujo plástico o interdifusión, y todos estos afectan al proceso de desgaste. En algunos casos, incluso se pueden formar chispas. Las temperaturas obtenidas dependen de cuán rápido se genera el calor (es decir, de las condiciones de carga y velocidad) y de cuán rápido se elimina el calor (es decir, de las propiedades térmicas de las superficies deslizantes) [11].

Las oscilaciones de fricción se pueden desarrollar cuando el coeficiente de fricción estático es mayor que el cinético, como es el caso de muchos sistemas sin lubricación. El movimiento resultante se llama a menudo "stick-slip". Las dos superficies se mantienen juntas hasta que la energía elástica del sistema se acumula hasta el punto en que ocurre

un deslizamiento repentino hacia adelante. Las oscilaciones resultantes pueden producir vibraciones en el equipo, daño en la superficie y ruido [11].

Algunas de las áreas de interés tecnológico actual e investigación relacionadas con la fricción incluyen:

- Medición de Fricción: Formas más precisas de medir y predecir su valor para condiciones dadas sin necesidad de probar el sistema real.
- Detección de Fricción: Uso de las diversas señales generadas por la fricción para el control en tiempo real de robots, procesos de fabricación, sistemas de lubricación, etc.
- Materiales: Materiales y recubrimientos con baja fricción para operación a temperaturas elevadas donde los lubricantes normales se descomponen; y materiales y recubrimientos con valores constantes, predecibles y sostenibles de μ [11].

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental es una parte fundamental de la investigación, permitiendo estructurar y sistematizar los estudios para obtener resultados precisos y reproducibles. En el presente trabajo, se abordará el procedimiento para realizar cementación sólida y estudios de desgaste utilizando un enfoque tipo espiga sobre disco. Este método es ampliamente reconocido por su capacidad para evaluar la resistencia al desgaste de materiales bajo condiciones controladas. Se seguirán normas específicas y se emplearán las técnicas de preparación y tratamiento de probetas. El estudio incluirá etapas como el maquinado de las muestras, la aplicación de tratamientos termoquímicos, y la realización de ensayos de desgaste tomando en cuenta variables implicadas. La caracterización metalográfica de las probetas permitirá comparar las propiedades mecánicas entre diferentes tratamientos, aportando información para la optimización de materiales en diversas aplicaciones.

En esta sección se describe el procedimiento y cada paso a ejecutar en el desarrollo del estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, este procedimiento inicia con el maquinado de las probetas. Se prepararán discos de acero SAE 3115 un total de 18 los cuales tienen dimensiones de 50 mm de diámetro y 10 cm de espesor, también se tendrán 18 espigas de acero para herramienta SAE O1, estas con dimensiones de 4 mm de diámetro y 25 mm de longitud.

De los 18 discos, 9 serán sometidos a un tratamiento termoquímico de cementación sólida el cual se llevará a cabo a 900 °C durante 8 h, con una mezcla 70% peso de carbón vegetal de café, y 30% en peso de carbonato de bario como activador. Para las espigas, se preparan las 18 de acero para herramienta SAE O1 templado en aceite a una temperatura de 850 °C y revenido a 200 °C con el propósito de obtener la mayor dureza.

Para el ensayo de desgaste se harán en combinaciones de variables, estableciendo 3 cargas diferentes y una distancia de deslizamiento para cada disco de material base y para los discos cementados.

Para el proceso de determinación de dureza en los discos cementados y la medición de la capa cementada se describirá la caracterización metalográfica comparando el acero cementado del que no lo está.

2.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la Fig. 2.1 se presenta el diagrama de flujo de la metodología experimental al seguir, esta metodología sigue las recomendaciones e instrucciones dadas por la norma ASTM G99-17, la cual es el estándar para pruebas tipo espiga sobre disco, se sigue el procedimiento que comienza con dimensionamiento corte y maquinado, posteriormente limpieza con soda caustica y secado para pasar a los procedimientos propios del tratamiento termoquímico de cementación sólida, finalmente luego de la cementación se realizaran los análisis pertinentes de cementación por medio de la prueba en la máquina de ensayos así como la caracterización metalográfica de las probetas tanto las endurecidas o tratadas como las que no, para poder realizar un correcto análisis comparativo de sus propiedades mecánicas.

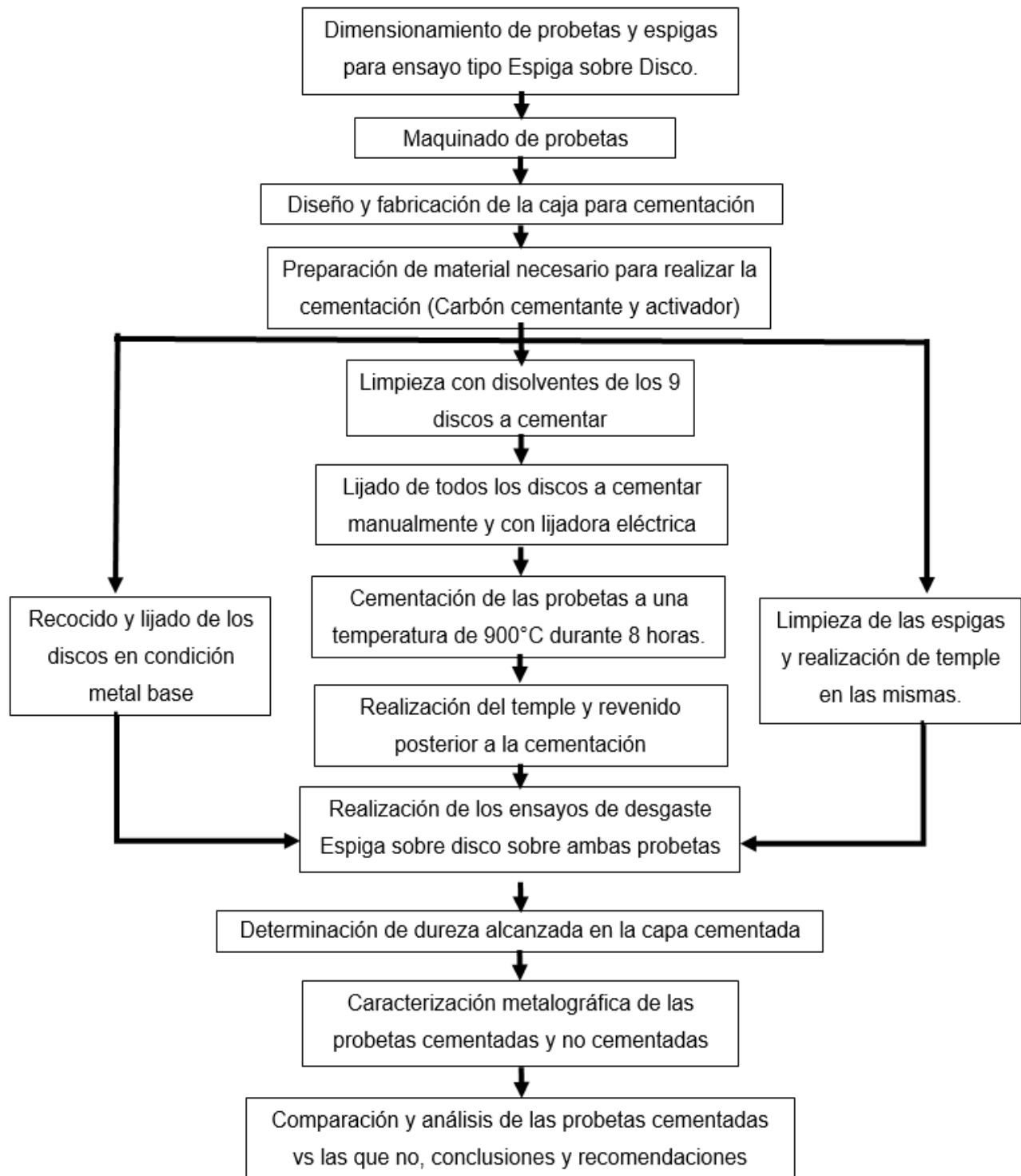


Fig. 2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental de la investigación.

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

Las dimensiones de las probetas seguirán las características recomendadas en el manual del módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo 260.3. Este aparato también se utiliza con el módulo básico de estudios tribológicos de la misma marca, modelo TM260.

El disco de acero SAE 3115 posee un diámetro de 50 mm y un espesor de 10 mm, cuenta con un chaflán en ambas caras, de 1 mm a 45° y un agujero de 4.37 mm; dicho agujero permite la sujeción del disco al vaso portador del mismo, mediante un perno, existe holgura entre el perno y el disco, por lo que no es necesario realizar un ajuste. La espiga posee un diámetro de 4 mm y una longitud de 25 mm, a continuación, en la Fig. 2.2. se presenta el esquema de forma gráfica.

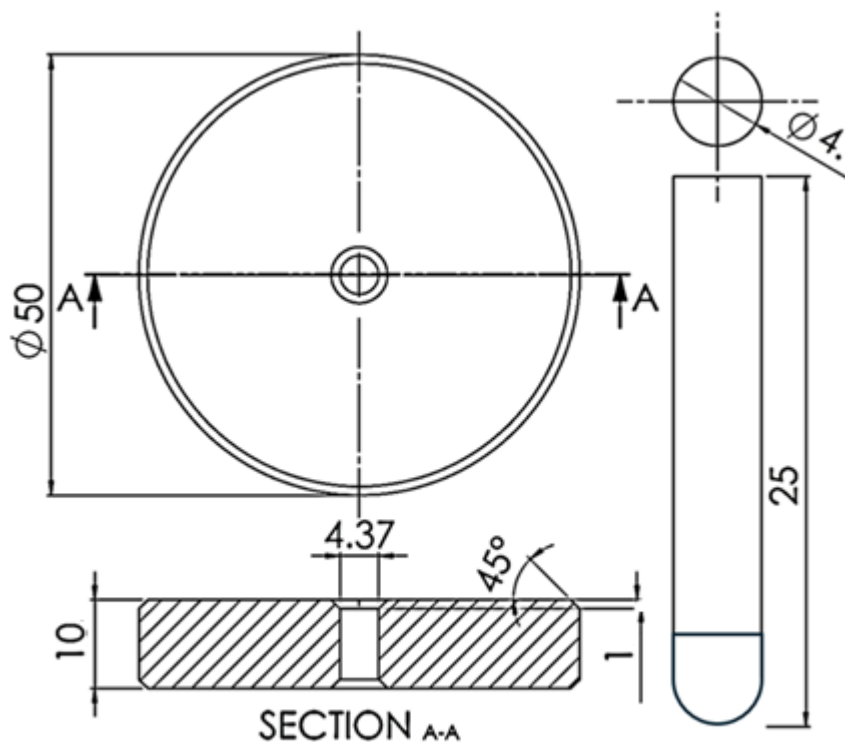


Fig. 2.2. Plano de fabricación dimensiones en mm, discos y espigas.

2.3. MAQUINADO DE LAS PROBETAS

El acero SAE 3115 es un acero de cementación con bajo contenido de carbono que tiene al menos 0.6Cr%, 0.8%Ni como elementos de refuerzo (ver Tabla 2.1). Tiene una templabilidad media-baja con buena resistencia del núcleo hasta un espesor de ~50 mm, y una buena maquinabilidad en estado recocido 16NiCr4 se suministra generalmente en estado recocido con dureza máxima 217HB.

Tabla 2.1. Composición química acero SAE 3115.

Calificación	C	Si	Mn	Cr	Ni	S
SAE 3115 16NiCr4	0.13 - 0.19	≤0.4	0.7 - 1.0	0.6 - 1.0	0.8 - 1.1	≤0.035

Se toma como referencia para el maquinado el hecho de que el acero se ha obtenido en calidad de suministro por tanto las operaciones de maquinado no se ven afectadas por posibles tratamientos antes de la entrega del material por parte del proveedor.

1) Cilindrado

Esta operación consistió en eliminar el exceso de material, la barra de acero SAE 3115 en calidad de suministro contaba con 55 mm de diámetro, se cilindró para llevar la barra hasta los 50 mm que es el diámetro indicado por la norma, ver proceso en la Fig. 2.3.

2) Corte de discos

Cuando el material ya tiene el diámetro correcto, se proceden a cortar los discos, para ello se utiliza la sierra alternante, entregando discos con un espesor de ~15 mm los cuales con los procesos siguientes serán llevados hasta los 10 mm especificados en la norma véase el proceso en la Fig. 2.4.



Fig. 2.3. Proceso de cilindrado acero SAE 3115.



Fig. 2.4. Corte de discos.

3) Perforado

Los discos de nuevo se montan en el torno para perforar en el centro, el diámetro de la perforación es según norma de 4.37 mm (ver Fig. 2.5). esta perforación debe ser mayor al diámetro del tornillo que sostendrá los discos en la máquina de ensayo de desgaste.



Fig. 2.5. Proceso de perforado de discos.

4) Refrentado

Con este paso se busca lograr una superficie regular y plana en ambas caras de cada disco Fig. 2.6. y un espesor constante en todo el disco.



Fig. 2.6. Proceso de refrentado de caras.

5) Biselado

La Fig. 2.7. Muestra la eliminación de filos en el borde de los discos, este se realiza para facilitar el agarre en las mesas rotativas de lijado.

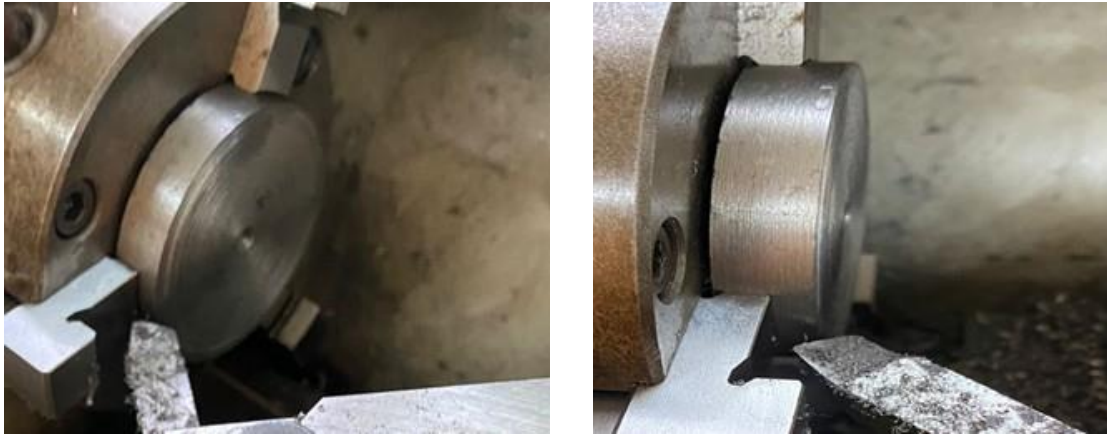


Fig. 2.7. Eliminación de filos, proceso de biselado.

6) Rectificado

El objetivo de este proceso es garantizar que las caras anteriormente refrentadas sean paralelas entre sí, para que en el estudio de desgaste el disco no provoque a causa de sus irregularidades de espesor un movimiento alternante en el pin dicho proceso se muestra en la Fig. 2.8.

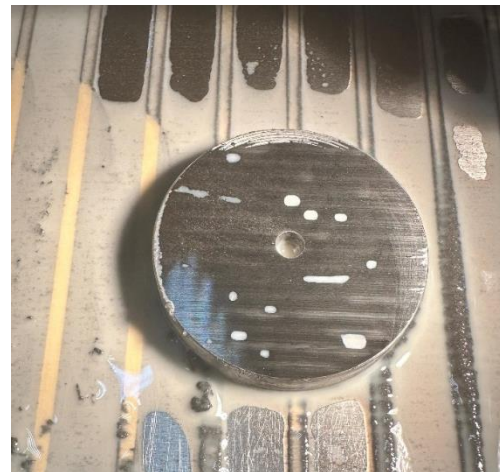


Fig. 2.8. Proceso de rectificado.

2.4. DISEÑO DE LA CAJA PARA CEMENTACIÓN

La caja para la cementación poseerá un diseño basado en los resultados obtenidos por Artiga, Hernández & Mezquita, 2002; según la investigación realizada, la condición óptima para realizar la cementación se produce con una distancia de separación de 7.50

mm. Si se considera dicha distancia de separación entre las caras de los discos a cementar y las dimensiones de estos, el diseño de la parte el interior de la caja y la distribución de los discos se muestra en la Fig. 2.9.

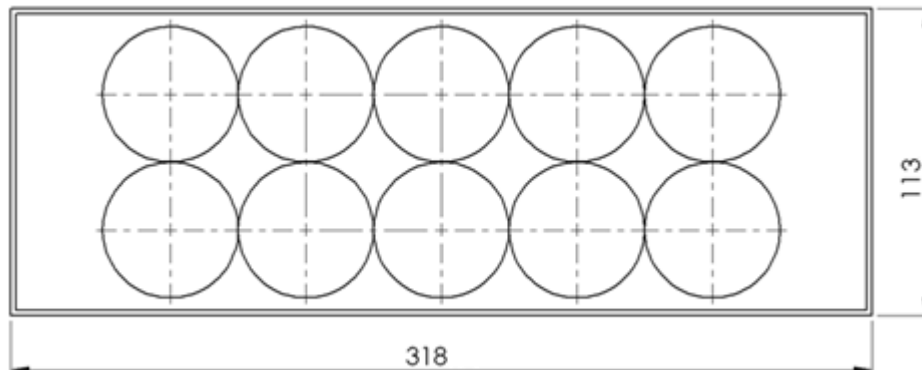


Fig. 2.9. Vista en planta de la caja para cementación (cotas en mm).

En la Fig. 2.9 se presenta la vista en planta en la cual se detalla la colocación de 10 discos según la disposición mostrada, estos discos estarán recubiertos por una mezcla carburante, lo cual genera una capa de espesor de 7.50 mm, que es equivalente a la distancia recomendada por la investigación antes mencionada.

Considerando que la caja tiene que estar sellada herméticamente, se debe agregar un canal en el contorno de la caja para que el contacto entre la tapa y la caja pueda ser rellenado con arena fina, para garantizar que sea herméticamente cerrada, este canal se detalla en la Fig. 2.10 y se presenta el diseño de la caja cerrada.

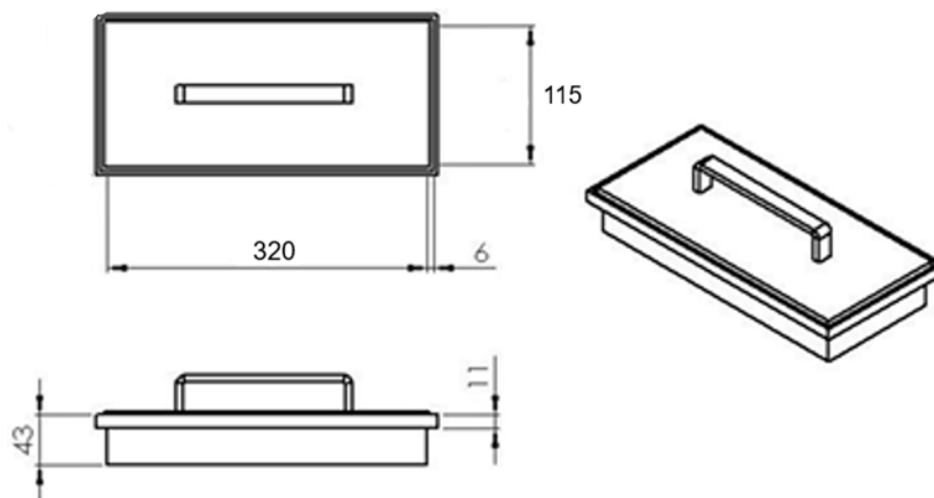


Fig. 2.10. Diseño externo de caja y tapadera. Cotas en mm.

2.5. TRATAMIENTO DE CEMENTACIÓN

La cementación sólida se llevó a cabo durante 9 h de las cuales la primera se ha considerado para homogenización de la temperatura en la caja de cementación con la temperatura del horno por encima de los 1,000 °C y asumiendo una caída de ~50 °C al centro del horno donde estará la caja, con 20 discos, 11 de acero SAE 3115 y 11 de acero 1020 utilizados en otra investigación.

Para una cementación correcta se deben seguir una serie de pasos que garanticen la superficie de las probetas este en condición al igual que la mezcla cementante.

El proceso de experimentación consiste en las etapas siguientes:

- Limpieza de probetas
- Preparación de la mezcla carburante
- Distribución de probetas en la caja
- Tratamiento termoquímico de cementación de las probetas.
- Etapa posterior al proceso de cementación.

2.5.1. LIMPIEZA DE PROBETAS

Antes de proceder con la cementación, se debe eliminar todo tipo de impureza que existan en la superficie de las piezas; para ello, el primer paso debe ser lavar las probetas con agua y con jabón para quitar cualquier residuo de aceite en el que estuvieron guardadas, luego, se debe secar con aire caliente para asegurar la eliminación de humedad. Posterior a este lavado y secado, se debe aplicar un lavado con soda caustica al 5%, las probetas se mantienen sumergidas durante 5 minutos tal como se presenta en la Fig. 2.11, posteriormente se retiran y se vuelven a secar con aire caliente.

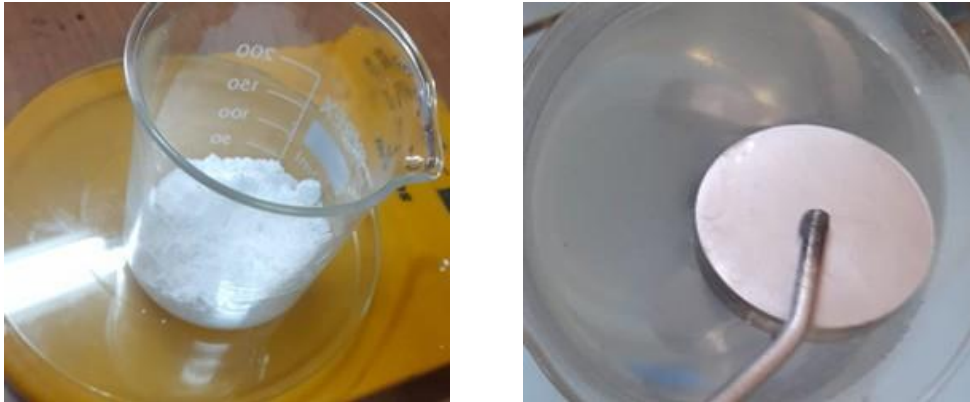


Fig. 2.11. Limpieza y secado de discos.

2.5.2. PREPARACIÓN DE LA MEZCLA CARBURANTE

Se estableció una mezcla de proporción en peso de carbón vegetal de café y carbonato de bario de 80:20 en porcentaje de peso. Previo al proceso de cementación, los 22 discos se colocan en la caja y posteriormente se llena con carbón para sustraer el peso de este a utilizar, también antes de hacer la mezcla carbón-carbonato de bario se debe garantizar el carbón este completamente seco, para ello el carbón picado se coloca en la caja de cementación y se deja en el horno durante 4 h a 150 °C (ver Fig. 2.12).



Fig. 2.12. Secado de carbón vegetal de café.

En la experimentación se obtiene el peso del carbón, calculando el gramaje del carbón en relación 80:20 (ver Fig. 2.13) y calculando el porcentaje en peso de carbonato de bario a utilizar para ello se necesita partir de los volúmenes calculados.

- Volumen interno de la caja de cementación = 1429.12 cm³,
- Volumen de un disco para cementación = 19.05 cm³,
- Volumen 22 discos a cementar, 2 capas de 11 discos = 419.1 cm³,
- Volumen caja – volumen de 22 discos = 1,010.02 cm³, y
- Peso 1,010.02 cm³ de carbón vegetal de café = 200.0 g.

Con un cálculo simple se obtiene el peso necesario para la relación 80:20, así:

$$\frac{80\%}{20\%} = \frac{200.0g}{x} \quad \text{Resolviendo } x = 50.00 \text{ g}$$



Fig. 2.13. Pesajes para mezcla carburante.

2.5.3. DISTRIBUCIÓN DE PROBETAS DENTRO DE LA CAJA

Las mejores condiciones para realizar el tratamiento termoquímico de cementación se deben ejecutar con una distancia de separación de 7.50 mm entre probetas. En la Fig. 2.14 se presenta la disposición en la que se colocaron los 10 discos a cementar. El primer paso para la distribución de las probetas es colocar una capa de mezcla cementante en la base de la caja, ~5 mm luego colocar las 10 probetas estratégicamente en la caja y posteriormente colocar la mezcla carburante hasta alcanzar la distancia de separación establecida; luego de alcanzar el nivel se debe compactar y verificar que se deja una superficie uniforme para añadir los 10 discos restantes de la otra investigación y agregar nuevamente el resto de mezcla carburante, luego se cierra la caja y se añade el barro o

arena con arcilla en los extremos de la tapadera con el propósito de generar un sellado hermético.



Fig. 2.14. Distribución de probetas y mezcla cementante en la caja de cementación.

Después de colocados los discos en su posición se procede a sellar la caja en todos sus lados con arena y arcilla a fin de que se cree un sello hermético donde no entre oxígeno y pueda existir combustión del carbón convirtiéndolo en ceniza y afectando el proceso de cementación.

2.5.4. TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTACIÓN

La caja que se someterá al horno para el tratamiento termoquímico de cementación se debe colocar al centro de dicho horno, con una temperatura de 950 °C como se presenta en la Fig. 2.15. El tiempo que debe permanecer la caja dentro del horno será de 9 h, tiempo en el cual la primera hora se considera para homogenización de la temperatura dentro de la misma, posterior a ello seguirán 8 h completamente dedicadas a la difusión de átomos de carbono en el acero SAE 3115.

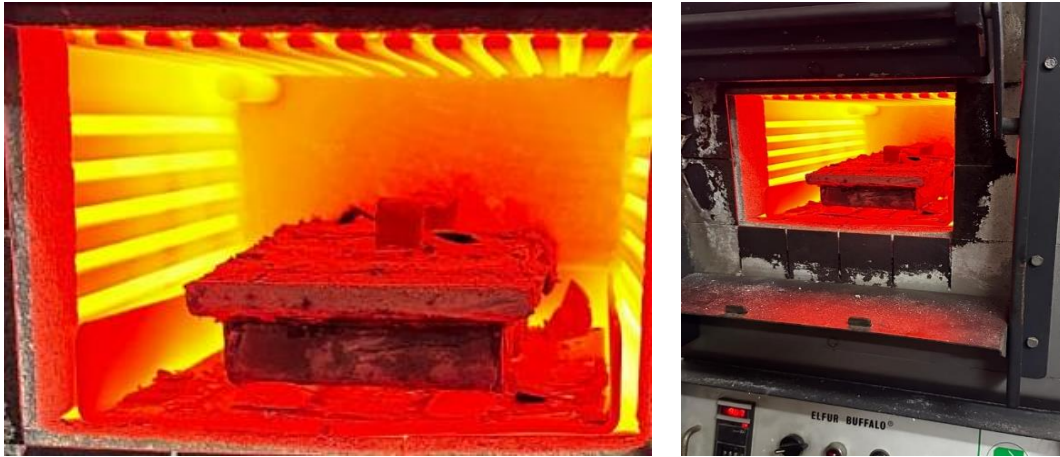


Fig. 2.15. Caja de cementación en horno eléctrico.

2.5.5. ETAPA POSTERIOR DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN

Cada una de las probetas se deben llevar desde la temperatura de cementación hasta la temperatura ambiente, a través de un enfriamiento lento dentro del horno, para asegurar dicho enfriamiento se apagó el horno al finalizar las 9 h totales y se dejó alcanzar el equilibrio térmico a temperatura ambiente 48 h.

2.6. POSTRATAMIENTO TÉRMICO

Al acabar el tratamiento termoquímico de cementación, se debe realizar un postratamiento térmico de temple y revenido, con el objetivo de lograr el endurecimiento máximo en la capa superficial de los discos y el revenido con el objetivo de aliviar esfuerzos residuales producto del enfriamiento rápido realizado en el temple. Una vez que las piezas en la caja se enfrían lentamente, se sustraen de la caja y se vuelven a calentar para aplicar el temple a una temperatura de 875 °C, la cual corresponde a la temperatura de temple de la zona superficial rica en carbono, así en la Fig. 2.16 se presenta parte de ese proceso.

El enfriamiento se hace en aceite para que luego se vuelva a colocar la pieza en el horno para el proceso de revenido a 200 °C para que posteriormente la pieza se enfríe

hasta la temperatura ambiente al aire libre. En la Fig. 2.17 se presenta la curva temperatura vs tiempo en el que se realiza un esquema del postratamiento térmico de los discos.

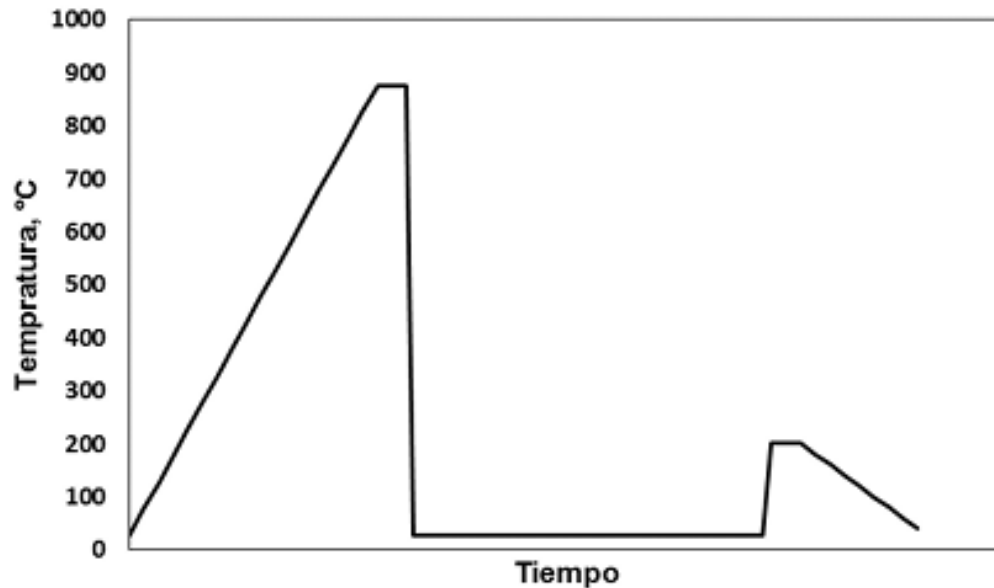


Fig. 2.16. Curva de variación temperatura vs tiempo para el postratamiento térmico de temple y revenido para los discos cementados.

Para el postratamiento térmico se necesita generar una atmósfera de argón, para ello se utiliza una cámara de gases inertes con el propósito de evitar oxidación de los especímenes durante el proceso. El proceso para este postratamiento parte de que se debe montar la cámara de gas inerte dentro de la cámara del horno, a una temperatura inicial de 750 °C. Este montaje necesita la colocación de la cámara de gases inertes de forma concéntrica en la cámara del horno, para posteriormente sellar la parte frontal de horno con fibra cerámica, con el propósito de mantener la energía térmica en el horno, evadiendo caídas de temperatura y generar un ambiente seguro de operación. Luego de asegurar que el equipo está colocado correctamente, se introducen los discos dentro de la cámara. Analizando las dimensiones de la cámara, únicamente se introducen 6 discos dentro de la cámara para facilitar la extracción de los discos para enfriarlos en aceite; por tanto, el postratamiento térmico se realizará en 3 grupos.

Luego, cada 15 min se incrementa la temperatura para que la temperatura al interior de la cámara de gas inerte alcance una temperatura deseada y se mantenga uniforme. Luego de alcanzar la temperatura de temple, el tiempo de mantenimiento a la

temperatura para un espesor de ~1 pulg debe ser de 60 min, por lo cual la relación para un espesor de 0.5 mm corresponde a 1 min, este es el tiempo al que se mantienen las probetas antes de ser retirados de la cámara de gas inerte y ser enfriado en aceite rápidamente.

Posterior al enfriamiento de las probetas, se debe esperar a que el horno se enfríe hasta los 100 °C para colocar una vez más los discos en la cámara del horno y llevarlos a una temperatura de 200 °C, la cual responde también a la temperatura de revenido para aceros SAE 3115 cementado, se debe mantener a esta temperatura durante 20 min y luego de este tiempo, se dejan enfriar los discos hasta alcanzar la temperatura ambiente.

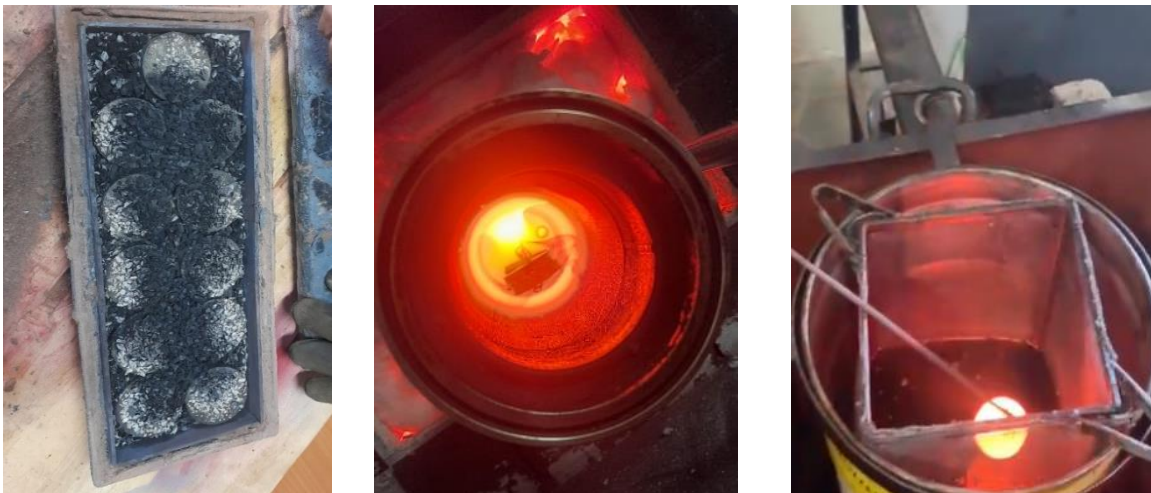


Fig. 2.17. Proceso de postratamiento térmico de temple y revenido en acero SAE 3115 con tratamiento termoquímico de cementación.

Mientras tanto a los discos de metal base se les realizó un tratamiento térmico de recocido, el cual consiste en llevar el horno hasta 850 °C y colocar en grupos de 5 discos de metal base durante 40 min de los cuales los primeros 10 se consideran de homogenización de la temperatura y 30 min de recocido, posterior a eso se apaga el horno y se da un enfriamiento lento hasta llegar a temperatura ambiente, la Fig. 2.18 se presenta la colocación de un grupo de discos.

El objetivo de este tratamiento térmico es eliminar magnetización residual que los discos adquirieran en el rectificado, dado que la rectificadora utiliza un fuerte campo magnético para sujetar las piezas en la mesa de trabajo, esta magnetización si no se

elimina influiría en la medición de masa dado que la balanza analítica es sensible al campo magnético y esto induciría a errores de medición.

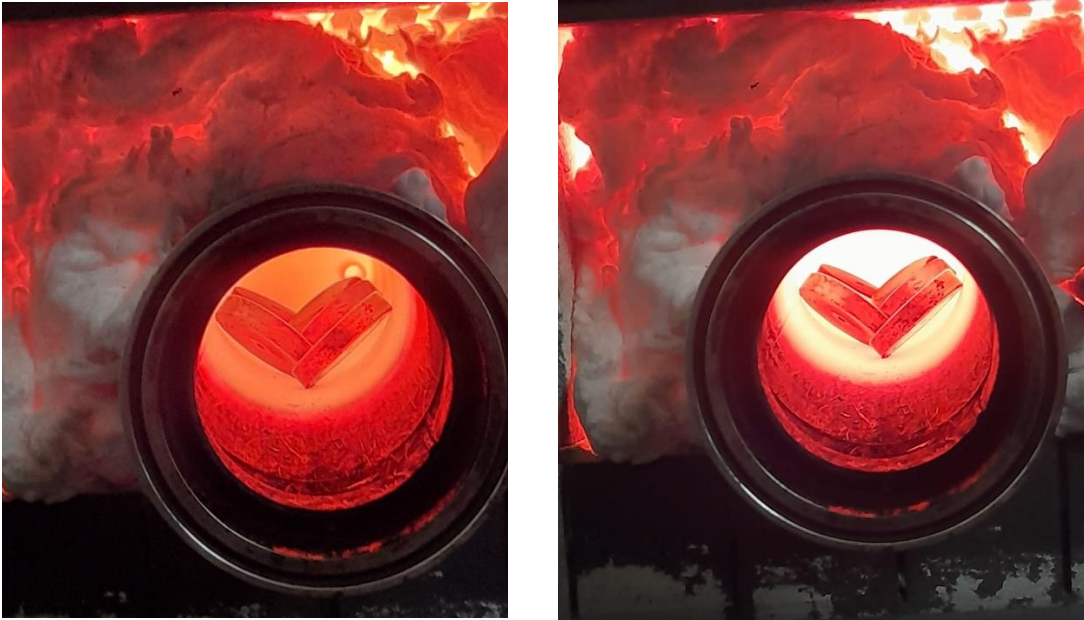


Fig. 2.18. Tratamiento térmico de recocido, discos de metal base.

2.7. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LAS ESPIGAS

Las espigas de acero SAE O1 se deben someter a un tratamiento térmico de temple y revenido. En la Fig. 2.19. se presenta la curva de temperatura vs tiempo que corresponde al tratamiento térmico de las espigas.

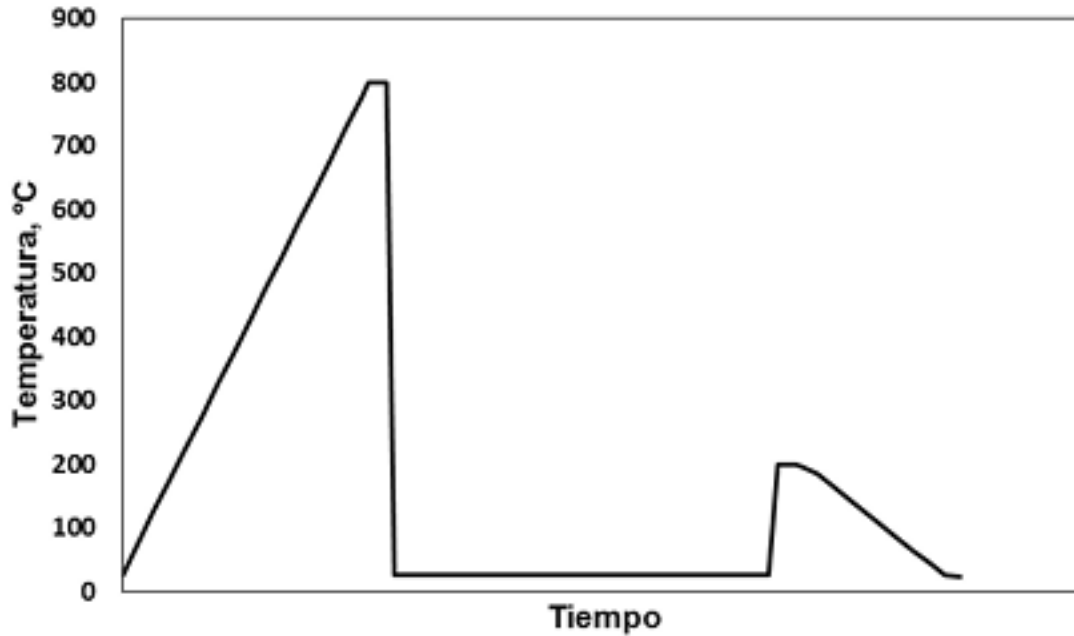


Fig. 2.19. Curva de variación temperatura vs tiempo para tratamiento de temple y revenido de las espigas de acero SAE O1.

El proceso para el tratamiento térmico de estas espigas consiste en los mismos pasos que se siguieron en el postratamiento de los discos, con diferencia que en esta ocasión se realiza el tratamiento de las 18 espigas en una sola sesión; se colocan las 18 espigas dentro de una pequeña caja de hierro fundido como presenta en la Fig. 2.20. posterior a ello se lleva al horno. La temperatura de austenización para aceros SAE O1 es de 800 °C, y en orden a la relación de los tiempos, para una sección de 20 mm, el tiempo correspondiente debe ser de 10 min y, por tanto, para una sección de 4mm el tiempo de mantenimiento es de 2 min. De igual manera que los discos, el temple se debe realizar en aceite.



Fig. 2.20. Disposición espigas en la caja para tratamiento térmico de temple y revenido.

El proceso de revenido se inicia cuando el horno alcanza una temperatura de 100 °C, en ese momento se deben introducir las espigas dentro de la cámara del horno y se eleva la temperatura a 200 °C. Para una sección de 40 mm, el tiempo de mantenimiento según la relación debe ser de 1 h para este tipo de acero, aunque a esta temperatura, el tiempo se reduce a 12 min. Luego de los 12 min las espigas se retiran del horno para un enfriamiento al aire libre.

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

Los discos cementados, los no cementados y las espigas requieren un proceso de preparación antes de llevar a cabo el experimento. Este proceso incluye la limpieza del espécimen.

Para los discos no cementados, la limpieza implica lavarlos con agua y jabón líquido para eliminar cualquier residuo de aceite en el que fueron almacenados después del maquinado. En el caso de los discos cementados, que fueron almacenados posterior a un tratamiento térmico, la limpieza se realiza mediante un cepillado.

Una vez realizada la limpieza de acuerdo con la condición de cada espécimen, se procede a un lijado en mesa rotativa de las superficies que estarán en contacto durante el ensayo como se indica en la Fig. 2.21. En los discos no cementados, se selecciona la cara rectificada y se lija comenzando con una hoja gruesa de SiC número 100, seguido de hojas menos gruesas (210, 300 y 400), hasta llegar a intermedias (500 y 600) y por último a las finas (1,200 a 1,500). Este mismo procedimiento se aplica a los discos cementados.

De igual manera los pines luego del temple y revenido se lijan desde una lija 100 hasta una 1,200 a 1,500 en la punta de cada uno de ellos.



Fig. 2.21. Lijado en mesa rotativa con suministro de agua para enfriamiento.

Previo al inicio del estudio de desgaste se debe hacer una limpieza en ultrasonido del disco y de la espiga, tal como se presenta en la Fig. 2.22, para ello se utiliza una máquina de limpieza por ultrasonido con alcohol después se extraen el disco y espiga a ensayar, se secan y se llevan a la balanza analítica para registrar el peso de ambos antes del ensayo, al finalizar se repite el proceso antes de tomar la lectura de masa.



Fig. 2.22. Limpieza en máquina de ultrasonido y secado de disco y espiga previo al ensayo de desgaste.

2.9. ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Las pruebas de desgaste tipo espiga sobre disco se llevan a cabo utilizando un módulo de ensayos de desgaste marca Gunt. Este módulo complementa al módulo básico para estudios tribológicos de la misma marca. Ambos equipos están ubicados en el laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica (ver Fig. 2.23).

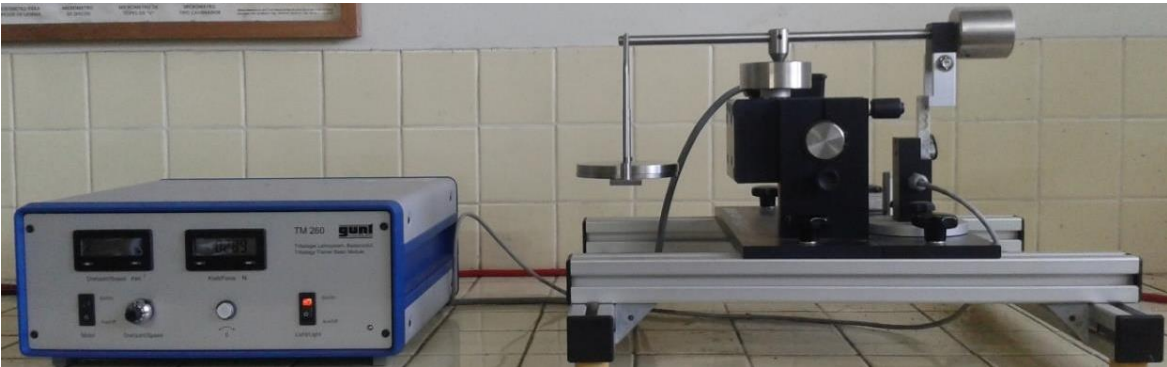


Fig. 2.23. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca Gunt.

El módulo para ensayos tipo espiga sobre disco permite posicionar una espiga con una superficie de contacto hemisférica perpendicular a un disco. Este disco se fija a un vaso mediante un perno, lo que permite que el árbol de accionamiento del módulo haga girar el disco, produciendo un movimiento de deslizamiento entre las dos superficies en contacto de los especímenes, describiendo una trayectoria circular en la superficie del disco. En la Fig. 2.24 se presenta un esquema del módulo para ensayos tipo espiga sobre disco, enumerando sus componentes más importantes. En la Fig. 2.25 se presenta el montaje y trayectoria de desgaste. En los experimentos a realizar, se utilizan espigas de superficie semi esférica. La espiga se coloca contra el disco y se aplica una carga constante mediante un brazo al que se le agregan pesos.

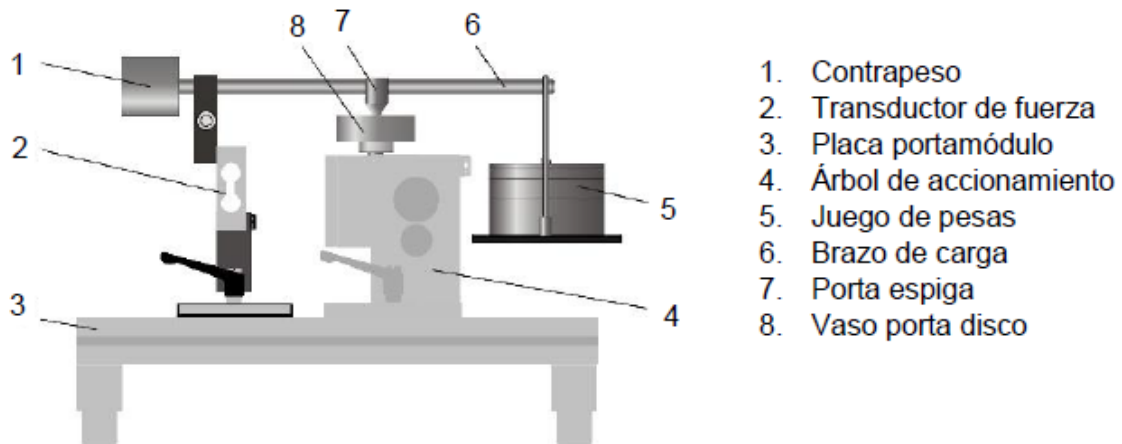


Fig. 2.24. Módulo para ensayos tipo espiga sobre disco con sus principales componentes señalados.

Los resultados de desgaste se presentan por separado como la pérdida de masa en gramos tanto para la espiga como para el disco. La cantidad de desgaste se determina pesando cada espécimen en una balanza analítica (ver Fig. 2.26) antes y después de la prueba.



Fig. 2.25. Trazado de desgaste.



Fig. 2.26. Balanza analítica.

Los resultados de desgaste se obtienen normalmente realizando los ensayos con una distancia de deslizamiento, carga y velocidad seleccionada. En la Tabla 2.2 se presenta las diferentes variables del experimento para las condiciones de los discos

cementados y no cementados. Se llevarán a cabo 3 experimentos para cada una de las 6 variantes.

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

Condición	Variables		
	Velocidad, m/s	Distancia de deslizamiento, m	Carga, N
Acero SAE 3115 no cementado	0.1	2,000	10
			15
			20
Acero SAE 3115 cementado	0.1	2,000	15
			20
			25

La velocidad a la que se realizarán todos los experimentos será de 0.1 m/s, una velocidad recomendada para ensayos tipo espiga sobre disco. El módulo utilizado para estos ensayos permite ajustar el número de revoluciones de salida entre 0 y 200 rpm mediante un potenciómetro. Por lo tanto, es necesario convertir la velocidad lineal a velocidad angular para determinar el número de revoluciones con las que se realizarán los experimentos. Para esta conversión se utiliza la Ec. 2.1.

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2.1)$$

donde: ω es la velocidad angular en rad/s,

v es la velocidad lineal en m/s, y

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

El diámetro de la trayectoria de deslizamiento se obtiene midiendo el disco de prueba que incluye el módulo de ensayos tipo espiga sobre disco. Se realizaron dos mediciones: el diámetro interno de la huella, que fue de 4.06 cm, y el diámetro externo, que fue de 4.26 cm. A partir de estos valores se calcula el diámetro central de la huella de desgaste, que es el valor medio de 4.16 cm. Sustituyendo este valor en la Ec. 2.1, se obtiene una velocidad angular de 4.81 rad/s. Convirtiéndolo a revoluciones por minuto, se obtiene un valor de 45.9 rpm, que se aproxima a 46 rpm.

Dado que el módulo para ensayos tipo espiga sobre disco no puede medir la distancia de deslizamiento directamente, durante los experimentos se registrarán tiempos en lugar de distancias. Para obtener el tiempo equivalente a una determinada distancia, se divide la distancia de deslizamiento entre la velocidad lineal, como se indica en la Ec. 2.2.

$$t = \frac{s}{v} \quad (2.2)$$

donde: t es el tiempo en s,

s la distancia de deslizamiento en m, y

v la velocidad lineal de deslizamiento.

Así, debido a que la velocidad de deslizamiento es la misma para todos los experimentos (0.1 m/s) y se trabaja con una distancia de deslizamiento, el tiempo requerido para 2,000 m es de 333 min y 20 s respectivamente, transformándolos a horas corresponden a ~5:34 h.

Una vez establecidas las variables de tiempo y cargas se procede a realizar los ensayos. Después de encender la caja de mando y el motor de esta, se colocan tanto el disco como la espiga en sus respectivos soportes y se baja el brazo de carga de manera que la espiga se apoye en el disco, luego se colocan en el portacarga la combinación de pesas correspondiente a la carga bajo la que se realizará el experimento según la Tabla 2.2, 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 objetivo de generar una curva para el coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento, para determinar el coeficiente de fricción se hace uso de la Ec. 2.3.

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

donde: μ es el coeficiente de fricción,

f_f es la fuerza de fricción medida en N, y

F es la carga seleccionada para el experimento en N.

2.10. MEDICIÓN DEL ESPESOR DE LA CAPA CEMENTADA

Para medir del espesor de la capa cementada se hará uso de un microscopio de retícula graduada; por lo tanto, es necesario preparar una muestra metalográfica de uno de los especímenes cementados.

Posterior a los ensayos de desgaste, se realizan los procedimientos de preparación para obtener el análisis metalográfico, de dureza y profundidad de capa cementada, tales procedimientos implican la selección de dos discos o especímenes a los cuales se les cortaran dos muestras como se presenta en la Fig. 2.27.

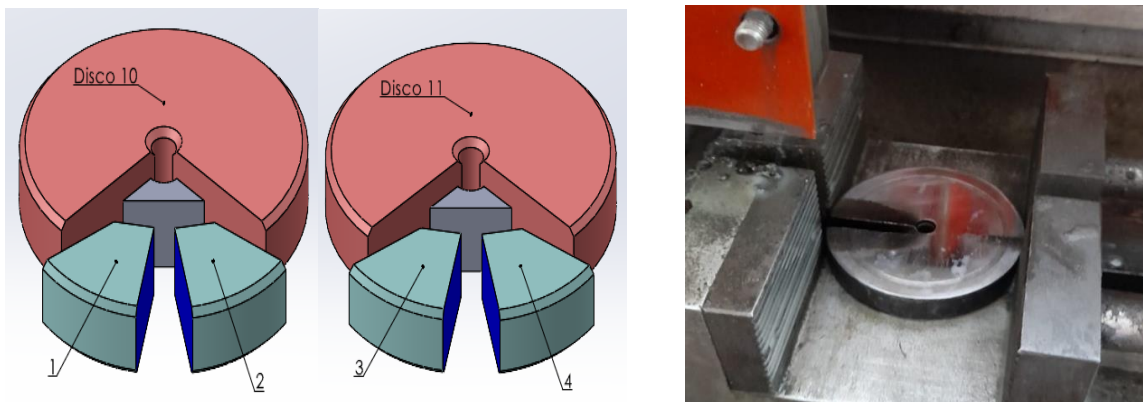


Fig. 2.27. Extracción de muestras para estudio de dureza y metalografía.

Se toma las fracciones 1 y 3, estas son sometidas a un recocido, el objetivo de este es lograr un crecimiento de los granos, con el propósito de que éstos y sus límites sean más fácil de observar en la metalografía. Las fracciones 2 y 4 se destinan al estudio de dureza por tanto se dejan tal cual con el temple y revenido posterior a la cementación.

Posteriormente se realiza el embutido de la muestra extraída mediante corte, para realizar dicho proceso se utiliza resina poliéster, el proceso se ejecuta en frío y se espera entre 6 y 12 h para que la resina se seque (ver Fig. 2.28).

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

Una vez pulida la superficie se procede a atacar químicamente la misma para poder revelar sus fases presentes. El reactivo utilizado para el ataque químico es nital al 2% de concentración que es un compuesto de ácido nítrico (2%) diluido en alcohol que compone el 98% restante, ver muestra atacada en la Fig. 2.29.

Posteriormente se utiliza un microscopio óptico de retícula graduada para poder observar la muestra a un aumento de 100x y medir directamente el espesor de la capa cementada.



Fig. 2.28. Embutido de muestras.



Fig. 2.29. Ataque químico a la muestra.

2.11. DETERMINACIÓN DE DUREZA

Para determinar la dureza superficial de la capa cementada, se utiliza el ensayo de dureza Vickers, ya que es un método utilizado muy ampliamente para medir la dureza de materiales sólidos en general.

Este es un ensayo de microdureza, ya que utiliza cargas iguales o menores a 1 kgf [10].

La determinación de la dureza se llevó a cabo en un durómetro marca INNOVATEST modelo VERZUS 750CCD ubicado en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica de esta Universidad, el cual se presenta en la Fig. 2.30.



Fig. 2.30. Durómetro INNOVATEST, modelo VERZUS 750CCD.

La dureza del material se lee directamente de la pantalla de la máquina, ya que en esta máquina el ensayo es automático y se obtiene el registro de la indentación mediante una cámara que está instalada. Se realizan 5 mediciones de dureza en diferentes puntos de la superficie de la muestra.

Para medir la dureza de una probeta, esta debe tener una superficie lisa y nivelada, permitiendo una superficie paralela a la base del portamuestra y perpendicular a la carga aplicada por el penetrador, asegurando así una medición confiable. Además, la superficie debe estar libre de óxidos, aceites o cualquier material contaminante.

Para medir la dureza de la muestra, se coloca directamente sobre el portamuestra del durómetro y sube la muestra hasta que, por medio de la cámara instalada se distinga la microestructura de la superficie con el lente a un aumento de 10x (ver Fig. 2.31); luego se moviliza la plataforma de la máquina bajo el indentador por medio de rieles y se

presiona un botón “start” en la pantalla, lo que inicia la prueba bajo una carga de 1 kgf (ver Fig. 2.32).

Al terminar la prueba se desplaza la plataforma a su posición inicial bajo la cámara para medir las longitudes diagonales de la huella dejada por el penetrador (ver Fig. 2.33), de este modo, el durómetro presenta automáticamente el valor de microdureza Vickers en la pantalla, a su vez con su equivalente en dureza Rockwell C (HRC) que es el dato que se utilizara para hacer el análisis.

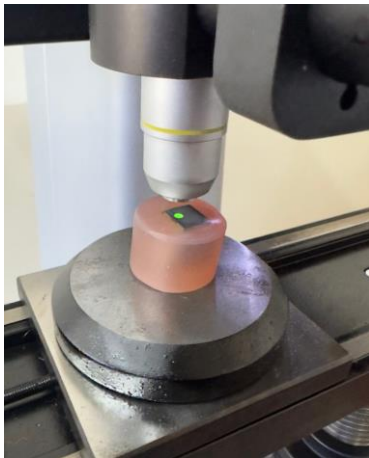


Fig. 2.31. Probeta en el portamuestra bajo la cámara a un aumento de 10x.



Fig. 2.32. Portamuestra bajo el indenteador durante la aplicación de carga.



Fig. 2.33. Medición de las diagonales de la huella y lectura de resultados en la pantalla del durómetro.

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

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a través de la ejecución de las técnicas experimentales descritas en el capítulo 2, siguiendo el orden y presentando en tablas los valores obtenidos en los diferentes estudios.

Para la presentación de los resultados se utilizaron tablas y figuras tanto para el valor de dureza y espesor de la capa cementada, así como también para los ensayos tipo espiga sobre disco correspondientes a las diversas especificaciones de los discos a ensayar y a las diversas combinaciones de parámetros de los ensayos, valiéndose de un análisis de resultados.

3.1. MEDICIÓN DEL ESPESOR DE LA CAPA CEMENTADA

En la Fig. 3.1 se presenta las fotomicrografías de las secciones transversales de 2 discos cementados, a los cuales se les realizó recocido a 800 °C con el propósito de eliminar el postratamiento térmico de temple y revenido realizado a los discos cementados. Así, con el recocido se facilita la visualización de las zonas cementadas, la zona de transición y el correspondiente metal base, además se afinó el tamaño de grano posterior a la cementación. Las mediciones de la capa efectiva de cementación se realizaron utilizando un microscopio invertido Leitz Labovert FS con 3 objetivos y fuente de luz equipado con una retícula óptica a un aumento de 100x y una regla microscópica calibrada, también se incorpora una cámara digital especializada para la toma de imágenes en microscopio, el software utilizado Amscope con el cual se extraen las fotografías y mediciones precisas.

El espesor de las muestras, luego de ser observadas y comparada con la regla calibrada, por regla de 3 se obtuvo para la muestra 1 un espesor de 3.41 mm, mientras que para la muestra 2 un espesor de 3.67 mm, dando un promedio un espesor de capa cementada de 3.54 mm.

La primera zona desde el borde corresponde a la capa completamente perlítica es decir la zona endurecida por la cementación, la siguiente zona es de transición donde se

han mezclado los granos endurecidos con los de metal base y finalmente la zona completamente de metal base la cual no fue endurecida ni afectada.

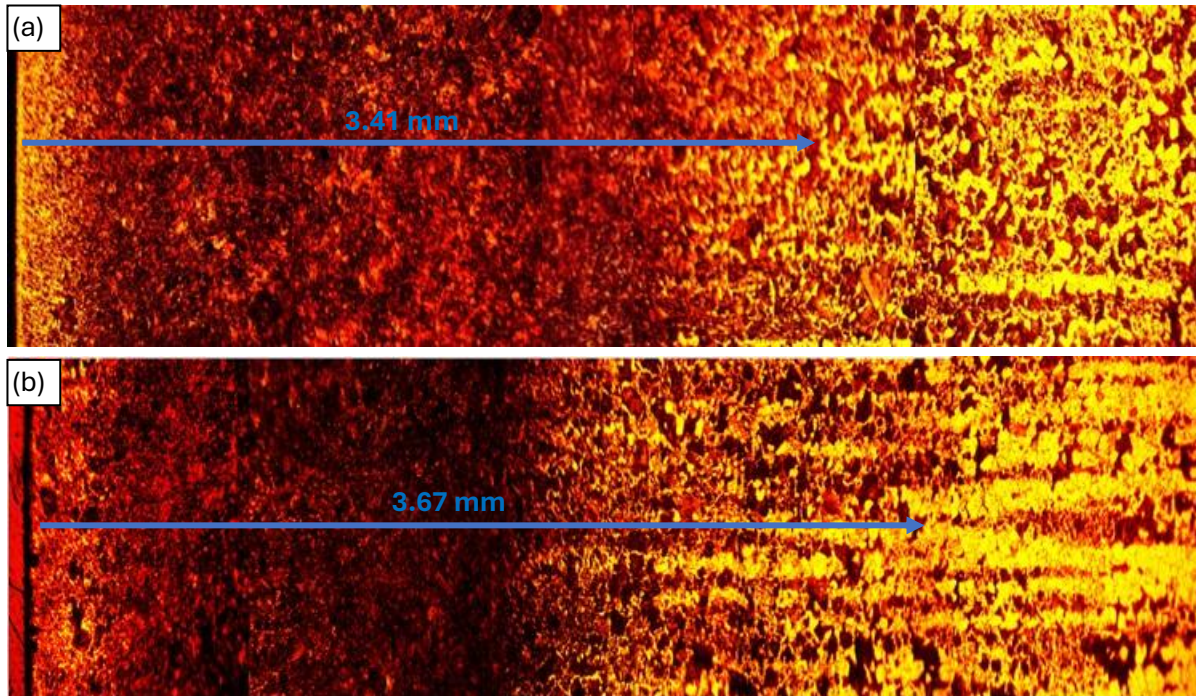


Fig. 3.1. Metalografías de secciones transversales de discos cementados: a) Muestra 1; y b) muestra 2.

3.2. DETERMINACIÓN DE DUREZA

Para la determinación de la dureza de los discos con tratamiento termoquímico de cementación, se eligieron dos discos para realizar la prueba y determinar la tendencia de dureza de la capa cementada. Se tomaron 5 mediciones de dureza en la sección transversal de cada disco para medir la variación de la dureza en función de la profundidad del tratamiento de cementación.

En la Tabla 3.1 se presenta las mediciones de dureza en cada muestra.

En la Fig. 3.2 se presenta las fotomicrografías de las secciones en donde se realizaron las indentaciones de dureza en función de la profundidad de cada muestra, para así dar una medición del perfil de dureza más preciso.

Tabla 3.1. Valores de Dureza Vickers a diferentes distancias desde la superficie de los discos cementados con postratamiento térmico.

Muestra N° 1		Muestra N° 2	
Profundidad, mm	HV	Profundidad, mm	HV
0.92	609.8	1.33	471.7
1.40	566.8	2.02	486.6
2.06	446.6	2.42	424.2
2.60	461.2	2.84	411.5
3.35	391.0	3.16	369.9

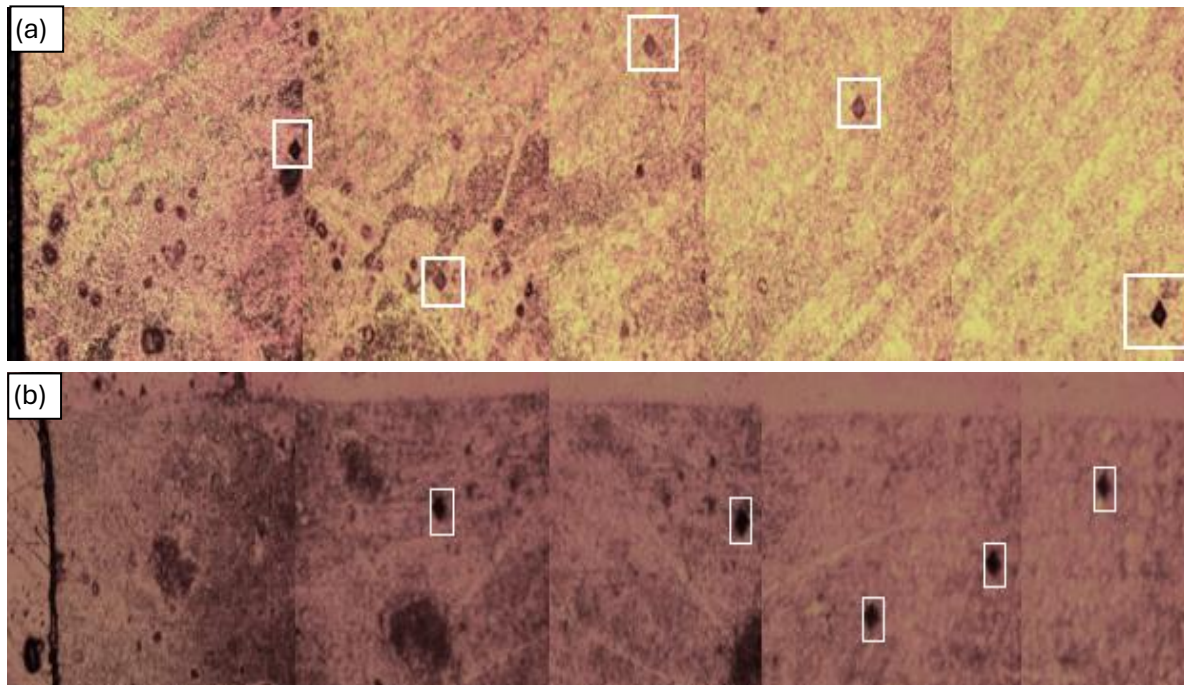


Fig. 3.2. las fotomicrografías de las secciones en donde se realizaron las indentaciones de dureza Vickers: a) Muestra 1; y b) muestra 2

En la Fig. 3.3 se presenta los perfiles de HV en función de la profundidad desde la superficie para cada muestra.

En las Figs. 3.4 y 3.5 se presentan fotomicrografías de las mediciones de dureza realizadas en las muestras 1 y 2.

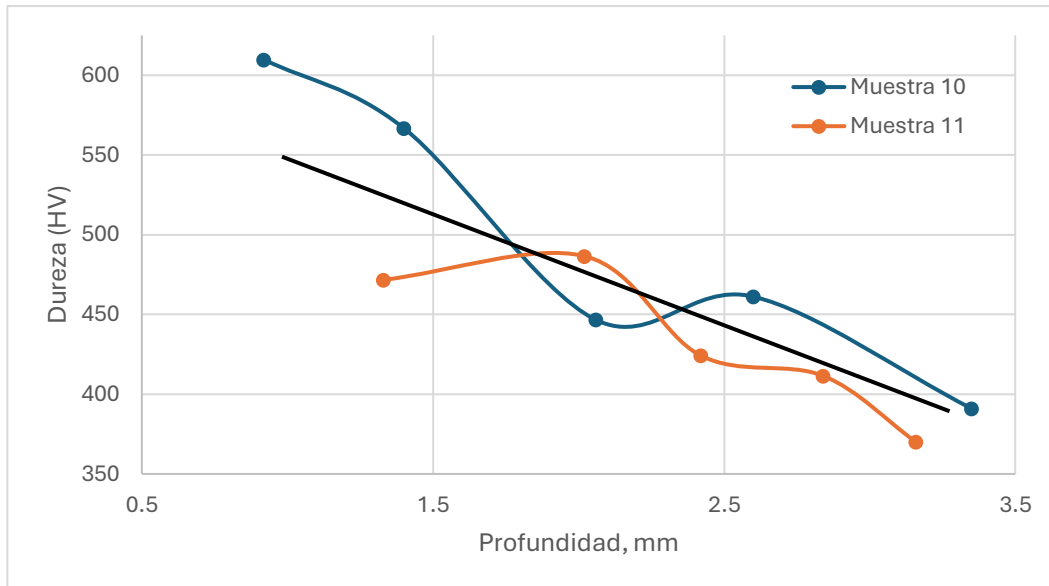


Fig. 3.3. Comportamiento de la dureza con respecto a la profundidad del tratamiento termoquímico de cementación en ambas muestras.

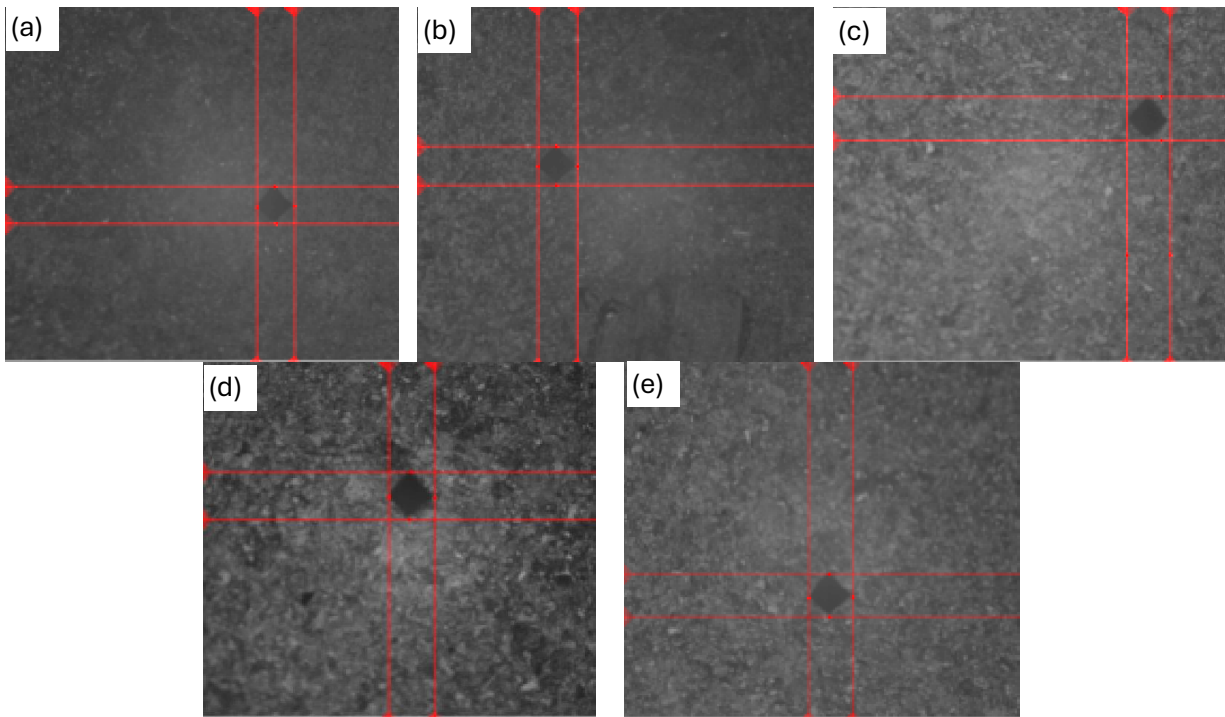


Fig. 3.4. Indentaciones de microdureza Vickers en disco de acero SAE 3115 cementadas con postratamiento térmico de temple y revenido, utilizando una carga de 1 kgf realizadas transversalmente desde la superficie en la muestra 1: a) 0.92 mm; b) 1.4 mm; c) 2.06 mm; d) 2.6 mm; y e) 3.35 mm.

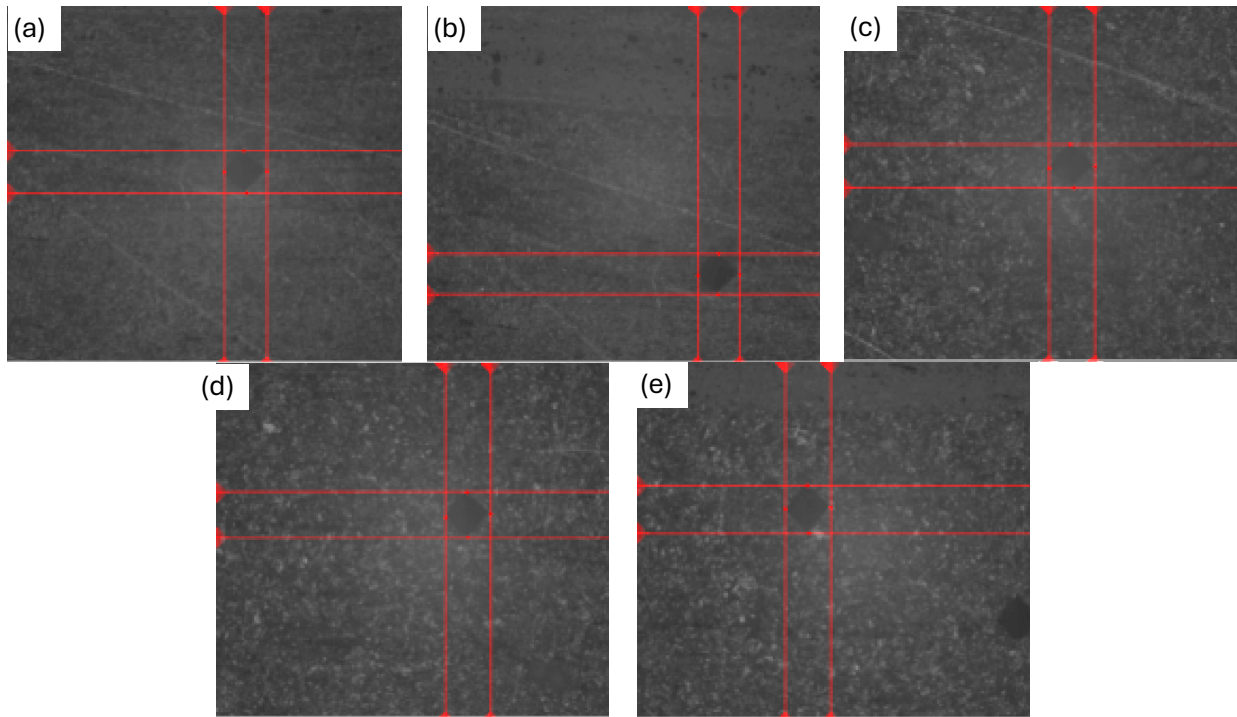


Fig. 3.5. Indentaciones de microdureza Vickers en disco de acero SAE 3115 cementadas con postratamiento térmico de temple y revenido, utilizando una carga de 1 kgf realizadas transversalmente desde la superficie en la muestra 2: a) 1.33 mm; b) 2.02 mm; c) 2.42 mm; d) 2.84 mm; y e) 3.16 mm.

3.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE

En esta sección se presenta los resultados obtenidos después de realizar todos los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco según la norma ASTM G99-17, estos resultados incluyen la masa perdida o desgaste para los discos de acero SAE 3115 sin y con cementación, también se incluye el desgaste en las espigas de acero SAE O1. Aunque, es importante destacar que el propósito de la investigación es estudiar el efecto de la cementación con postratamiento térmico de temple y revenido del acero SAE 3115; también se incluyen las gráficas del coeficiente de fricción según la distancia de deslizamiento.

En las Tablas 3.2 - 3.5 se presentan las pérdidas de masa en gramos para los discos sin y con cementación postratamiento térmico de temple y revenido. Así, en la Fig. 3.1 se presenta las curvas de pérdidas de masa en donde se evidencia que los discos cementados con postratamiento térmico de temple y revenido presentan menor pérdida

de masa en comparación con los discos sin cementación para todas las condiciones de carga. Esto se debe al efecto del tratamiento termoquímico de cementación y del postratamiento térmico de temple y revenido realizado, lo cual endurece la superficie al incrementar el contenido de carbono y la transformación martensítica, mejorando la resistencia al desgaste.

Tabla 3.2. Valores de desgaste de discos de acero SAE 1020 sin cementar utilizando espiga de acero SAE O1 templada y revenida, con una distancia de recorrido de 2,000 m.

Nº	Carga, N	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida de masa, g	Pérdida de masa promedio, g	DE X10 ⁻⁴	Coef. de variación
1	10	149.3722	149.3595	0.0127	0.0131	4.00002	0.03053
2		146.5127	146.4996	0.0131			
3		143.7679	143.7544	0.0135			
4	15	145.5323	145.4971	0.0352	0.0352	0.4509	0.01280
5		145.556	145.5212	0.0348			
6		149.3177	149.2820	0.0357			
7	20	149.9502	149.9038	0.0464	0.0433	2.7209	0.0629
8		141.2513	141.2094	0.0419			
9		146.3735	146.3320	0.0415			

Tabla 3.3. Valores de desgaste de discos de acero SAE 1020 cementados con postratamiento térmico de temple y revenido utilizando espiga de acero SAE O1 templada y revenida, con una distancia de recorrido de 2,000 m.

Nº	Carga, N	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida de masa, g	Pérdida de masa promedio, g	DE X10 ⁻⁴	Coef. de variación
1	15	147.7518	147.7233	0.0285	0.0264	2.0551	0.0779
2		152.1833	152.1589	0.0244			
3		148.9972	148.9710	0.0262			
4	20	151.9497	151.9152	0.0345	0.0359	2.0648	0.0575
5		157.1647	157.1297	0.0350			
6		157.1958	157.1575	0.0383			
7	25	152.3041	152.2597	0.0444	0.0433	1.5503	0.0358
8		142.9527	142.9088	0.0439			
9		145.285	145.2435	0.0415			

Tabla 3.4. Valores de desgaste de espiga de acero SAE O1 templada y revenida sobre discos de acero SAE 1020 sin cementar, con una distancia de recorrido de 2,000 m.

N°	Carga, N	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida de masa, g	Pérdida de masa promedio, g	DE X10 ⁻⁴	Coef. de variación
1	10	2.3050	2.3043	0.0007	0.0007	5.507	0.75
2		2.2823	2.2810	0.0013			
3		2.2482	2.2480	0.0002			
4	15	2.3327	2.3325	0.0002	0.0017	12.741	0.76
5		2.2947	2.2924	0.0023			
6		2.2225	2.2200	0.0025			
7	20	2.2568	2.2530	0.0038	0.0037	3.606	0.09
8		2.3032	2.2999	0.0033			
9		2.3082	2.3042	0.0040			

Tabla 3.5. Valores de desgaste de espiga de acero SAE O1 templada y revenida sobre discos de acero SAE 1020 cementados con postratamiento térmico de temple y revenido, con una distancia de recorrido de 2,000 m.

N°	Carga, N	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida de masa, g	Pérdida de masa promedio, g	DE X10 ⁻⁴	Coef. de variación
1	15	2.2802	2.2781	0.0021	0.0022	1.000	0.045
2		2.2400	2.2377	0.0023			
3		2.2788	2.2766	0.0022			
4	20	2.2963	2.2951	0.0012	0.0038	23.713	0.618
5		2.2429	2.2417	0.0012			
6		2.2055	2.1997	0.0058			
7	25	2.3155	2.3110	0.0045	0.0034	8.144	0.241
8		2.2624	2.2596	0.0028			
9		2.2616	2.2573	0.0043			

Además, en la Fig. 3.6 se presenta que la pérdida de masa promedio es menor para los discos con cementación con postratamiento térmico de temple y revenido en comparación con los discos sin cementación para cada carga aplicada. La curva de los discos sin cementación tiene una pendiente más pronunciada, indicando una mayor sensibilidad al incremento de carga de metal base. Por otro lado, los discos cementados presentan una menor pendiente, no obstante, en este caso de material, no se puede dar una tendencia ya que en la medida que pierde material se llega a capas de material con menor dureza a consecuencia de la disminución del contenido de martensita y dureza de la misma por la disminución del contenido de carbono.

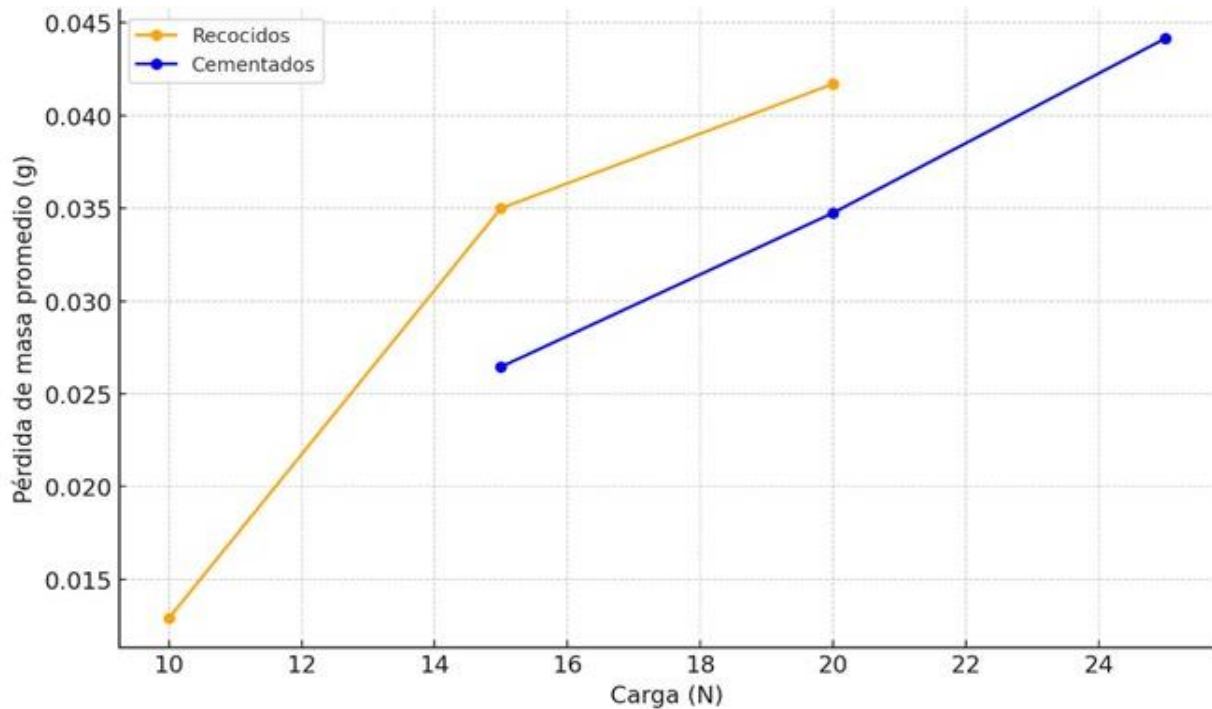


Fig. 3.6. Pérdida de masa para los discos de acero SAE 3115 sin y con cementación con PTT para 2,000 m de distancias recorrida en función de la carga aplicada.

En la Fig. 3.7 se presenta la gráfica del coeficiente de fricción vs distancia de deslizamiento entre discos de acero SAE 3115 sin y con cementación con PTT y espigas de acero SAE O1 ensayados a una carga de 15 N, en la cual se observa una clara diferencia en cuanto al módulo o coeficiente de fricción ya que el disco cementado presenta un valor de aproximadamente la unidad y en el espécimen sin cementación el coeficiente de fricción es menor, lo cual es coherente con lo esperado dado que al incrementar la dureza de la capa superficial se influye sobre el coeficiente de fricción. Así, la Fig. 3.8 se confirma esta suposición mostrando una diferencia notable en el coeficiente de fricción bajo condiciones similares de estudio comparados a una carga de 20 N.

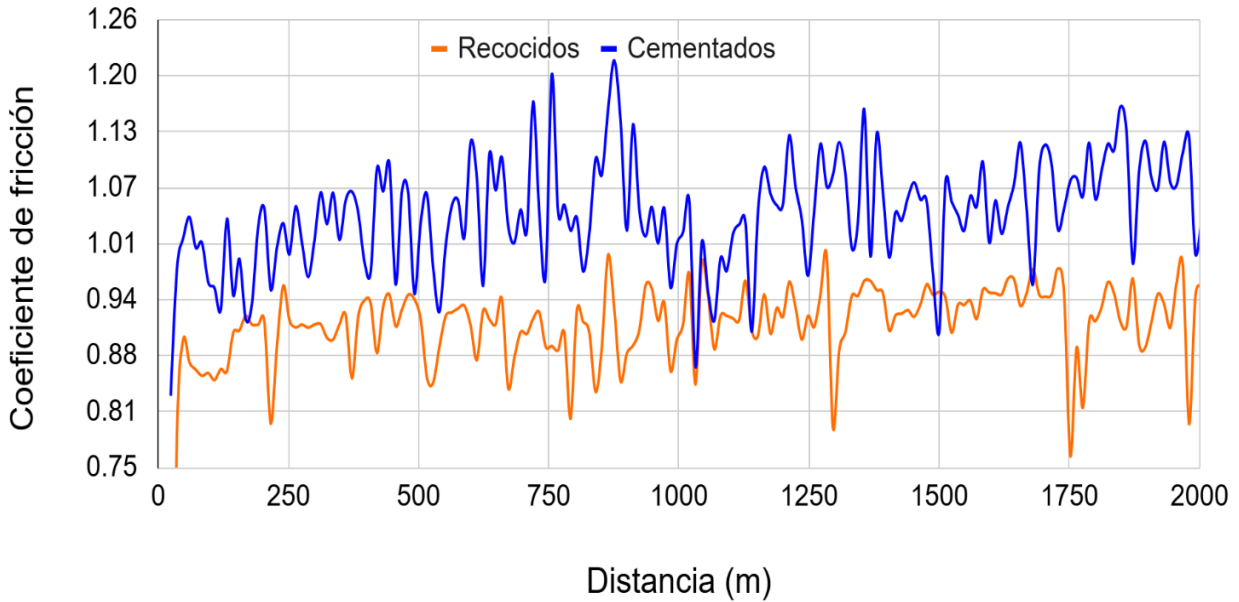


Fig. 3.7. Coeficiente de fricción para una misma carga de 15 N en especímenes con tratamiento térmico de recocido y con tratamiento termoquímico de cementación

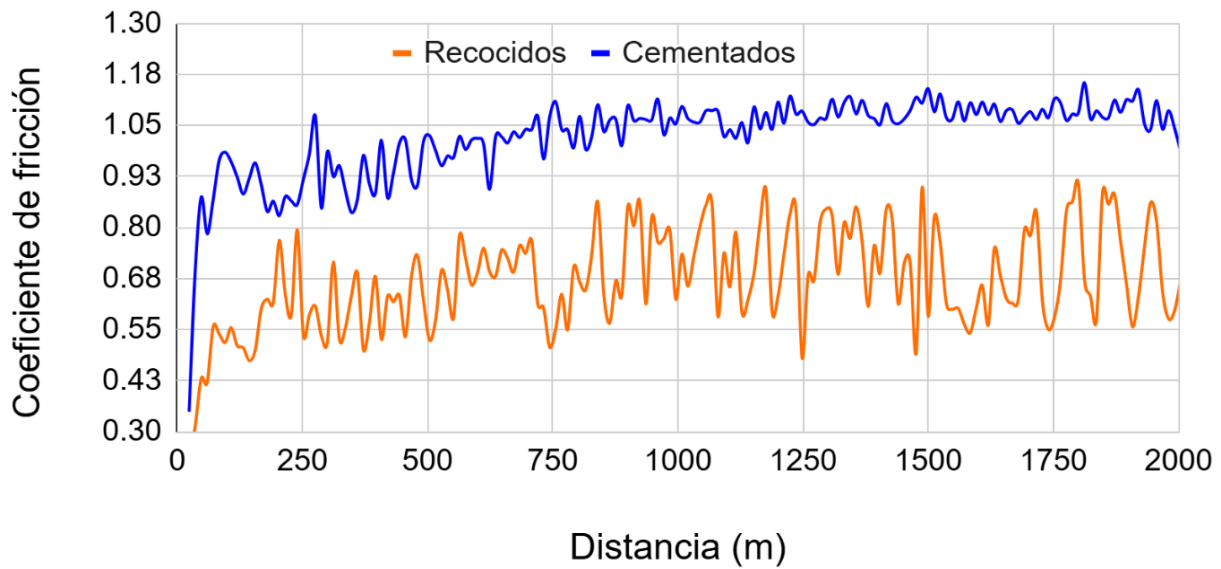


Fig. 3.8. Coeficiente de fricción para una misma carga de 20 N en especímenes con tratamiento térmico de recocido y con tratamiento termoquímico de cementación

3.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE DESGASTE

Desde el punto de vista estadístico, se observa que el desgaste promedio tiende a incrementar con la carga aplicada en ambos casos, aunque con variaciones en la dispersión de los resultados. El coeficiente de variación presentado en la Tabla 3.2 es más alto para la carga de 20 N (0.0629), lo que indica una mayor variabilidad en los resultados en comparación con cargas menores. En contraste, en la Tabla 3.3 se presenta para los discos tratados termoquímicamente, menores coeficientes de variación, destacando el caso de 25 N con 0.0358, lo que sugiere una mayor uniformidad en la pérdida de masa. Además, los valores de la desviación estándar multiplicada por $X10^{-4}$ reflejan diferencias en la dispersión de los resultados, donde los discos tratados termoquímicamente parecen presentar una mayor estabilidad en su comportamiento ante el desgaste.

Realizando una comparación entre los resultados obtenidos en esta investigación y los obtenidos en la investigación (Estudio de desgaste en un acero SAE 3115 sin y con cementación utilizando carbón vegetal de bálsamo templado y revenido. Universidad de El Salvador) revela una clara diferencia en la efectividad de los agentes cementantes. El carbón vegetal de café permitió alcanzar un espesor promedio de capa cementada de 3.51 mm, mientras que el carbón vegetal de bálsamo generó una capa significativamente menor, de apenas 1.532 mm [18].

El análisis de micro dureza Vickers (HV) a distintas profundidades refuerza contundentemente la superioridad del carbón vegetal de café como medio de cementación. Las muestras tratadas con este material alcanzaron valores de dureza superficial superiores a los 600 HV y mantuvieron niveles elevados de dureza hasta profundidades mayores (más de 3 mm), indicando una difusión más profunda y uniforme del carbono.

En contraste, las muestras tratadas con carbón vegetal de bálsamo mostraron una disminución más acelerada de la dureza conforme aumenta la profundidad, registrando valores inferiores a 320 HV a partir de los 2 mm.

3.5. ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

En las Figs. 3.9 - 3.14 se presentan los coeficientes de fricción desde los 0 hasta 2,000 m de deslizamiento, para los discos de acero SAE 3115 sin y con cementación con postratamiento de temple y revenido y espigas de acero O1 templadas y revenidas, aplicando cargas diferentes.

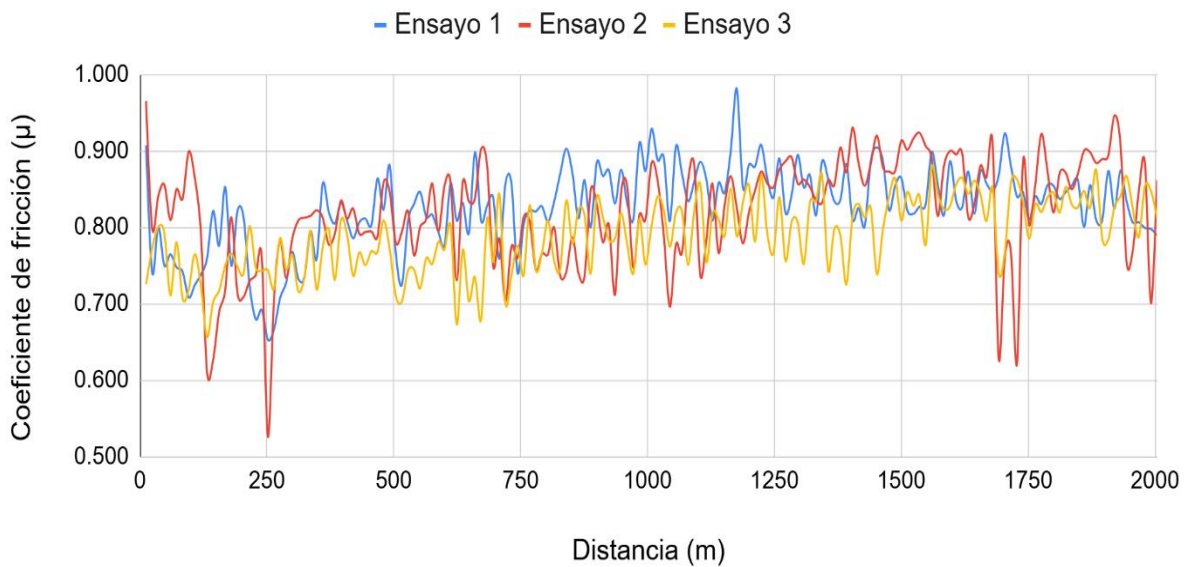


Fig. 3.9. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero SAE 3115 recocidos y espiga de acero SAE O1, con una misma carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

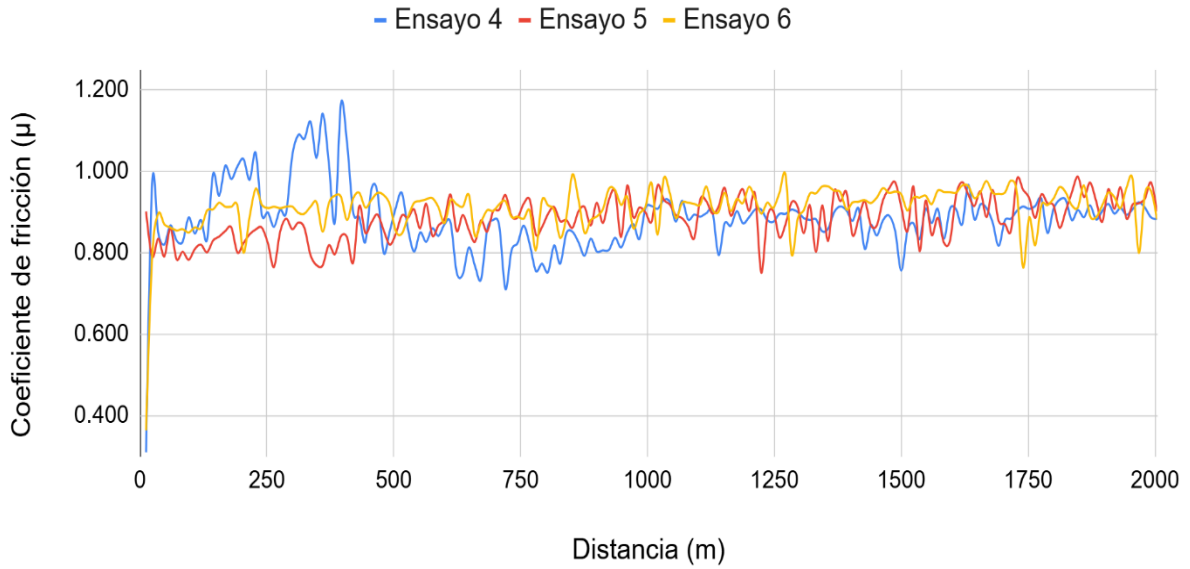


Fig. 3.10. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero SAE 3115 recocidos y espiga de acero SAE O1, con una misma carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

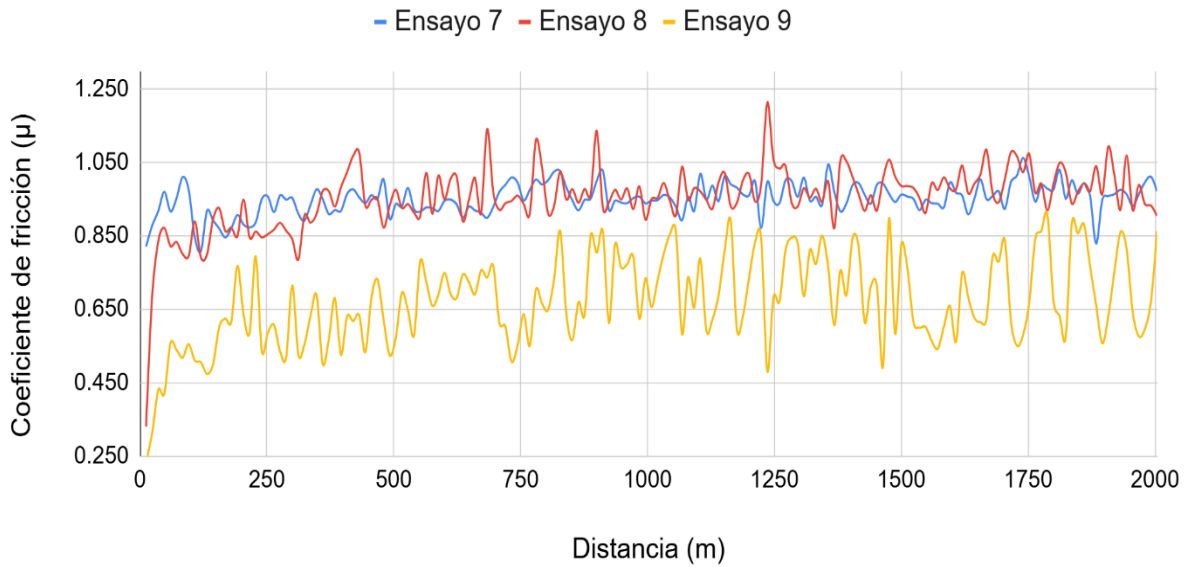


Fig. 3.11. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero SAE 3115 recocidos y espiga de acero SAE O1, a una carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

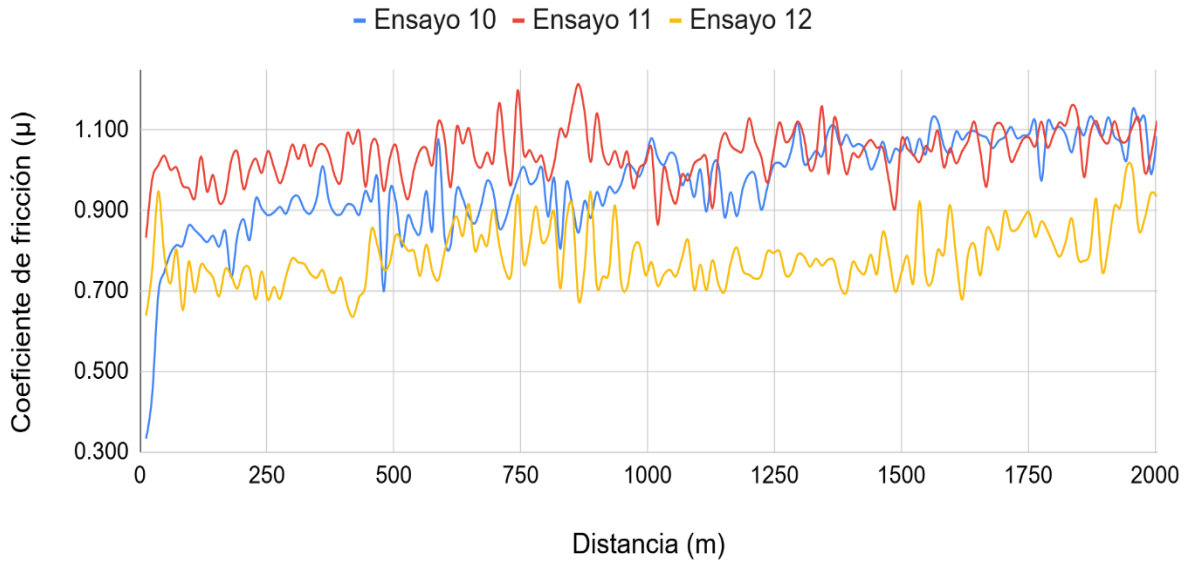


Fig. 3.12. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero SAE 3115 cementados y espiga de acero SAE O1, a una carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

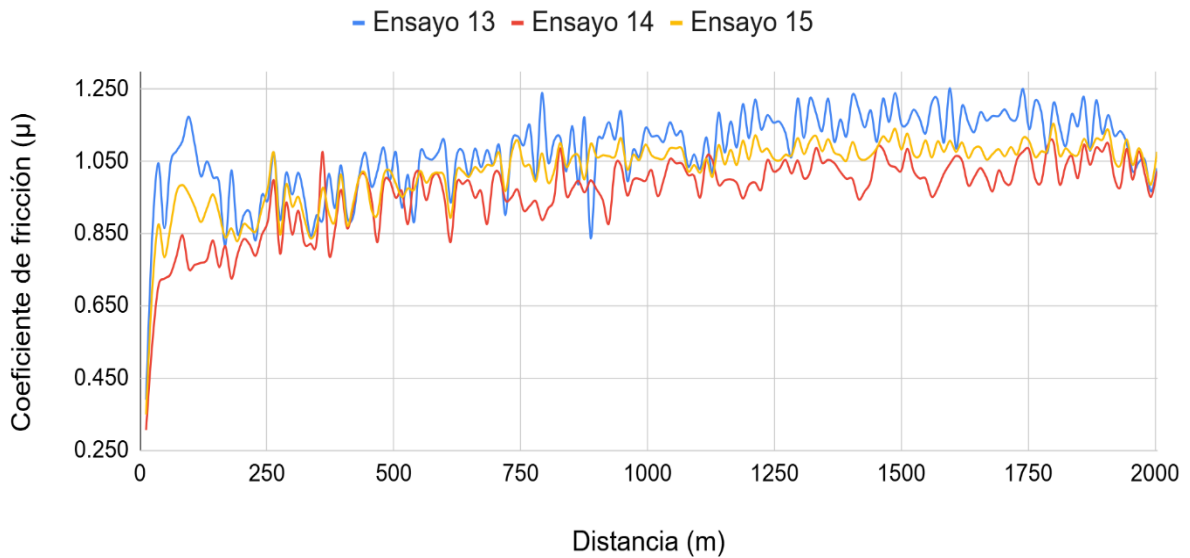


Fig. 3.13. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero SAE 3115 cementados y espiga de acero SAE O1, a una carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

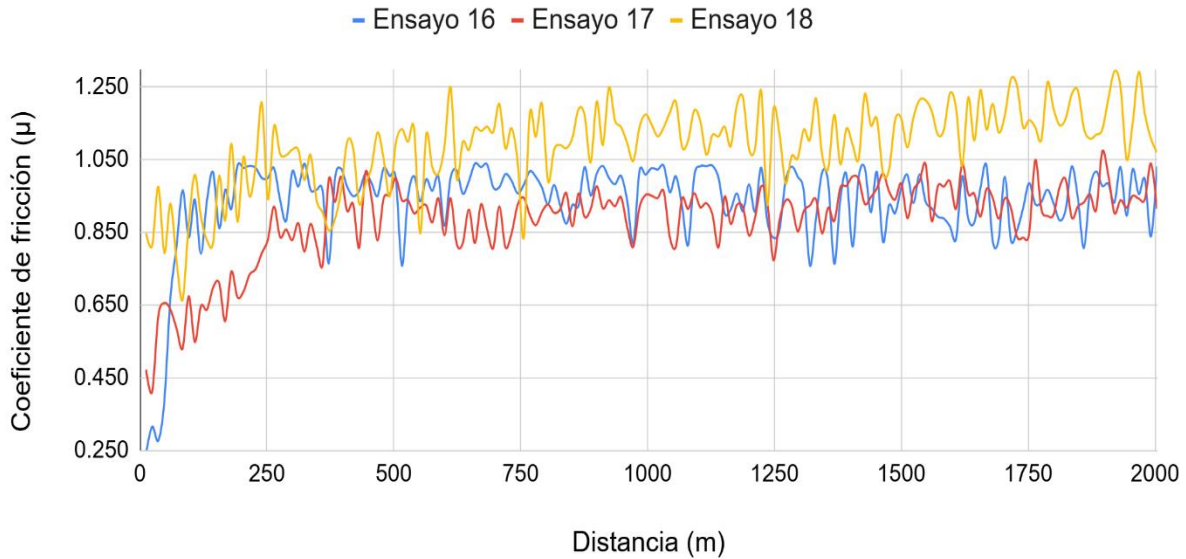


Fig. 3.14. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero SAE 3115 cementados y espiga de acero SAE O1, a una carga de 25N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

De las curvas presentadas en las Figs. 3.9 a 3.14 se presenta en la mayoría de los casos una clara tendencia del incremento del coeficiente de fricción desde los 0 hasta 500 m de deslizamiento; en diversos casos se observa que incrementa un poco más hasta los 1,000 m, aunque se mantuvo fluctuante, con tendencia al alza en el primer intervalo descrito. Se observa para el intervalo desde 1,000 hasta 2,000 m que en la mayoría de los ensayos el valor del coeficiente de fricción se mantiene en un rango constante, con crestas y valles puntuales en algunos casos, aunque siempre con una tendencia a mantener valores no muy distantes entre sí.

En las Tablas 3.6 y 3.7 se presentan los valores promedio de coeficiente de fricción obtenidos para cada ensayo según las diversas variables aplicables para cada uno de los ensayos de desgaste. Además, en la misma Tabla 3.6 se presenta que el coeficiente de fricción para un disco cementado SAE 3115 y una espiga de acero SAE O1 es mayor al coeficiente de fricción entre un disco recocado y una espiga de los mismos materiales. También, se observa, un promedio en el coeficiente de fricción de 0.97 para los discos de acero SAE 3115 sin cementación y espigas de acero O1 templadas y revenidas (ver Tabla 3.6), y un coeficiente de fricción de 0.85 para los discos de acero SAE 3115 con cementación con postratamiento de temple y revenido y espigas de acero O1 templadas y revenidas (ver Tabla 3.7).

Tabla 3.6. Coeficientes de fricción entre discos de acero SAE 3115 y espiga de acero SAE O1 para una distancia de deslizamiento de 2,000 m a diferentes cargas.

N°	Cargas, N	Promedio de coeficiente de fricción (por ensayo)	Promedio de coeficiente de fricción	Desviación estándar
1	10	0.8277	0.8125	0.0203
2		0.8202		
3		0.7895		
4	15	0.8831	0.8927	0.0159
5		0.8841		
6		0.9111		
7	20	0.9519	0.8596	0.1621
8		0.9544		
9		0.6724		

Tabla 3.7. Coeficientes de fricción entre discos de acero SAE 3115 cementados y espiga de acero SAE O1 para una distancia de deslizamiento de 2,000 m a diferentes cargas.

N°	Cargas, N	Promedio de coeficiente de fricción (por ensayo)	Promedio de coeficiente de fricción	Desviación estándar
1	15	0.9680	0.9311	0.1312
2		1.0399		
3		0.7854		
4	20	1.0800	1.0217	0.0592
5		0.9616		
6		1.0235		
7	25	0.9364	0.9703	0.1071
8		0.8842		
9		1.0901		

Sobre la base de los resultados obtenidos mediante los ensayos de desgaste, se concluye que el coeficiente de fricción se verá afectado por las condiciones del ensayo y del desarrollo de este; aunque es evidente que la resistencia al desgaste se incrementa con un acero SAE 3115 cementado, con menor pérdida de masa para las mismas condiciones.

CONCLUSIONES

- ✓ Que el tratamiento termoquímico de cementación con postratamiento térmico de temple y revenido a 200 °C aplicado al acero SAE 3115 es un método efectivo para incrementar la resistencia al desgaste en comparación con el material base. Esto se evidencia en la menor pérdida de masa de los discos cementados, lo que indica que el endurecimiento superficial generado por la cementación contribuye a una mayor resistencia ante la fricción y el desgaste mecánico.
- ✓ Que el comportamiento del coeficiente de fricción presentó una tendencia al incremento desde los 0 hasta los 500 m de deslizamiento, con fluctuaciones, aunque manteniendo una tendencia al alza en este intervalo inicial. Este fenómeno se puede explicar por el proceso de adaptación y acoplamiento entre las superficies en contacto durante las primeras fases del ensayo, donde el material más duro genera partículas que permanecen en la interfaz, aumentando el coeficiente de fricción hasta que se alcanza un estado más estable en la interacción de las superficies.
- ✓ Que el incremento de dureza logrado mediante el tratamiento termoquímico de cementación se verificó de manera satisfactoria a través de las mediciones de microdureza Vickers. El acero SAE 3115 en su estado de suministro presentaba valores entre 286 y 344 HV, mientras que las muestras cementadas alcanzaron durezas promedio de 495.08 HV en la muestra 1 y 432.8 HV en la muestra 2. La variabilidad entre estas muestras se puede atribuir a factores como la posición dentro de la caja de cementación, las condiciones del postratamiento térmico aplicado y la preparación previa al tratamiento.
- ✓ Que la dureza incrementada por el tratamiento termoquímico influye en la resistencia al desgaste y en el coeficiente de fricción, dado que el material más duro genera partículas más resistentes y difíciles de desprender durante el desgaste, provocando un comportamiento más abrasivo en la fricción. Este efecto era esperado, ya que el endurecimiento superficial generado por la cementación modifica las propiedades

mecánicas del material, aumentando su capacidad de soportar esfuerzos de contacto y fricción sin perder material de manera significativa.

- ✓ Que el proceso de cementación generó una capa endurecida con características homogéneas y resistentes al desgaste, lo que sugiere que la selección de la mezcla carburante y el tiempo de tratamiento fueron adecuados para lograr un incremento en la dureza superficial del material. Sin embargo, la diferencia en dureza entre las muestras sugiere que la distribución del endurecimiento se puede ver influenciada por factores operativos durante el tratamiento térmico.

- ✓ Que este tratamiento representa una alternativa viable para aplicaciones en las que se requiere una mayor resistencia al desgaste y una reducción en la pérdida de masa por fricción.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Leyensetter, A., & Württemberg, G. (1987). Tecnología de los oficios metalúrgicos. Reverté. España.
- [2] Appold, H. (1984). Tecnología de los metales para profesiones técnico-mecánicas. Alemania: Reverté.
- [3] Apraiz Barreiro, J. (1982). Aceros especiales y otras aleaciones. (Madrid), Dossat Editorial.
- [4] Lajtín Yu, & Arzamásov B. (s. f.). Tratamiento quimicotérmico de los metales (MIR MOSCÚ URRS).
- [5] Apraiz Barreiro, J. (1975). Aceros de cementación. (Madrid), Dossat Editorial.
- [6] Sarkar, A.D. (1990). Desgaste de Metales. México D.F.; México: Limusa.
- [7] Archard, J.F. (1957). Proceedings of the Royal Society A.
- [8] Halling, J. (1975). Principles of Tribology. The Macmillan Press.
- [9] Greenwood, J.A. & Williamson, J.B. (1966). Proceedings of the Royal Society A.
- [10] Avner, S.H. (1966). Introducción a la metalurgia física.
- [11] Blau, P.J. (1992). ASM Handbook, Friction, Lubrication, and Wear Technology (Vol. 18).
- [12] Aceros de cementación: Aceros de Llodio (Bilbao): Ediciones Urmo, (1975).
- [13] Hackermechanico. (2014, 27 abril). Ensayos de desgaste. <https://hackermechanico.com/2009/02/09/ensayos-de-desgaste/>
- [14] Giolitti, F., Richards, J.W., & Rouiller, C.A. (1915). The Cementation of Iron and Steel translated from the Italian by Joseph W. Richards and Chas. A.
- [15] Artiga Domínguez, J.C., Hernández Galdámez, L.M., y Mezquita Salazar, D.V. (2002). Elaboración de un manual para la selección de variables del proceso de cementación sólida. Universidad de El Salvador. El Salvador. <https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/32854/>
- [16] Normative ASTM, American Society for Testing and Materials, G99-17 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus
- [17] García Ramírez, G.R. (2017). Estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, utilizando un acero 1020 cementado y un acero O1. Universidad de El Salvador. El Salvador. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/15155/>
- [18] 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.