

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



CURSO DE ESPECIALIZACIÓN: INGENIERÍA DE SUPERFICIES

**ESTUDIO DE DAÑO ACUMULADO EN ACERO SAE 1020
CON CEMENTACIÓN UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL DE
BÁLSAMO**

PRESENTADO POR:
**DIDIER ALESSANDRO GONZÁLEZ SALAZAR
DIEGO ALEJANDRO RIVAS ZAVALETA
FERNANDO JOSÉ SÁNCHEZ CALDERÓN**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 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: INGENIERÍA DE SUPERFICIES

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

Título:

**ESTUDIO DE DAÑO ACUMULADO EN ACERO SAE 1020
CON CEMENTACIÓN UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL DE
BÁLSAMO**

Presentado por:

**DIDIER ALESSANDRO GONZÁLEZ SALAZAR
DIEGO ALEJANDRO RIVAS ZAVALETA
FERNANDO JOSÉ SÁNCHEZ CALDERÓN**

Trabajo de Aplicación aprobado por:

Docente asesor:

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, febrero 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 DAÑO ACUMULADO EN ACERO SAE 1020 CON CEMENTACIÓN UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL DE BÁLSAMO

Estudiantes: Brs. Didier Alessandro González Salazar¹, Diego Alejandro Rivas Zavaleta² y Fernando José Sánchez Calderón³
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 investigado el fenómeno de daño acumulado por fatiga en flexión rotativa en un acero SAE 1020 sometido a cementación sólida utilizando una mezcla de carbón vegetal de bálsamo y carbonato de bario. Así, las probetas se trataron térmicamente mediante temple y revenido a bajas temperaturas. El análisis se basó en la ley de Palmgren-Miner, considerando dos bloques de esfuerzo alternante, evaluados tanto en forma ascendentes como descendentes. Además, se analizaron dos periodos diferentes de duración para los primeros bloques de esfuerzo alternante. Como resultado del tratamiento de cementación, se logró obtener un espesor promedio de capa cementada de aproximadamente 2 mm. Los ensayos de daño acumulado por fatiga revelaron que, al aplicar la secuencia ascendente de esfuerzos alternante, los valores obtenidos mediante la ley de Palmgren-Miner fueron mayores que 1. Contrario a lo anterior, cuando se utilizó la secuencia descendente de esfuerzos alternante, los valores resultaron ser menores que 1. Este comportamiento se explica porque al iniciar las pruebas con esfuerzos alternante bajos se reduce la probabilidad de nucleación de grietas por fatiga, mientras que, al iniciar con los esfuerzos alternante altos, la nucleación de grietas por fatiga se ve significativamente favorecida.

Palabras claves: Fatiga, Daño acumulado por fatiga, Ley de Palmgren. Miner, Resistencia a la fatiga, Vida a la fatiga.

1 E-mail: d.alessandro.gs26@gmail.com

2 E-mail: zavaletadiego20@gmail.com

3 E-mail: fernando.sanchez.c1932@gmail.com

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

DEDICATORIA

Este trabajo de aplicación está dedicado a:

Mis padres:

Nelson de Jesús González Espadero y Sandra Patricia Salazar Cea.

Mis hermanos:

Mercedes Espadero, Bryan Steve Linares.

Mi tía:

Maritza Carolina de Sermeño Salazar.

Mi abuela:

Rosa Delia Espadero “Mama Rosa” (Q.E.P.D).

Didier Alessandro

DEDICATORIA

Este trabajo de aplicación está dedicado a:

Mis padres:

Loida Eunice Zavaleta Urquilla y José Adalberto Rivas Sánchez.

Mis abuelos:

Vilma del Carmen Urquilla de Zavaleta y José Antonio Zavaleta Reyes.

Mentores:

Lic. Liliana Valles y Ing. Salvador Escobar.

Mi amiga:

Angela Alejandra Hernández Crespín.

Diego Alejandro

DEDICATORIA

Este trabajo de aplicación está dedicado a:

Mi padre:

José Manuel Sánchez García.

Mis abuelos:

Teodoro Sánchez Hernández y Martina García de Sánchez “Mamá Tita”.

Mi hermana:

María José Sánchez Calderón.

Pareja:

Michelle Alejandra López López.

Fernando José

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, por haberme ayudado a finalizar esta carrera, por la bendición de seguir viviendo, por permitirme levantarme y continuar adelante después de cada tropiezo, gracias a él y sus bendiciones estoy terminando una etapa de mi vida.

Agradezco profundamente a mis padres, quienes, con su amor incondicional, apoyo constante, su paciencia y ánimo en los instantes difíciles y valores inculcados desde mi infancia, han sido mi mayor fortaleza. Sus palabras de aliento, su comprensión y su fe en mí ha sido el motor que me impulsó a alcanzar este logro.

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

Expreso mi sincero agradecimiento a mis catedráticos y mentores, especialmente a nuestro asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, cuya guía, conocimiento y paciencia han sido esenciales en la elaboración de este trabajo. Sus valiosas orientaciones no solo enriquecieron este trabajo, sino también mi formación personal y profesional.

A mis hermanos, quienes estuvieron a mi lado en los instantes de incertidumbre y cansancio, ofreciéndome siempre una palabra de ánimo, un oído dispuesto y su incondicional amistad. Gracias por recordarme que los grandes retos siempre son más llevaderos con buenos compañeros de vida.

También, a todas las personas que de manera directa o indirecta contribuyeron a su realización.

Finalmente, 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.

A todos ustedes, mi gratitud eterna.

Didier Alessandro

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, por su constante presencia y guía a lo largo de este camino. Por brindarme la fortaleza y la claridad necesarias para superar cada desafío y avanzar con determinación.

A todos mis mentores a lo largo de mi carrera universitaria, expreso mi gratitud por haber compartido sus conocimientos y experiencias conmigo. Cada uno de ellos, con sus enseñanzas, y su pasión por la educación ha inspirado mi compromiso y deseo de seguir aprendiendo y mejorando cada día.

Quiero agradecer de manera especial a la Universidad de El Salvador por brindarme la oportunidad de formarme en sus aulas y por ser un faro de conocimiento y crecimiento. Este lugar no solo ha sido un espacio de aprendizaje, sino también un hogar en el que desarrollé habilidades, valores y amistades que atesoraré por siempre.

A mis compañeros de grupo, Fernando Sánchez y Didier González, les agradezco por compartir este camino lleno de desafíos y logros. Su colaboración, su disposición para trabajar en equipo y su apoyo en los instantes difíciles han hecho que este proceso sea mucho más enriquecedor y llevadero.

A mis padres, Loida Zavaleta y José Rivas, gracias por su amor incondicional, por su ejemplo de perseverancia y por su constante apoyo en cada paso de mi vida. Ustedes han sido mi fuente de motivación, alentándome siempre a seguir adelante en los instantes más difíciles. A mis abuelos, Vilma de Zavaleta y José Zavaleta, les agradezco por su amor y enseñanzas que han moldeado mis valores y mi carácter. Sus sacrificios y esfuerzo han hecho posible que hoy pueda cumplir este sueño.

Al Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, nuestro asesor, mi más sincero y profundo agradecimiento, por su invaluable apoyo y dedicación durante todo el proceso de esta investigación. Sus conocimientos, su atención a los detalles y su incansable disposición para guiarme han sido fundamentales en la culminación de este trabajo.

Finalmente, 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.

A todos ustedes, mi gratitud eterna por ser la fuerza detrás de cada logro y por brindarme el apoyo que me permitió llegar hasta aquí.

Diego Alejandro

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia, tanto como a mi papá y a mis abuelos que siempre me apoyaron, me motivaron a lo largo de la carrera por más pesado que fuera el camino, les agradezco por todos sus consejos de vida y por guiarme a lo largo de mi vida en no tomar un mal camino y siempre superarme a mí mismo.

A todos los docentes que tuve a lo largo de mi carrera, por todas las enseñanzas, ya que lo aprendido es algo valioso que nadie puede quitarme y poder ejercerlo en la práctica.

A mis compañeros de estudio, quienes me brindaron su apoyo y ayuda en cada instante, siempre estar con todos los ánimos de avanzar este trabajo y enseñarnos mutuamente todo lo que hemos aprendido a lo largo del tiempo que llevamos de conocernos. Gracias por las largas horas de trabajo en equipo, las palabras de aliento y las discusiones académicas que enriquecieron mi aprendizaje.

Gracias a mi pareja por siempre ayudarme y apoyarme en todas las noches y madrugada para poder llegar a tiempo a mi destino, siempre dándome ánimos y ayudando a memorizar lo necesario para superar todas mis pruebas, por hacerme los días más entretenidos.

Gracias a todos mis amigos por estar siempre conmigo y alegrarme cuando me sentía sin ganas de nada, por darme un buen impulso y recordarme que no existe la palabra “rendirse” en nuestro círculo social.

A todos los compañeros de trabajo del Ingeniero Central de Izalco, Sonsonate, quienes me enseñaron el uso de las herramientas y teoría básica del funcionamiento de las máquinas y los métodos de seguridad, me ayudaron en tener agilidad en los equipos y mejorar mi propio criterio en la toma de decisiones ante un problema.

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y la guía del Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, agradezco por su paciencia, sus consejos valiosos y experiencia, que ha sido fundamentales en la realización de este trabajo.

Finalmente, 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. A la Universidad de El Salvador por el entorno adecuado para desarrollar esta investigación.

Fernando José

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. GENERALIDADES DE LOS TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS	3
1.2. PROCESOS DE CEMENTACIÓN	9
1.2.1. CEMENTACIÓN SÓLIDA.....	10
1.2.2. CEMENTACIÓN LÍQUIDA.....	12
1.2.3. CEMENTACIÓN GASEOSA	13
1.2.4. CEMENTACIÓN CON PASTA	15
1.3. ACEROS PARA CEMENTACIÓN.....	17
1.4. ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS CAPAS CEMENTADAS	23
1.5. POST-TRATAMIENTOS TÉRMICOS	25
1.6. FATIGA Y DAÑO ACUMULADO POR FATIGA EN PIEZAS CEMENTADAS	27
1.6.1. REGLA DEL DAÑO ACUMULADO POR FATIGA.....	31
1.6.2. ANÁLISIS DE FATIGA	33
A) Método de Palmgren-Miner de daño acumulado por fatiga	33
1.6.3. TEORÍAS Y MODELOS DE DAÑO ACUMULADO POR FATIGA	34
1.7. MODOS DE FALLA	36
1.7.1. CLASIFICACIÓN DE LAS FALLAS	37
1.7.2. ANÁLISIS DE FALLAS.....	38
1.8. MODOS DE FRACTURA.....	38
1.8.1. FRACTURA FRÁGIL.....	40
1.8.2. FRACTURA DÚCTIL.....	41
1.9. LEY FORESTAL DE EL SALVADOR.....	41
1.9.1. APROVECHAMIENTO DE BOSQUES NATURALES.....	42
1.9.2. APROVECHAMIENTO POR CAUSAS NATURALES.....	42
1.9.3. APROVECHAMIENTOS ILÍCITOS.....	43
1.9.4. APROVECHAMIENTOS PERMITIDOS.....	43
1.9.5. OBLIGACIÓN DE PROBAR ORIGEN DE MADERA	43
1.9.6. USO RESTRINGIDO.....	44
1.9.7. COMPETENCIA SANCIONATORIA.....	45
2. DISEÑO EXPERIMENTAL	47
2.1. FLUJOGRAMA DE LA METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	47
2.2. DIMENSIONAMIENTO DE PROBETAS	49
2.3. MAQUINADO DE PROBETAS.....	49
2.4. CONDICIONES EXPERIMENTALES DE TRABAJO	51

2.5. DISEÑO DE CAJA.....	54
2.6. PROCESO DE CEMENTACION.....	56
2.6.1. ETAPAS DE LA CEMENTACION.....	57
2.7. DISEÑO DE ENSAYO DE FATIGA POR FLEXIÓN ROTATIVA	64
2.7.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....	64
2.7.2. FUNCIONAMIENTO Y USO DE LA MÁQUINA	65
2.7.3. PARAMETROS DEL ENSAYO.....	66
2.8. DISEÑO DE ENSAYO DE DAÑO ACUMULADO POR FATIGA	69
2.9. ESTUDIO FRACTOGRÁFICO	69
2.10. ANÁLISIS METALOGRÁFICO	70
2.10.1. PREPARACION DE PROBETAS	70
2.11. MEDICION DE LA CAPA CEMENTADA.....	74
2.12. DETERMINACIÓN DE MICRO DUREZA.....	75
3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	77
3.1. ENSAYOS DE FATIGA.....	77
3.1.1. DETERMINACION DE RESISTENCIA A LA FATIGA EN PROBETAS SIN CEMENTAR.....	78
3.1.2. DETERMINACION DE RESISTENCIA A LA FATIGA EN PROBETAS CEMENTADAS	79
3.1.3. ENSAYOS DE DAÑO ACUMULADO POR FATIGA.....	80
3.2. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO	82
3.3. RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA.....	87
3.4. RESULTADOS DE ENSAYO METALOGRÁFICO	89
3.4.1. ESPESOR DE LA CAPA CEMENTADA.....	89
3.3.2. MICROESTRUCTURA RESULTANTE.....	92
CONCLUSIONES.....	95
BIBLIOGRAFÍA	97

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Aceros de cementación del Instituto del Hierro y del Acero.....	..20
Tabla 1.2. Aceros de uso normal en Estados Unidos.....	..21
Tabla 2.1. Proceso de la fabricación de probetas para ensayos de fatiga por daño acumulado por fatiga.....	..49
Tabla 2.2. Composición química del acero SAE 1020.....	50
Tabla 3.1. Resultado de los ensayos de fatiga a probetas de metal base para determinar la resistencia a la fatiga de un acero SAE 1020.....	..78
Tabla 3.2. Resultado de los ensayos de fatiga a probetas cementadas para determinar la resistencia a la fatiga de un acero SAE 1020.....	..79
Tabla 3.3. Resultados de ensayos de fatiga aplicando dos bloques de esfuerzos alternante descendentes el primero a alto esfuerzo (340 MPa) durante 25% de la vida y luego ensayada a bajo esfuerzo (260 MPa) hasta la fractura.....	..80
Tabla 3.4. Resultados de ensayos de fatiga aplicando dos bloques de esfuerzos alternantes descendentes el primero a alto esfuerzo (340 MPa) durante 50% de la vida y luego ensayada a bajo esfuerzo (260 MPa) hasta la fractura.....	..81
Tabla 3.5. Resultados de ensayos de fatiga aplicando dos bloques de esfuerzos ascendentes el primero a bajo esfuerzo (260 MPa) durante 25% de la vida y luego ensayada a alto esfuerzo (340 MPa) hasta la fractura.....	..81
Tabla 3.6. Resultados de ensayos de fatiga aplicando dos bloques de esfuerzos ascendentes el primero a bajo esfuerzo (260 MPa) durante 50% de la vida y luego ensayada a alto esfuerzo (340 MPa) hasta la fractura.....	..81
Tabla 3.7. Resultados de los ensayos de dureza Knoop para las muestras cementadas.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Principios de tratamientos termoquímicos [5].....	4
Fig. 1.2. Caja para cementar con carburante sólido [10]. Cotas en mm.....	.11
Fig. 1.3. Diagramas de equilibrio de la atmósfera endotérmica con carbono: a) Regulación según el punto de rocío; y b) según el bióxido carbónico CO ₂ [10].....	14
Fig. 1.4. Diversos post-tratamientos térmicos para aceros cementados [13].....	.25
Fig. 1.5. Engrane apropiadamente cementado, endurecido y revenido, atacado químicamente con Nital al 2% [13].....	.27
Fig. 1.6. Estado de esfuerzo sin patrón cíclico [26].....	.33
Fig. 1.7. Sucesión de bloques (obtenido mediante método de cómputo de ciclos) equivalente al estado de esfuerzo de la Fig. 1.6 [26].....	.34
Fig. 1.8. Ejemplo en un elemento de daño [27].....	.35
Fig. 1.9. Diagrama de una fisura [30].....	.39
Fig. 2.1. Flujograma de actividades para el desarrollo del experimento.....	.48
Fig. 2.2. Dimensiones de probetas para ensayos de fatiga y daño acumulado [33]. Cotas en mm.....	.49
Fig. 2.3. Vista superior de la caja de cementación terminada: a) Vista con tapa puesta; y b) vista sin tapa.....	.55
Fig. 2.4. Distribución de probetas dentro de la caja de cementación.....	.56
Fig. 2.5. Limpieza de probetas previo a la cementación en inmersión completa en solución al 5% soda caustica de inmersión completa: a) vista frontal; y b) vista de planta.....	.57
Fig. 2.6. Pesaje de carbón vegetal y carbonato de bario en una báscula digital.....	.58
Fig. 2.7. Colocación del primer grupo de probetas: a) primer nivel inferior descansando sobre la primera capa de carbón vegetal; y b) caja una vez cubierta en su totalidad.59
Fig. 2.8. Caja de cementación completamente sellada con arena de fundición: a) Vista superior; y b) vista lateral.....	.60
Fig. 2.9. Inicio de tratamiento termoquímico de cementación en probetas durante 8 h a 950 °C: a) colocación de caja de cementación dentro del horno; y b) instantes antes de sellar el horno.....	.60
Fig. 2.10. Perforación de probetas: a) Taladrado; y b) grupo de 8 probetas sujetas con alambre de amarre previo al tratamiento térmico.....	.61
Fig. 2.11. Cámara de acero inoxidable con gas inerte de argón utilizado para realizar los tratamientos térmicos: a) vista de perfil; y b) vista superior.....	.62
Fig. 2.12. Inserción del primer grupo de probetas: a) Cámara de acero inoxidable para el temple; y b) monitoreo de temperatura durante el proceso mediante termómetro digital.....	.62
Fig. 2.13. Instantes antes de sumergir las probetas por completo en aceite.....	.63
Fig. 2.14. Tratamiento térmico de revenido en probetas a 200 °C.....	.63
Fig. 2.15. Probetas lijadas hasta 1,500 con acabado tipo espejo sumergidas en aceite.....	.64

	Pág.
Fig. 2.16. Máquina para ensayos de fatiga por flexión rotativa marca GUNT modelo WP 140 [33].	.65
Fig. 2.17. Montaje para el ensayo [33].	.66
Fig. 2.18. Lupa estereoscópica utilizada para realizar el estudio fractográfico.	.70
Fig. 2.19. Corte de la muestra con disco abrasivo: a) Máquina cortadora; y b) posición de la probeta previo al corte.	.71
Fig. 2.20. Muestras embutidas.	.72
Fig. 2.21. Mesa lijadora de muestras metalográficas	.73
Fig. 2.22. Máquina pulidora utilizada para el tratamiento de muestras metalográficas: a) Perspectiva frontal; y b) proceso de pulido en curso utilizando alúmina como abrasivo.	.73
Fig. 2.23. Microscopio para análisis metalográfico: a) Vista completa del microscopio, mostrando su estructura y componentes principales; y b) muestra preparada para el análisis bajo el microscopio.	.74
Fig. 2.24. Máquina de ensayo de microdureza Innova-test, modelo VERZUS 750CCD: a) Vista lateral, donde se aprecian el diseño y los componentes principales; y b) vista de perfil, mostrando la interfaz y la zona de ensayo.	.76
Fig. 3.1. Resultados de los ensayos de fatiga en probetas sin cementar.	.78
Fig. 3.2. Gráfica de los resultados de los ensayos de fatiga en probetas cementadas.	.79
Fig. 3.3. Macrografías de una probeta de acero SAE 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa a alto esfuerzo (340 MPa): a) Vista de planta; y b) probeta inclinada.	.82
Fig. 3.4. Macrografías de una probeta de acero SAE 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa a bajo esfuerzo (260 MPa): a) Vista de planta; y b) probeta inclinada.	.82
Fig. 3.5. Macrografías de una probeta de acero SAE 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa a alto esfuerzo (340 MPa): a) Vista de planta; y b) probeta inclinada $\approx 45^\circ$.	.83
Fig. 3.6. Macrografías de una probeta de acero SAE 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa a bajo esfuerzo (260 MPa): a) Vista de planta; y b) probeta inclinada $\approx 45^\circ$.	.83
Fig. 3.7. Macrografías de probeta de acero SAE 1020 sometida a dos bloques de esfuerzos alternantes ascendentes; el primero a bajo esfuerzo durante 25% de la vida encontrada y luego se aplicó el otro bloque a alto esfuerzo hasta que falló la probeta: a) Vista de planta; y b) probeta inclinada $\approx 45^\circ$.	.84
Fig. 3.8. Macrografías de probeta de acero SAE 1020 sometida a dos bloques de esfuerzos alternantes ascendentes; el primero a bajo esfuerzo durante 50% de la vida encontrada y luego se aplicó el otro bloque a alto esfuerzo hasta que falló la probeta: a) Vista de planta; y b) probeta inclinada $\approx 45^\circ$.	.84
Fig. 3.9. Macrografías de probeta de acero SAE 1020 sometida a dos bloques de esfuerzos alternantes descendentes; el primero a alto esfuerzo durante 25% de la vida encontrada y luego se aplicó el otro bloque a bajo esfuerzo hasta que falló la probeta: a) Vista de planta; y b) probeta inclinada $\approx 45^\circ$.	.85
Fig. 3.10. Macrografías de probeta de acero SAE 1020 sometida a dos bloques de esfuerzos alternantes descendentes; el primero a alto esfuerzo durante 50% de la vida encontrada y luego se aplicó el otro bloque a bajo esfuerzo hasta que falló la probeta: a) Vista de planta; y b) probeta inclinada $\approx 45^\circ$.	.85

	Pág.
Fig. 3.11. Representación del recorrido de las huellas tomadas en ensayo de dureza Knoop en probeta cementada.....	.87
Fig. 3.12. Gráfica de los ensayos de dureza Knoop promediados, realizados a 3 probetas cementadas88
Fig. 3.13. Marcas de indentaciones del ensayo Knoop en tres muestras, donde la marca superior se encuentra en la capa superficial y la marca inferior cerca del núcleo, evidenciando la variación de dureza a través del material.....	.89
Fig. 3.14. Ubicación de las micrografías tomadas para las probetas sometidas a recocido a 100x.....	.90
Fig. 3.15. Análisis de microestructura en capa cementada en programa ImageJ91
Fig. 3.16. Mosaico de fotos de la microestructura a un aumento de 100x de la capa cementada sin PTT92
Fig. 3.17. Ubicación de las micrografías tomadas para las probetas sometidas a recocido con lente de 500x de aumento93
Fig. 3.18. Micrografía de tamaño de grano de primera muestra cementada en: a) Posición 1; b) posición 2, c) posición 3; d) posición 4, e) posición 5; y f) posición 6.....	.93

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- A_{c1} : Temperatura crítica inferior
- A_{c3} : Temperatura crítica superior
- AISI: Instituto Americano de Hierro y Acero
- ASME: Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
- ASTM: Sociedad Americana de Pruebas y Materiales
- DLDR: Regla de Daño Doble Lineal
- EDS: Espectroscopía por Dispersión de energía.
- EDX: Análisis de rayos X por dispersión de energía
- EN: Norma Europea
- FMEA: Análisis de modos de fallas y efectos
- G_c : Fuerza impulsora crítica
- HRC: Dureza Rockwell escala C
- ISO: Organización Internacional de Normalización
- K: Factor de intensidad de esfuerzos
- MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería
- MEF: Método de elementos finitos
- S : Sección total
- \tilde{S} : Sección efectiva de resistencia
- SAE Sociedad de Ingenieros Automotrices
- SHC-PTT: Tratamiento Termoquímico con Plasma de Carburización con Hidrógeno Supersónico
- TTQ: Tratamiento Termoquímico
- TTQ-C: Tratamiento Termoquímico de Cementación

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los ensayos para determinar las propiedades de los materiales que se relacionan con el diagrama esfuerzo-deformación, la carga se aplica en forma gradual, para proporcionar suficiente tiempo con el fin de que la deformación se desarrolle en su totalidad. Sin embargo, con frecuencia existe una condición en la cual los esfuerzos varían o fluctúan entre ciertos niveles [1]. Por ejemplo, una fibra particular en la superficie de un eje rotatorio que se somete a la acción de cargas flexionantes estará sometida a tracción y compresión por cada revolución del eje. Éstas y otras clases de carga que ocurren en elementos de máquinas producen esfuerzos que se llaman esfuerzos variables, repetidos, alternantes o fluctuantes.

Así, a menudo, se encuentra que los elementos de máquinas han fallado bajo la acción de esfuerzos repetidos o fluctuantes; no obstante, el análisis más cuidadoso revela que los esfuerzos máximos reales estuvieron por debajo del esfuerzo a carga máxima del material y con mucha frecuencia incluso por debajo del esfuerzo fluencia. La característica más notable de estas fallas consiste en que los esfuerzos se repitieron un gran número de veces. Por lo tanto, a la falla se le llama falla por fatiga.

Es por ello que la industria metalmeccánica está en constante búsqueda del mejoramiento de las propiedades de los aceros para lograr llevar el material a condiciones ideales de trabajo, propiedades mecánicas tales como la resistencia a la fatiga, dureza, tenacidad al desgaste entre otras propiedades, a través de los diversos tratamientos termoquímicos como la cementación, nitruración, entre otros [2].

La cementación es un proceso que se ha venido empleando desde hace mucho tiempo, para producir una capa superficial dura y resistente, principalmente en aceros de manera que induzca la absorción de carbono en la superficie, así por difusión se genere un gradiente de concentración entre la superficie y el interior del acero. La importancia de la misma radica en que endurece la superficie de un acero sin modificar su núcleo, creando así una pieza resistente a la fatiga y a la vez con una superficie de acero con una mayor concentración de carbono y con una mejor resistencia al desgaste [3].

En este trabajo, se realizará una demostración experimental del daño acumulado por fatiga por flexión rotativa en un acero SAE 1020 en condición de cementado con post-tratamiento térmico para determinar su influencia en los aceros cementados. La parte experimental se desarrolló con 5 grupos de probetas: El primer

grupo, se enfocó en el comportamiento a la fatiga utilizando amplitudes de esfuerzos constantes. El segundo y tercer grupo se sometieron a esfuerzos alternantes ascendentes, con el primero a bajo esfuerzo durante el 25% de la vida útil y el segundo durante el 50%, seguidos de alto esfuerzo hasta la falla. Por otro lado, el cuarto y quinto grupo experimentaron a esfuerzos alternantes descendentes, iniciando con alto esfuerzo durante el 25 y 50% de la vida útil, respectivamente, para luego cambiar a bajo esfuerzo hasta la falla. Cada grupo presenta una variación en las condiciones de carga para comprender mejor el comportamiento y la resistencia mecánica de los metales ante diferentes escenarios de trabajo.

En última instancia, el trabajo presenta los resultados obtenidos de la caracterización de la capa cementada, de los ensayos de fatiga y daño acumulado por fatiga. Estos resultados permitirán una comprensión más profunda de cómo la cementación con post-tratamiento térmico afecta la resistencia a la fatiga del acero SAE 1020, lo que a su vez contribuirá a mejorar su rendimiento.

1. MARCO TEÓRICO

En el mundo de la ingeniería de materiales, los tratamientos termoquímicos juegan un papel fundamental en la transformación de las propiedades de las piezas metálicas, especialmente aquellas de bajo contenido de carbono. Entre estas técnicas, la cementación se erige como una de las más destacadas y versátiles. La cementación no solo confiere a las piezas una dureza superficial excepcional, sino que también brinda la oportunidad de incrementar su resistencia al desgaste y la fatiga, todo ello mediante la introducción controlada de átomos de carbono en su estructura cristalina. En este capítulo, se presentan los diversos procesos termoquímicos utilizados en la ingeniería de materiales, con un enfoque especial en la cementación profundizando en sus mecanismos subyacentes, así como en su tratamiento térmico posterior. Asimismo, se explican las teorías relacionadas al fenómeno de daño acumulado por fatiga junto con la base legal que proporciona la ley forestal de El Salvador respecto a la tala de árboles.

1.1. GENERALIDADES DE LOS TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

Los tratamientos termoquímicos, aplicados a los aceros de bajo carbono, consisten en la difusión de átomos de pequeño tamaño, como el carbono, nitrógeno o boro, desde la superficie hasta el interior de la pieza, creando una zona enriquecida o capa. Además, existen otra clasificación de tratamientos termoquímicos: a alta temperatura (~900 °C) y a baja temperatura (~500 °C). Los de alta temperatura, como la cementación, la carbonitruración y la boruración, precisan o permiten tratamientos térmicos de temple y revenido posteriores; en cambio, los de baja temperatura, como la nitruración o la nitrocarburation, se realizan sobre piezas que han recibido tratamientos térmicos de temple y revenido [4].

Los tratamientos termoquímicos introducen mediante difusión átomos de metales o no metales para modificar la composición química y la microestructura de la superficie de la pieza tratada, tal como se presenta en la Fig. 1.1 [5].

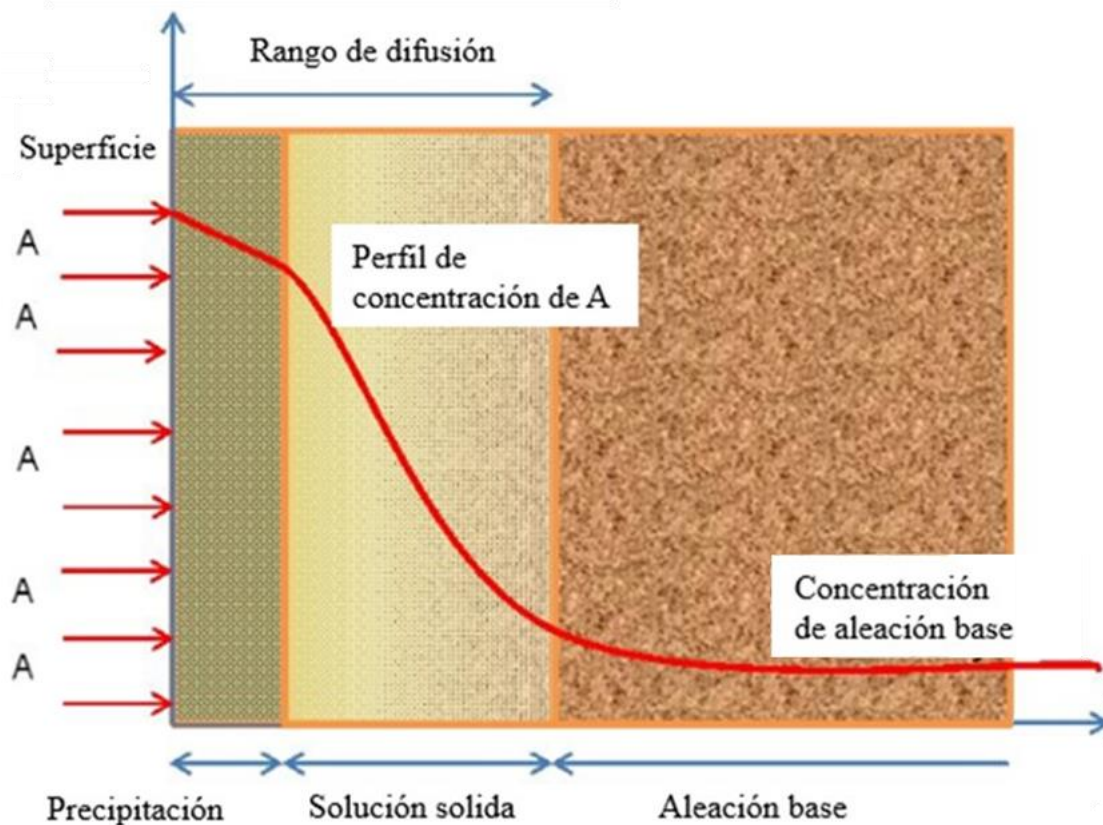


Fig. 1.1. Principios de tratamientos termoquímicos [5].

Los aceros al carbono de baja aleación se pueden tratar con diferentes tipos de tratamientos termoquímicos como cementación y nitruración que se utilizan en casos de baja abrasión. Otro método para aumentar la vida útil de los aceros es la aplicación de aceros ledeburíticos, los cuales poseen altos contenidos de carbono y cromo y presentan durezas muy elevadas. La resistencia al desgaste de estos aceros depende de su composición química y el tratamiento térmico. Los resultados de pruebas de laboratorio de aceros tratados termoquímicamente, aceros al cromo ledeburíticos tratados térmicamente y aceros de alta velocidad presentan el efecto de la microestructura de estos aceros en su resistencia a la abrasión. La resistencia a la abrasión de los aceros de baja aleación carburados tiene valores muy cercanos a la de los aceros de construcción y de herramientas de alto contenido de carbono [6].

La nitrocarburación o boruración podrían ser utilizados como procesos alternativos, más baratos e industrialmente populares.

A continuación, se presentarán los aspectos y condiciones más relevantes de los tratamientos termoquímicos, útiles para el endurecimiento superficial de los aceros de bajo carbono:

A) Carbonitruración.

En los procesos de carbonitruración se efectúa el aporte de carbono y de nitrógeno a temperaturas entre 750 y 850 °C, la cual es más bajas que en la cementación, por lo que el temple se realiza de manera menos brusca, lo cual genera deformaciones menores. La carbonitruración se emplea para endurecer piezas de tornillería y en general, de aceros muy poco aleados que deben tener cierta resistencia al desgaste.

Para introducir el carbono en el acero, se puede emplear un gas rico en carbono o un líquido carburante que se vaporiza en el horno. El nitrógeno absorbido por el acero proviene del amoníaco que se incorpora al gas [7].

Una de las ventajas más importantes de la carbonitruración es que el nitrógeno absorbido en el proceso disminuye la velocidad crítica del temple del acero. Esto significa que la capa periférica de un acero carbonitrurado templea mucho más fácilmente que cuando el acero ha sido solo cementado. Esto facilita mucho la sustitución de los aceros de alta aleación por acero de bajo precio, lo cual amplía el campo de aplicaciones de los aceros baratos que a veces presenta el inconveniente de que después del temple que sigue a la cementación ordinaria, aparecen algunos puntos blancos en la capa dura, problema que no se suele presentar en la carbonización.

La duración del tratamiento varía de 0.5 a 3 h, se emplean temperaturas de 750 a 850 °C y se obtienen capas carbonitruradas de 0.1 a 0.6 mm de espesor. La composición del baño empleado comúnmente es: 35% de cianuro sódico, 20% de cianuro potásico, 20% de carbonato sódico y 20% de carbonato potásico [8].

B) Nitruración.

La nitruración es un tratamiento termoquímico que consiste en la difusión de átomos de nitrógeno en la superficie del acero, normalmente en estado de temple y revenido, para conseguir una mayor dureza superficial mediante la formación de compuestos duros denominados nitruros. La finalidad de la nitruración es una elevada dureza superficial respetando la dureza original en el núcleo de la pieza. Con ello se consigue aumentar la resistencia al desgaste y a la fatiga, incrementar la resistencia a la corrosión y retienen la dureza incluso a temperaturas de 500 °C. Este tratamiento no produce deformaciones en la pieza. La nitruración se realiza a temperaturas comprendidas entre 490 y 580 °C [4].

Es preferible que las piezas a nitrurar estén previamente templadas y revenidas para que el núcleo ofrezca una resistencia elevada y la estructura martensítica ayude a la obtención de una capa nitrurada más compacta. La mayoría de los aceros se pueden nitrurar, no obstante, la dureza y la profundidad de las capas están condicionadas por los elementos de aleación que componen. Los elementos de aleación capaces de formar nitruros (Al, Cr, Mo, V y Ti) proporcionan una mayor dureza y la capa nitrurada que se obtiene es más uniforme y compacta.

Una técnica de nitruración que se ha venido desarrollando recientemente emplea la ionización del nitrógeno para incrementar el potencial de difusión del nitrógeno en la denominada tecnología de nitruración por plasma. Una manera simple y eficaz para la aceleración de la nitruración por plasma como un proceso de difusión es aumentar la velocidad de difusión del nitrógeno por el aumento de la temperatura del sustrato. A medida que el calentamiento de los sustratos a la temperatura requerida por medio del nuevo método de cátodo hueco en tiras para el tratamiento termoquímico con plasma (SHC-PTT) de sustratos metálicos de gran superficie, como láminas o tiras. Con este método, se investigó la nitruración por plasma de láminas de acero inoxidable austenítico EN 1.4301 (SAE 304) en un modo de tratamiento estacionario a 673 K durante 1,200 s, con el objetivo de cumplir con los requisitos para placas bipolares de celdas de combustible de membrana de intercambio de protones con respecto a la resistencia de contacto de interfaz y la resistencia a la corrosión. Se descubrió que se podía generar una capa de difusión de austenita expandida con nitrógeno de 1.3 μm de espesor, lo que indica una tasa de nitruración de plasma 2 veces mayor en comparación con la literatura. Esta se produjo sólo por la descarga luminiscente cuyo volumen está delimitado por secciones de la superficie interna del sustrato con una altura de 150 mm y un ancho de 140 mm cada una, además una nitruración a temperaturas más altas implica procesamiento en una mayor potencia eléctrica y, por lo tanto, a una mayor densidad de corriente, lo que aumentó aún más la tasa de nitruración por plasma debido a un mayor grado de ionización cerca de la superficie tratada [8].

El proceso de nitruración por plasma asistido por descarga luminiscente se ha vuelto más popular en los procesos de endurecimiento superficial debido a sus excelentes características, tales como ahorro de energía y simplicidad en su aplicación [9].

C) Boruración.

La boruración es un tratamiento termoquímico que consiste en la difusión de átomos de boro en la superficie del metal para conseguir una mayor dureza superficial mediante la formación de boruros. El potencial de difusión del boro es influenciado por la composición química del sustrato, la temperatura y el tiempo del tratamiento [4].

El borurado puede ser aplicado a un intervalo amplio de materiales que incluyen aceros, hierros fundidos y aleaciones. La boruración normalmente se hace en estado sólido, mediante polvo de distintas granulometrías o mediante pasta. El suministro de boro suele ser carburo de boro, mezclado con un relleno y un activador. Las temperaturas a las que se hace este tratamiento están comprendidas entre los 800 y los 1,050 °C. La pieza con el polvo o la pasta se introduce en un recipiente, se sella y se introduce en el horno.

La boruración se debe realizar en atmósferas libres de oxígeno y se debe mantener su ausencia una vez realizado el tratamiento hasta que las piezas se hayan enfriado hasta ~300 °C. En el caso de los aceros es posible realizar el temple y el revenido luego de realizar la boruración. No se pueden borurar aceros con contenidos elevados de aluminio y silicio.

D) Cementación.

El proceso termoquímico de cementación pretende enriquecer superficialmente las piezas de acero con un porcentaje específico de carbono. Los aceros para cementación y, en general, todos los aceros susceptibles de ser cementados poseen un porcentaje bajo en carbono (0.15 - 0.23 % de C). Este bajo porcentaje de carbono puede proporcionar una dureza en el intervalo de 20 a 35 HRC (dureza Rockwell escala C, indentador de cono de diamante y una carga total de 150 kg). Una vez realizado el proceso de temple, esta dureza se puede aumentar considerablemente hasta valores de 62-63 HRC si el porcentaje de carbono en la superficie aumenta hasta valores del 0.90%.

Cuando se consigue el enriquecimiento en carbono hasta una profundidad determinada se realiza el proceso de temple. La superficie y el núcleo de la pieza adquieren una estructura martensítica (una fase rica en carbono frágil y extraordinariamente dura con una microestructura en forma de agujas) que asegura muy buena resistencia al desgaste en la superficie e incrementa la tenacidad en el núcleo. La dureza que adquiere la pieza es proporcional al porcentaje de carbono.

Los aceros para cementación contienen elementos de aleación como níquel, molibdeno o cromo que permiten obtener una elevada dureza en la capa cementada. En aceros de muy baja aleación, para elevar su dureza se realiza una carbonitruración seguida de un temple y posteriormente un revenido lo cual le confiere una dureza superficial elevada.

La difusión del carbono desde la superficie hacia el interior del acero sigue las leyes de Fick, de manera que cuanto mayor es el gradiente de concentración del carbono y la temperatura, más rápida es la formación de la capa enriquecida. Existen fórmulas para calcular la profundidad de la capa cementada; sin embargo, una aproximación bastante correcta es considerar un aumento de un milímetro de profundidad de la capa por cada hora a 850 °C y con un potencial de carbono de ~0.9%.

La dureza superficial de una pieza cementada se verifica mediante ensayos de dureza Rockwell. Si la profundidad de la capa es superior a 0.4 mm, el ensayo Rockwell C es el más aconsejado. Si la capa es menor que 0.4 mm, la carga empleada en Rockwell C (150 kilopondios) puede ser excesiva y el penetrador puede atravesar la capa, obteniendo una dureza media de la capa cementada y el núcleo de la pieza. En este caso es aconsejable ensayar la dureza superficial mediante un ensayo Rockwell A (indentador de cono de diamante carga total de 60 kg).

Debido a la dificultad de determinar exactamente hasta que profundidad se ha producido la difusión del carbono, se establece que el control de la profundidad de la capa cementada se debe evaluar mediante un gradiente de dureza Vickers (indentador de diamante en forma de pirámide con cargas de 5 a 100 kg_f) desde la superficie hasta el núcleo.

La profundidad de la capa cementada también se puede evaluar ópticamente sobre una muestra pulida y atacada. Es lo que se denomina como la capa total o a color. Generalmente, es la capa donde ocurre el enriquecimiento de carbono y por lo tanto la formación de una estructura más dura, lo que resulta en una capa superficial que posee propiedades incrementadas en términos de dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la fatiga es considerada como la capa cementada, aunque en los controles de calidad se recogen tanto los valores de esta capa como los de capa de color.

1.2. PROCESOS DE CEMENTACIÓN

La cementación es un proceso de tratamiento termoquímico utilizado en la industria con el fin de aumentar la concentración de carbono en la capa superficial de los aceros con bajo contenido de carbono, lo que resulta en una mayor dureza en la superficie, buena tenacidad en el núcleo e incremento en resistencia a la fatiga de la pieza.

Se denomina cementación (carburación) al TQT que consiste en la saturación por difusión de la capa superficial del acero con carbono durante el calentamiento (comúnmente entre 900 y 950 °C) en un medio que contiene carbono (carburante). Las piezas cementadas adquieren las propiedades definitivas después del temple y revenido a baja temperatura [10].

La cementación se emplea mucho para endurecer ruedas dentadas de dimensiones medias, ejes de caja de velocidades de los automóviles, algunas piezas de dirección, árboles de máquinas de marcha rápida y muchas otras piezas de máquinas [10].

A continuación, se proporcionará información sobre los procesos de cementación, haciendo énfasis en los procesos de cementación sólida, líquida, gaseosa y con pasta:

- **Cementación sólida:** La cementación sólida es un proceso en el cual el metal a ser cementado se coloca en contacto directo con una mezcla rica en carbono, como partículas de carbón, coque de carburación, y se somete a altas temperaturas en un ambiente controlado sin la presencia de oxígeno. A medida que el carbono pasa mediante reacciones químicas de la mezcla rica en carbono hacia la superficie del metal y luego difunde en el metal, se forma una capa de mayor dureza [11].
- **Cementación líquida:** La cementación líquida, también conocida como carburación líquida, implica sumergir el metal a ser cementado en un líquido o pasta rica en carbono, como sales fundidas o compuestos carbonitrúros disueltos en un medio líquido. Posteriormente, el material se calienta a temperaturas elevadas en un horno de cementación, lo que permite que el carbono se difunda hacia la superficie del metal y forme una capa endurecida [11].
- **Cementación gaseosa:** La cementación gaseosa es un proceso en el cual el metal a ser cementado se expone a una atmósfera rica en carbono, como metano, etano o gas de carburación. Este proceso se realiza en un horno de cementación con

una atmósfera controlada a temperaturas elevadas. El carbono gaseoso es adsorbido por la superficie del metal y penetra en ella, formando una capa endurecida [11].

- Cementación con pasta: La cementación con pasta es un proceso en el cual una mezcla de carbono y material aglutinante se aplica en la superficie de los aceros con bajo contenido de carbono a ser cementados. La pasta generalmente está compuesta por carbón, polvo de hierro, arcillas y otros materiales. Luego, el acero se calienta a temperaturas adecuadas para permitir que el carbono penetre en la superficie y forme una capa endurecida [11].

1.2.1. CEMENTACIÓN SÓLIDA

La cementación sólida es un proceso de tratamiento termoquímico en el cual el metal a ser cementado se coloca en contacto directo con un sólido rico en carbono, como polvo de carbón, coque o polvo de carburación. Luego, se somete a altas temperaturas en un ambiente controlado sin la presencia de oxígeno.

Para la cementación las piezas se colocan en cajas llenas de la mezcla carburante, como tal sirve el carbón vegetal (de roble o abedul) en granos de 3.5 a 10 mm de diámetro o el semicoque de hulla y el coque de turba, a los cuales se les agregan activadores como carbonato de bario o sosa calcinada en una cantidad de un 10 a 40% de la masa de carbón [10]. En la Fig. 1.2 se presenta un esquema de una caja para cementar.

Como activadores, en vez de carbonato de bario se puede utilizar acetato de sodio o el acetato de bario, que poseen gran actividad ya que genera la formación de metano en la caja de cementación [10].

Durante la cementación con carburante sólido la composición de la atmósfera gaseosa, que hay en la caja, cambia, prácticamente, conforme a la línea de equilibrio. Las piezas sometidas a cementación, después de una limpieza preliminar se colocan en cajas de acero soldadas o de hierro colado. Al colocar las piezas, en el fondo de la caja se coloca y apasiona una capa de carburante de espesor de 20 a 30 mm, sobre la cual se posiciona la primera fila de piezas, manteniendo una distancia de 10 a 15 mm entre ellas y hasta las paredes laterales de la caja [10].

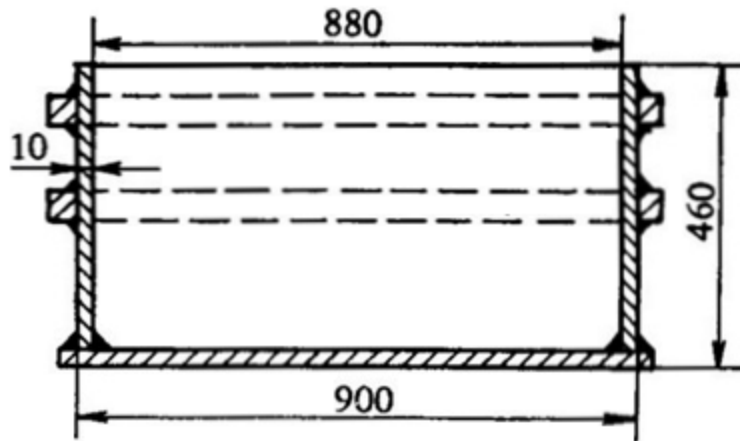


Fig. 1.2. Caja para cementar con carburante sólido [10].
Cotas en mm.

Durante este proceso, el carbono se difunde hacia la superficie del metal, lo que da lugar a la formación de una capa endurecida con una mayor concentración de carbono, lo que resulta en una mayor dureza superficial [11].

Un ejemplo de aplicación de la cementación sólida es en el caso de un engrane de acero que se utiliza en una transmisión automotriz. Para incrementar su resistencia al desgaste y la fatiga, se decide someterlo a un proceso de cementación sólida. Primero, se coloca el engrane en un recipiente junto con un polvo de carbón de alta pureza. Luego, se sella el recipiente para evitar la entrada de oxígeno. A continuación, se calienta el recipiente metálico a una temperatura específica durante un período de tiempo determinado [12].

Durante el proceso de cementación sólida, el carbono del polvo de carbón se difunde en la superficie del engrane, formando una capa endurecida con una alta concentración de carbono. Esta capa aumenta la dureza superficial del engrane, incrementando su resistencia al desgaste y la fatiga cuando está en funcionamiento [12].

Es importante mencionar que la profundidad de la capa endurecida puede variar según el tiempo y la temperatura del proceso de cementación. Además, es fundamental controlar el proceso con precisión para evitar la formación de capas demasiado gruesas o la presencia de gradientes de dureza no deseados en el metal [12].

La cementación sólida es ampliamente utilizada en la industria para incrementar las propiedades mecánicas de diversos componentes y herramientas, como engranes, cojinetes, ejes y herramientas de corte, que requieren alta dureza

superficial y resistencia al desgaste en aplicaciones específicas. Este proceso es esencial para extender la vida útil e incrementar el rendimiento de los metales en condiciones de carga y desgaste extremos.

Un inconveniente notable de la cementación con carburante sólido es la gran duración del proceso. La aceleración del proceso se consigue disminuyendo el peso del carburante dentro de la caja y eligiendo para las cajas una configuración conforme a las piezas a cementar [10].

1.2.2. CEMENTACIÓN LÍQUIDA

La cementación líquida, también conocida como carburación líquida o cementación en sales fundidas, es un proceso de tratamiento termoquímico que implica sumergir el metal a ser cementado en un líquido o pasta rica en carbono. Durante este proceso, el metal se expone a altas temperaturas en un ambiente controlado, lo que permite que el carbono del líquido o pasta se difunda hacia la superficie del metal [10].

En este caso la superficie se carbura en sales fundidas constituidas por carbonatos alcalinos y carburo de silicio [10].

Como resultado, se forma una capa endurecida con una mayor concentración de carbono, lo que incrementa significativamente la dureza superficial y la resistencia al desgaste del metal [11].

Los procesos duran de 0.5 a 3 h a 850 °C. El baño se completa del modo siguiente: primeramente, se funde Carbonato de sodio al cuál después se le agrega cloruro de sodio. Una vez fundida la mezcla de sales, se añade, agitando fuertemente el baño, carburo de silicio en polvo. Inmediatamente en la superficie del baño se forma escoria y surgen llamas de combustión del monóxido de carbono. Al alcanzar la temperatura de trabajo el baño se agita y gran parte de la escoria se expulsa. Todo este proceso permite obtener una capa cementada de 0.2 a 0.5 mm de espesor [10].

Un ejemplo de aplicación de la cementación líquida es en el caso de acero que se utilizará en una máquina industrial que opera en condiciones de alta fricción y desgaste. Para incrementar la dureza y resistencia al desgaste del eje, se aplica un proceso de cementación líquida. Se sumerge el eje en una solución líquida compuesta por sales fundidas que contienen carbono y otros elementos que favorecen el proceso

de carburación. Luego, se calienta la solución a una temperatura específica durante un tiempo determinado [12].

Durante la cementación líquida, el carbono y otros elementos disueltos en la solución líquida se difunden en la superficie del eje, creando una capa endurecida con una alta concentración de carbono y otros componentes químicos. Esta capa incrementará la dureza y resistencia al desgaste del eje, lo que permitirá que funcione de manera más eficiente y tenga una vida útil más prolongada en las condiciones industriales exigentes [12].

Es esencial controlar cuidadosamente el proceso de cementación líquida para obtener la profundidad de la capa endurecida deseada y garantizar la homogeneidad en las propiedades mecánicas del metal. Asimismo, es importante considerar las especificaciones del metal a ser cementado y las condiciones de operación para determinar los parámetros adecuados del proceso.

La cementación líquida se utiliza en diversas industrias, como la automotriz, aeroespacial, manufacturera y de maquinaria industrial, para incrementar las propiedades mecánicas de componentes críticos que están expuestos a desgaste y fatiga en aplicaciones exigentes. Este proceso de tratamiento termoquímico ha demostrado ser eficaz para prolongar la vida útil e incrementar el rendimiento de piezas y herramientas sometidas a condiciones extremas de carga y fricción [11].

1.2.3. CEMENTACIÓN GASEOSA

La cementación gaseosa, también conocida como carburación gaseosa, es un proceso de tratamiento termoquímico que implica la exposición del metal a ser cementado a una atmósfera rica en carbono, como metano, etano o gas de carburación. Durante este proceso, el carbono gaseoso se adsorbe en la superficie del metal y penetra en ella, formando una capa endurecida con una mayor concentración de carbono. Esta capa incrementará la dureza superficial y la resistencia al desgaste del metal [11].

La cementación con gas se realiza en el carburizador, que es un sistema de componentes múltiples que se obtiene del gas natural, de mezclas propano-butánicas y otros hidrocarburos en generadores especiales o mediante pirólisis en la cámara de trabajo del horno de hidrocarburos líquidos [10].

La cementación con gas tiene algunas ventajas en comparación con la cementación con carburante sólido. En el caso de la cementación con gas se puede obtener una concentración prefijada de carbono en la capa; se acorta la duración del proceso puesto que no hay necesidad de calentar las cajas llenas de carburante de poca conductibilidad térmica; y de esta manera se garantiza la posibilidad de mecanizar y automatizar por completo los procesos y se simplifica el posterior tratamiento térmico de las piezas, ya que se puede efectuar el temple directamente después de la cementación en el horno [10].

Además, entre los aspectos claves de la cementación gaseosa se tienen:

- **Atmósfera controlada:** La cementación gaseosa se realiza en un horno de cementación con una atmósfera controlada para garantizar que el carbono gaseoso esté presente en cantidades adecuadas y que se adsorba en la superficie del acero. En la Fig. 1.3 se presenta 2 diagramas de equilibrio de la atmósfera endotérmica con carbono.

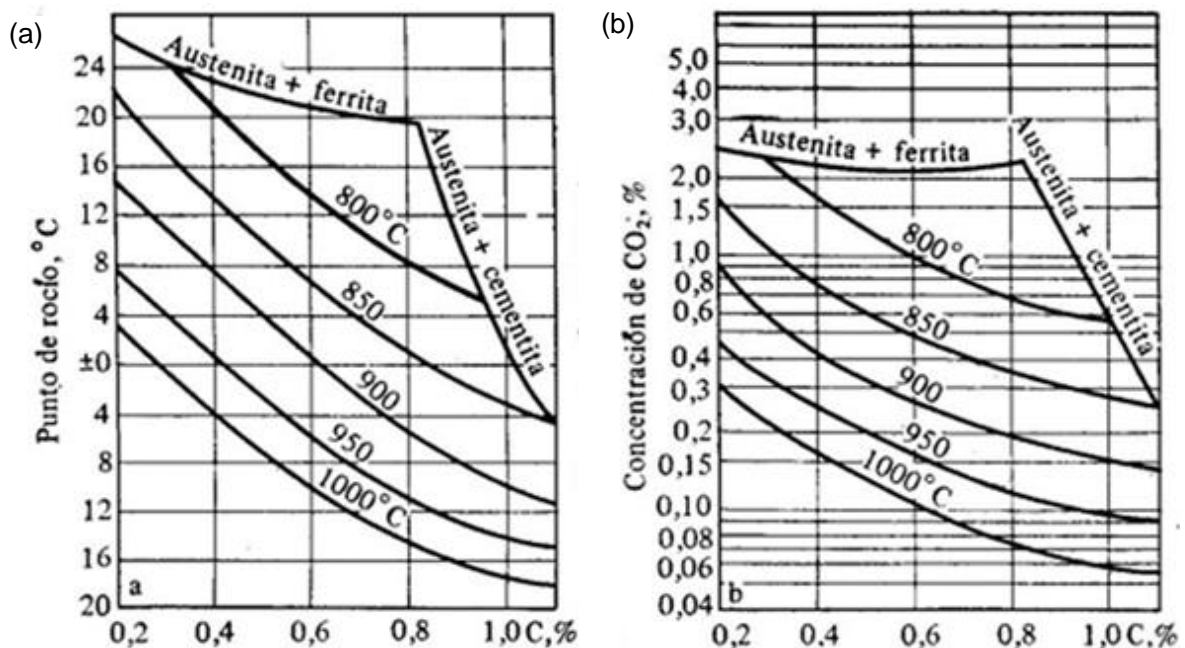


Fig. 1.3. Diagramas de equilibrio de la atmósfera endotérmica con carbono: a) regulación según el punto de rocío; y b) según el bióxido carbónico CO_2 [10].

- **Difusión de carbono:** El proceso de cementación gaseosa se basa en el fenómeno de la difusión, que es el movimiento de átomos o moléculas de una región de alta concentración a una región de baja concentración. En este caso, el carbono gaseoso se difunde desde la atmósfera hacia la superficie del metal y penetra en ella a lo largo del tiempo y a temperaturas elevadas.

- Profundidad de la capa endurecida: La profundidad de la capa endurecida en la cementación gaseosa está influenciada por factores como la temperatura, el tiempo de tratamiento y la composición de la atmósfera gaseosa. Es importante controlar estos parámetros para obtener la profundidad deseada de la capa endurecida.
- Capas delgadas y de alta dureza: La cementación gaseosa es especialmente adecuada para formar capas delgadas con alta dureza superficial. Esto es beneficioso en aplicaciones donde se requiere una alta resistencia al desgaste y una baja fricción en la superficie del metal.
- Tolerancias dimensionales: A diferencia de otros métodos de tratamiento termoquímico, como la cementación sólida, la cementación gaseosa no provoca un cambio significativo en las dimensiones del metal. Esto permite mantener las tolerancias dimensionales del metal original, lo que es especialmente relevante para componentes de precisión.

La cementación gaseosa se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, como engranes, cojinetes, ejes, herramientas de corte, rodamientos y piezas mecánicas que requieren una alta dureza superficial y resistencia al desgaste. Es especialmente valiosa en la industria automotriz y de maquinaria industrial, donde las piezas están sujetas a altas cargas y condiciones de fricción [12].

La cementación gaseosa también se aplica en la fabricación de aceros de alta calidad, donde se busca obtener propiedades mecánicas incrementadas en la superficie del metal sin afectar negativamente su núcleo. Este proceso se ha desarrollado y optimizado a lo largo de los años con el fin de que se adapte a diferentes tipos de metales y aplicaciones industriales, lo que la convierte en una técnica valiosa para la incrementa de componentes y piezas sometidas a condiciones extremas de carga y desgaste [12].

1.2.4. CEMENTACIÓN CON PASTA

La cementación con pasta, también conocida como carburación con pasta, es un proceso de tratamiento superficial que implica la aplicación de una mezcla de carbono y material aglutinante sobre la superficie del metal a ser cementado. La pasta utilizada generalmente contiene polvo de carbón, polvo de hierro, arcillas y otros

materiales que facilitan la difusión de carbono en la superficie del metal. A continuación, se profundizará en algunos aspectos claves de la cementación con pasta:

- Preparación de la pasta: La pasta de carburación se prepara mezclando polvo de carbón con un aglutinante, como arcilla, agua o aceite, para formar una pasta de consistencia adecuada para su aplicación. La cantidad de polvo de carbón y el tipo de aglutinante se ajustan según las especificaciones del proceso y las características del metal a ser cementado [12].
- Aplicación de la pasta: La pasta de carburación se aplica uniformemente sobre la superficie del metal mediante métodos como son brochado, inmersión, pulverización o pintura. La capa de pasta debe ser lo suficientemente gruesa para permitir la difusión adecuada del carbono en la superficie del metal durante el tratamiento termoquímico [12].
- Proceso de cementación: Ya aplicada la pasta, el acero se calienta en un horno a temperaturas elevadas durante un período de tiempo específico. Durante este proceso, el carbono presente en la pasta se difunde en la superficie del acero, formando una capa endurecida con una mayor concentración de carbono [12].
- Control de la profundidad de la capa endurecida: El espesor de la capa endurecida en la cementación con pasta se controla ajustando la composición de la pasta, la temperatura del proceso y el tiempo de tratamiento. Es importante lograr una difusión controlada del carbono para obtener la profundidad deseada de la capa endurecida [12].
- Capas cementadas con elementos adicionales: Además del carbono, la cementación con pasta también puede incorporar otros elementos químicos en la capa endurecida, como nitrógeno u otros elementos que formen carburos o carbonitruros. Estos compuestos pueden incrementar aún más las propiedades mecánicas y la resistencia al desgaste del metal [12].

La cementación con pasta se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, especialmente en componentes de acero que requieren una alta dureza superficial y resistencia al desgaste. Se utiliza en la fabricación de engranes, ejes, cojinetes, herramientas de corte y otras piezas que están sujetas a condiciones de alta fricción y desgaste.

La cementación con pasta ofrece ventajas como un mayor control de la profundidad de la capa endurecida, la capacidad de obtener capas cementadas

delgadas y la posibilidad de introducir elementos adicionales en la capa. Sin embargo, también puede presentar desafíos en términos de uniformidad de la capa y la necesidad de limpieza adecuada después del proceso para eliminar cualquier residuo de pasta carburante [11].

1.3. ACEROS PARA CEMENTACIÓN

Los aceros utilizados para cementación deben tener una composición química adecuada que permita la formación de una capa endurecida en la superficie del acero [13].

Reciben el nombre de aceros de cementación, un grupo de aceros de bajo contenido de 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 se pueden considerar que en cierto modo están constituidas por dos aceros diferentes. Uno el de la zona interior de bajo contenido de carbono, tenaz y resistente, y otro el de la zona periférica de alto contenido de carbono, generalmente 0.80 a 1.10% de C, que después del temple y revenido queda con una dureza muy elevada [7].

A pesar de que teóricamente la cementación es un tratamiento muy sencillo, al emplear este proceso surgen con cierta frecuencia bastantes 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 [7].

Los elementos más comunes en estos aceros son el carbono y el silicio, junto con otros elementos aleantes como el manganeso, cromo, níquel y molibdeno. Estos elementos juegan un papel crucial en el proceso de cementación y en la obtención de las propiedades mecánicas deseadas:

- Carbono. Es el elemento principal en la cementación, ya que es el responsable de la formación de la capa endurecida. Los aceros utilizados para cementación generalmente contienen entre 0.1 y 0.9% de C. Cuanto mayor sea la concentración de carbono, mayor será la dureza superficial obtenida en la capa endurecida [12].
- Silicio. Este actúa como un facilitador de la difusión de carbono en el metal durante el proceso de cementación. Además, ayuda a reducir la velocidad de difusión del carbono a temperaturas altas, lo que evita la formación de capas excesivamente gruesas. Los aceros para cementación pueden contener entre 0.1 y 1.0% de Si.
- Manganeso. Es un elemento de aleación comúnmente utilizado en aceros para cementación. Contribuye a la formación de compuestos de carburo que incrementan la dureza y resistencia al desgaste en la capa endurecida. Los aceros para cementación pueden contener entre 0.2 y 2.0% de Mn.
- Cromo. Es otro elemento aleante importante en los aceros para cementación. Éste ayuda a incrementar la dureza y resistencia a la corrosión en la capa endurecida, lo que es especialmente beneficioso en ambientes agresivos. Los aceros para cementación pueden contener hasta un 3% de Cr.
- Níquel y molibdeno. Estos elementos también pueden estar presentes en pequeñas cantidades en los aceros para cementación. Contribuyen a incrementar la resistencia al desgaste y la tenacidad en la capa endurecida, lo que es especialmente relevante en aplicaciones donde el metal está sujeto a cargas de impacto.

Para la fabricación de piezas cementadas se emplean aceros al carbono y aleados, existiendo muchas clases diferentes de aceros de cementación. Todos ellos, como se ha citado, contienen de 0.05 a 0.25% de C, según se presenta en las Tablas 1.1 y 1.2 [7].

Excepcionalmente cuando no interesa conseguir una gran tenacidad en el núcleo central se llegan a emplear, a veces, aceros hasta de 0.40% de C. Entre los diversos factores que se deben tener en consideración para la elección de uno u otro tipo de acero de cementación, los más importantes a considerar son tres: 1) La forma o tamaño de las piezas que se van a fabricar junto con las tolerancias de dimensiones que se exigirán a las piezas después del temple (ya que en función de las tolerancias que se admiten en las deformaciones, se decidirá si el temple se debe hacer en agua, en aceite o por algún otro procedimiento y, en consecuencia, estas condiciones servirán, en gran parte, para señalar los elementos de aleación que debe tener el

acero; 2) La resistencia que deben tener las piezas en el núcleo central y; 3) El precio que se puede llegar a pagar por el acero.

A pesar de ser las circunstancias que se acaban de señalar las más importantes para la selección de aceros de cementación, en la actualidad en muchos talleres se hace todavía la selección por sentimiento o preferencia personal hacia una composición química, más o menos conocida. Esta es una de las causas por la que, a veces, por no valorar debidamente las circunstancias, que antes se ha citado, decisivas en el proceso, no se obtienen buenos resultados en determinadas fabricaciones.

Tabla 1.1. Aceros de cementación del Instituto del Hierro y del Acero [7].

Marca	Composición, % en peso							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
F151	0.08/0.12	0.10/0.35	0.30/0.40	<0.04	<0.04	-	-	-
F152	0.10/0.15	0.10/0.35	0.30/0.60	<0.04	<0.04	3.00/3.50	-	-
F153	0.10/0.15	0.10/0.35	0.30/0.60	<0.04	<0.04	3.80/4.50	0.90/1.10	-
F154	0.10/0.15	0.10/0.35	0.30/0.60	<0.04	<0.04	2.50/3.00	0.50/0.80	-
F431	0.17/0.22	0.10/0.35	1.00/1.50	<0.04	<0.04	-	1.10/1.50	-
F432	0.12/0.16	0.10/0.35	0.40/0.80	<0.04	<0.04	-	0.60/0.90	-
F155	0.12/0.15	0.10/0.35	0.30/0.60	<0.04	<0.04	-	1.00/1.30	0.15/0.25
F156	0.12/0.18	0.10/0.35	0.30/0.60	<0.04	<0.04	3.80/4.50	0.90/1.10	0.15/0.35
F157	0.12/0.19	0.10/0.35	0.30/0.60	<0.04	<0.04	2.50/3.50	0.50/0.80	0.25/0.35
F158	0.15/0.20	0.10/0.35	0.40/0.70	<0.04	<0.04	1.80/2.20	1.80/2.20	0.15/0.25
F159	0.15/0.20	0.10/0.35	0.40/0.70	<0.04	<0.04	1.50/2.00	0.40/0.60	0.15/0.25

Los aceros de cementación, de acuerdo con los elementos de aleación que contienen, se pueden clasificar en tres grupos: a) Aceros al carbono; b) Aceros de media aleación; y c) Aceros de alta aleación.

Por la resistencia y tenacidad que se puede llegar a alcanzar en el núcleo central de las piezas cementadas, se pueden clasificar en otros tres grupos: a) Aceros de gran tenacidad y baja resistencia, en los que no se suele dar en general gran importancia a la resistencia; con ellos se suele obtener en el núcleo central alargamientos mayores que 14%, resiliencias mayores que 12 kg/cm² y resistencias variables de 60 a 80 kg/mm²; b) Aceros de resistencia y tenacidad media, con resistencias en el núcleo variables de 80 a 110 kg/mm²; y c) Aceros de alta resistencia en el núcleo central con resistencias variables de 110 a 160 kg/mm².

Por el método de realizar el temple se pueden clasificar en: a) Aceros de temple al agua; b) Aceros de temple al agua o al aceite (utilizándose uno u otro método de enfriamiento según sea el espesor de la pieza); y c) Aceros de temple al aceite.

Finalmente, por el tamaño de grano o aptitud de crecimiento del grano durante el calentamiento que se realiza en la cementación, se pueden clasificar en: a) Aceros de grano grueso, tamaño de grano del N.º 1 al 4; b) Aceros de grano medio, tamaño de grano del N.º 5 y 6; y c) Aceros de grano fino, tamaño de grano del N.º 7 y 8.

Tabla 1.2. Aceros de uso normal en Estados Unidos [7].

SAE	Composición, % en peso							
	C	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S
1010	0.05-0.15	0.30-0.60					<0.045	<0.055
1015	0.10-0.20	"					"	"
1025	0.20-0.30	"					"	"
1315	0.10-0.20	1.30-1.60					"	"
2315	0.10-0.20	0.30-0.60		3.25-3.75			<0.04	<0.05
2320	0.15-0.25	"		3.25-3.75			"	"
2512	0.12						"	"
2515	0.10-0.20	"		4.75-5.25			"	"
3115		"	0.45-5.75	1.00-1.50			"	"
3215		"	0.90-1.25	1.50-2.00			"	"
3220	0.15-0.25	"	0.60-1.25	1.50-2.00			"	"
3312	0.14	"	0.15-1.75	3.25-3.75			"	"
3325	0.20-0.30	"	0.25-1.75	3.25-3.75			"	"
3415	0.10-0.20	"	0.60-0.95	2.75-3.25			"	"
4115			1.00		0.15-0.25		"	"
4615		0.40-0.70		1.65-2.00	0.20-0.30		"	"
4620	0.15-0.25	"		"	"		"	"
4640	0.35-0.45	0.50-0.80		"	"		"	"
4815	0.10-0.20	0.40-0.60		3.25-3.75	"		"	"
5120	0.15-0.25	0.30-0.60	0.60-0.90				"	"
6115	0.10-0.20	"	0.80-1.10			0.15-0.18	"	"
6120	0.35-0.45	"	0.80-1.10				"	"

Los aceros utilizados para cementación deben tener una estructura inicial que permita la difusión adecuada del carbono y la formación de una capa endurecida con buenas propiedades mecánicas. Es común utilizar aceros con una estructura ferrítica-perlítica o perlítica para este propósito, ya que estas estructuras son más adecuadas para el proceso de cementación. Estas estructuras iniciales también determinarán la profundidad y la homogeneidad de la capa endurecida obtenida durante el proceso de tratamiento termoquímico [13].

Algunos tipos comunes de aceros utilizados para cementación son:

- Aceros al carbono para cementación. En este grupo están incluidos los aceros que sólo contienen en cantidades apreciables carbono, silicio y manganeso, que son los tres elementos fundamentales en los aceros ordinarios; además siempre contienen también pequeños porcentajes de impurezas como fósforo, azufre, oxígeno, etc. Se caracterizan fundamentalmente porque para conseguir normalmente con esos aceros, después de la cementación y temple posterior, durezas mayores que 60 HRC, es necesario enfriarlos rápidamente en agua, ya que la velocidad crítica de enfriamiento del acero de 0.90% de C que constituye la capa cementada es muy elevada [7].

El porcentaje de carbono que contienen suele variar de 0.10 a 0.25% y algunas veces llega excepcionalmente hasta 0.40% de C, utilizando estos últimos sólo en contadísimas ocasiones, porque empleando esos aceros con alto contenido de carbono las piezas quedan, en general, con poca tenacidad en el núcleo central. El porcentaje de silicio suele ser menor que 0.35% y el de manganeso suele variar de 0.50 a 0.70%. Empleando estos aceros al carbono, en el núcleo de las piezas cementadas no se suelen obtener resistencias mayores que 80 kg/mm². En la periferia después del temple rápido en agua, cuando se trata de piezas de tamaño reducido, se consiguen, prácticamente, las mismas durezas que con los aceros aleados. Estos aceros tienen el inconveniente de que cuando se trata de piezas de formas complicadas, las deformaciones pueden ser importantes.

También se debe destacar que, durante la cementación, en general, en los aceros al carbono los granos crecen más que en los aceros aleados y, por lo tanto, quedan más frágiles y para obtener con ellos buenos resultados (tenacidad aceptable) es necesario cuidar bien los tratamientos de regeneración, que con frecuencia suele ser necesario dar después de la cementación. Para pequeñas piezas se suelen emplear aceros con menos de 0.12% de C; tratándose de piezas de tamaño medio, se emplean aceros de 0.12 a 0.17% de C, y para las piezas grandes, se emplean aceros de 0.20% de carbono. La elección de estos diferentes porcentajes de carbono se hace porque en las piezas gruesas no se endurece o se endurece muy poco en el temple el núcleo central, sobre todo en los aceros de muy bajo contenido de carbono, y por ello se suelen utilizar, como se ha señalado, porcentajes de carbono algo más elevados en las piezas grandes que en las pequeñas, para alcanzar una dureza suficiente que pueda soportar sin deformación o aplastamiento las presiones de la capa exterior dura. Como ya se ha citado, estos

aceros al carbono se deben templar siempre en agua. Con frecuencia se fabrican estos aceros con porcentajes de manganeso más elevados (de 0.60 a 0.90) que los que suelen tener los aceros al carbono de usos generales (de 0.30 a 0.60%) porque en los aceros de cementación al carbono, interesa con frecuencia incrementar la templabilidad para obtener en el proceso buenos resultados.

- Aceros débilmente aleados. A este grupo pertenecen los aceros de baja aleación, en los que la suma de los porcentajes de elementos aleados, cromo, níquel, molibdeno y manganeso es menor que 3%. Entre ellos se encuentran los aceros cromo-molibdeno con 1% de Cr, 0.20% de Mo y 0.14% de C y también los de la misma aleación y más elevado carbono 0.17% de C y también los de 0.21% de C. Los aceros níquel-molibdeno con 0.10 a 0.20% de C, 1.60 a 2% de Ni y 0.20 a 0.30% de Mo. En la actualidad son cada día más utilizados los aceros de triple aleación y bajo porcentaje de elemento aleado, cromo-níquel-molibdeno, con porcentajes de carbono variables desde 0.10 a 0.25% y contenidos en 0.35 a 1% de Cr, 0.35 a 1.50% de Ni y 0.15 a 0.40% de Mo.

De todos estos aceros los de más elevada aleación se suelen templar en aceite y los de menos aleación en agua. Para un mismo acero también suele ocurrir que cuando se trata de piezas pequeñas se pueden templar en aceite y las piezas grandes, en cambio, se deben templar en agua. A veces, también, es muy interesante enfriar durante unos segundos en agua y pasar luego al aceite. Estas variables en los métodos de enfriamiento se derivan de la templabilidad de estos aceros que, en muchos casos, se encuentra justo en el límite y no llega a ser suficiente para que se pueda realizar el temple en aceite, ya que enfriando en esa forma la dureza superficial que se alcanza no llega a 60 HRC.

Con estos aceros, combinando los elementos de aleación con un adecuado porcentaje de carbono, variable generalmente de 0.08 a 0.25%, se llega a alcanzar en el núcleo resistencias variables desde 70 a 130 kg/mm². Los aceros de triple aleación y bajo porcentaje de elementos aleados tienen templabilidades muy aceptables, y tienen la ventaja de que en su fabricación se llega a un aprovechamiento muy completo de las chatarras que contienen elementos de aleación.

- Aceros de alta aleación. En algunos casos, para la fabricación de piezas de gran responsabilidad, en que se quieren evitar las deformaciones y se quieren obtener además elevadas resistencias en el núcleo central, se emplean aceros con

elementos de aleación en porcentajes mayores que 3%. El contenido de carbono casi siempre suele ser menor que 0.20% de C, pues al ser la templabilidad de estos aceros muy elevada no son necesarios porcentajes más altos de carbono para alcanzar la resistencia en el núcleo de 90 a 150 kg/mm².

A este grupo pertenecen los clásicos aceros al níquel de 0.10 a 0.20% de C y 3% de Ni y también los de 5% de Ni. También, son muy utilizados para estos usos los aceros cromo-níquel con 0.10 a 0.20% de C: 0.75% de Cr y 3 de Ni, y los de 1% de Cr y 4% de Ni. Para piezas de aviones y motores de aviones y piezas de alta resistencia y gran tamaño, son muy empleados los aceros cromo-níquel-molibdeno con los mismos o parecidos porcentajes de carbono y elementos de aleación que los cromo-níquel que se acaban de citar, y contenidos en molibdeno variables de 0.20 a 0.60%. En estos aceros, conviene en general conservar el contenido de carbono relativamente bajo para que no se endurezca demasiado el núcleo y llegue a disminuir sensiblemente la tenacidad. Para evitar la presencia de austenita retenida, en la zona periférica, después del temple, a veces se da a las piezas tratamientos especiales a temperaturas menores que 0 °C.

Aunque es muy difícil dar unas reglas generales para la elección de aceros destinados a la fabricación de piezas cementadas, ya que es un problema extraordinariamente complejo por ser muchos los factores que intervienen en el mismo, con el propósito de orientar a continuación se señalan unas normas que pueden servir de base para su selección.

1.4. ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS CAPAS CEMENTADAS

Los estudios de caracterización de las capas cementadas son fundamentales para evaluar la calidad y el rendimiento de los metales sometidos al proceso de cementación. Estos estudios permiten comprender las propiedades mecánicas, estructurales y microestructurales de la capa endurecida, así como identificar posibles defectos o irregularidades que pueden afectar su desempeño en condiciones de servicio. A continuación, se citan algunos aspectos importantes de los estudios de caracterización de las capas cementadas:

- 1) Microdureza y perfil de dureza. La microdureza es una de las técnicas de caracterización más utilizadas para evaluar la dureza en la capa endurecida. Se

realizan mediciones a nivel microscópico para obtener un perfil de dureza a lo largo de la profundidad de la capa. Esto permite determinar la profundidad efectiva de la capa cementada y su dureza máxima [12].

- 2) Metalografía y Microscopía electrónica de barrido (MEB). La metalografía y la MEB son técnicas que permiten examinar la microestructura de la capa cementada en una muestra. Esto proporciona información sobre la distribución de los carburos formados, la estructura de grano y la uniformidad de la capa, lo que es esencial para evaluar la calidad del proceso de cementación [12].
- 3) Análisis de fases y composición química. El análisis de fases mediante técnicas como difracción de rayos X o espectroscopía por dispersión de la energía (EDS). La difracción de rayos X es una técnica que permite identificar las fases cristalinas presentes en un material, lo que en este caso incluiría la detección de carburos y otros compuestos formados en la capa endurecida. La espectroscopía por dispersión de energía (EDS), que también se conoce como análisis de rayos X por dispersión de energía (EDX), es una técnica que permite analizar la composición química de una muestra. Esto se logra al detectar y cuantificar la radiación de rayos X emitida por los elementos presentes en la muestra [12].
- 4) Análisis de la tenacidad. La tenacidad es una propiedad importante para evaluar la resistencia al agrietamiento y la propagación de grietas. Se pueden realizar ensayos de tenacidad para determinar la resistencia a la fractura de la capa endurecida [12].
- 5) Pruebas de adhesión y adherencia. Estas pruebas evalúan la resistencia de la unión entre la capa endurecida y el material base. Un buen nivel de adhesión es esencial para asegurar que la capa cementada no se desprenda o se desprenda durante la operación [12].
- 6) Evaluación de la resistencia a la fatiga. Los estudios de resistencia a la fatiga permiten evaluar la capacidad de la capa cementada para resistir cargas cíclicas repetidas sin fallar. Se pueden realizar ensayos de fatiga para determinar la vida útil y la resistencia bajo condiciones simuladas de carga cíclica [12].
- 7) Inspección no destructiva. Las técnicas de inspección no destructiva, como ultrasonido y partículas magnéticas, se utilizan para detectar posibles defectos internos o superficiales en la capa cementada sin afectar su integridad [12].

La combinación de estos estudios de caracterización proporciona información completa sobre las propiedades y la calidad de las capas cementadas, lo que es

esencial para garantizar un rendimiento óptimo y prolongar la vida útil de los componentes sometidos a este proceso de tratamiento termoquímico. Los resultados de estos estudios guían la optimización de los parámetros de cementación y el desarrollo de aceros adecuados para aplicaciones específicas.

1.5. POST-TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Dado que la cementación de las piezas de acero se realiza en la región austenítica, es posible realizar un templeado directo desde la temperatura de cementación, produciendo una capa endurecida que depende de la rapidez de crítica de enfriamiento en función de la composición química de cada capa. Sin embargo, el temple directo de los aceros de grano grueso suele provocar fragilidad y distorsión, lo que limita su aplicación a aceros de grano fino. En la Fig.1.4 se presenta diversos tratamientos térmicos aplicados a los aceros cementados [13].

Los aceros aleados rara vez se utilizan en la condición de templeado sin tratamiento térmico posterior, debido a la gran cantidad de austenita retenida en la parte superficial endurecida.

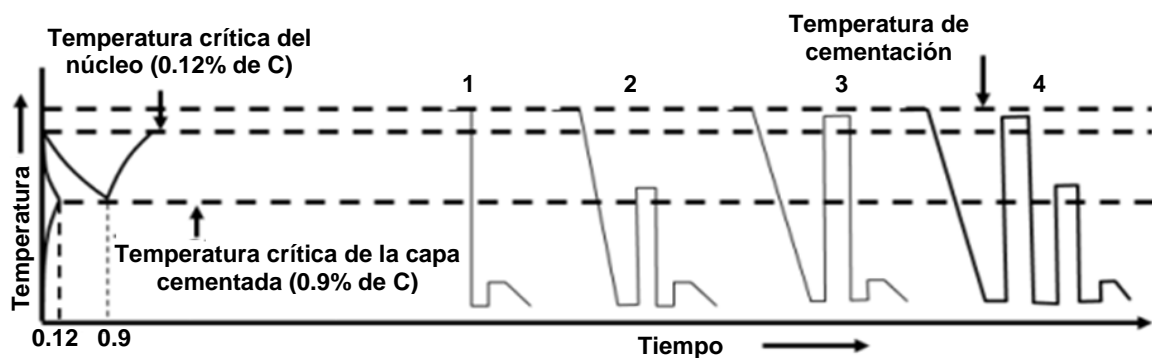


Fig. 1.4. Diversos post-tratamientos térmicos para aceros cementados [13].

A menudo, los detalles específicos de estos procesos marcan la diferencia entre el éxito y el fracaso en la fabricación de componentes críticos. En la Fig. 1.4 se presenta cuatro escenarios distintos, cada uno caracterizado por su temple y revenido a baja temperatura donde cada técnica se realiza según las necesidades y los requisitos de las piezas que se están produciendo, por ejemplo:

- 1) Temple directo y revenido a baja temperatura. Aceros de baja aleación donde la capa cementada no tiene gran cantidad de austenita retenida. Piezas con poca responsabilidad (núcleo con poca tenacidad). Espesores de 0.2 a 0.6 mm [13].
- 2) Enfriamiento lento, templado y revenido a baja temperaturas. Aceros de alta aleación de granos fino. Poco peligro de deformación. Hornos de atmósfera controlada.
- 3) Enfriamiento lento, temple a temperatura ligeramente superior a A_{c3} y revenido a baja temperaturas. Aceros de media aleación y granos fino. Máxima resistencia en el núcleo (industria aeronáutica y aeroespacial). El núcleo se regenera sin permanecer durante mucho tiempo a alta temperatura. La periferia puede que quede con granos grueso y sea frágil. La dureza puede que sea un poco baja por la gran cantidad de austenita retenida.
- 4) Enfriamiento lento, primer temple a temperatura ligeramente superior a A_{c3} , segundo temple a temperatura ligeramente superior a A_{c1} y revenido a baja temperaturas. Esto es debido a que el acero se cementa en la región de austenita, el templado directo desde la temperatura de cementación endurecerá tanto la parte externa como la interna si la rapidez de enfriamiento es mayor que la rapidez crítica de enfriamiento. El templado directo de los aceros de granos grueso suele dar lugar a la fragilidad y distorsión, de manera que este tratamiento sólo se debe aplicar al acero de granos fino. Los aceros aleados rara vez se utilizan en la condición de templado sin tratamiento térmico posterior, debido a la gran cantidad de austenita retenida en la parte superficial endurecida.

Cuando una pieza cementada se endurece, la parte exterior aparecerá como una zona de martensita clara, seguida por una zona más oscura de transición, tal como se presenta en la Fig. 1.5. La parte exterior dura o efectiva se mide desde la orilla exterior hasta la parte media de la zona oscura. De la naturaleza del gradiente de carbono, la parte superficial dura contiene la porción de la parte superficial superior al 0.40% de C y es 2/3 partes de la superficie endurecida total. Mediciones transversales de dureza se pueden utilizar para obtener la profundidad de la superficie endurecida efectiva, ya que la parte media de la zona de transición es de ~50 HRC.

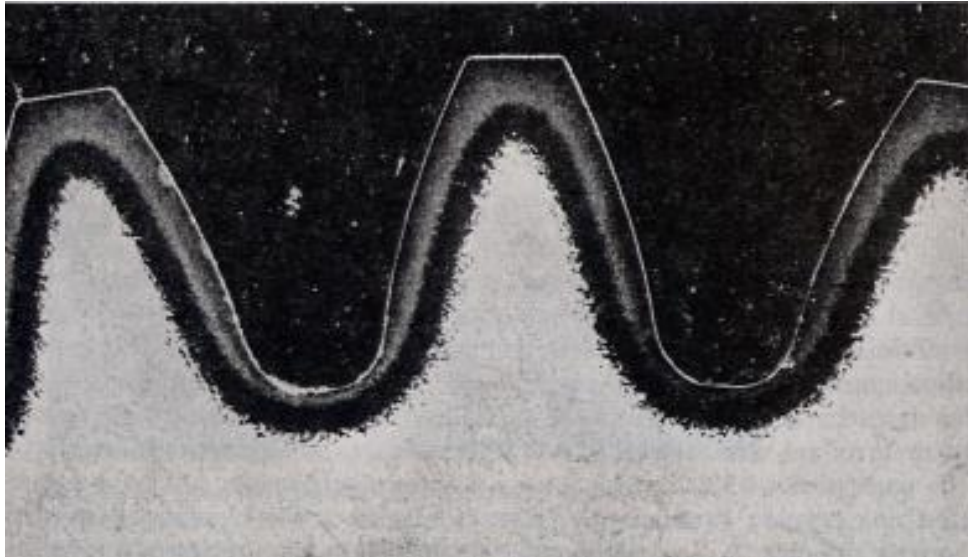


Fig. 1.5. Engrane apropiadamente cementado, endurecido y revenido, atacado químicamente con Nital al 2% [13].

1.6. FATIGA Y DAÑO ACUMULADO POR FATIGA EN PIEZAS CEMENTADAS

La fatiga en materiales se refiere al proceso de degradación de un material debido a cargas cíclicas aplicadas en un período de tiempo prolongado. En piezas cementadas, donde se combina la dureza superficial con la tenacidad del núcleo, la fatiga puede ser especialmente compleja debido a la interacción de múltiples factores. Así, los fundamentos de la fatiga y el daño acumulado por fatiga en piezas cementadas, los mecanismos involucrados y las técnicas de análisis utilizadas en el ámbito de la ingeniería mecánica se presentan a continuación:

- A) Propiedades mecánicas de las piezas cementadas. El aumento de carbono en la superficie del metal aumenta la dureza, resistencia al desgaste y una mayor vida útil en aplicaciones sometidas a cargas y desgaste, aunque también introduce esfuerzos residuales y posibles microgrietas [19].
- B) Mecanismos de fatiga en piezas cementadas.
 - ✓ Iniciación de grietas: La iniciación de grietas por fatiga se refiere al proceso que se produce debido a los esfuerzos de la carga cíclica, que finalmente conducen a la formación de una grieta o una fractura [20].
 - ✓ Microgrietas: Las microgrietas se convierten en macrogrietas y forman superficies paralelas en forma de mesetas separadas por crestas

longitudinales. Por lo general, las mesetas son suaves y normales a direcciones del esfuerzo máximo en tracción [21].

- C) Efecto de la geometría y la carga. La geometría de las piezas, la concentración de esfuerzos y la magnitud de las cargas aplicadas tienen un papel crucial en la fatiga. Los cambios en la forma y el tamaño de la pieza pueden influir en la distribución de esfuerzos y afectar la propagación de grietas [21].
- D) Técnicas de análisis de fatiga. Análisis y deformación:
- ✓ Utilizando herramientas como el método de los elementos finitos (MEF), se pueden simular los esfuerzos y deformaciones en las piezas sometidas a cargas cíclicas.
 - ✓ Curvas de S-N: Representan la relación entre el número de ciclos de carga y la amplitud del esfuerzo, permitiendo estimar la vida útil de la pieza.
 - ✓ Mecánica de la fractura: Se centra en la propagación de grietas y la resistencia a la fractura, proporcionando una comprensión más profunda de cómo se desarrolla el daño [21].
- E) Mitigación y diseño para la fatiga. Optimización de la geometría:
- ✓ Reducir los concentradores de esfuerzos mediante el diseño de transiciones suaves y radios adecuados.
 - ✓ Tratamientos térmicos y superficiales: La aplicación de tratamientos térmicos y recubrimiento puede incrementar la resistencia de la fatiga [21].
 - ✓ Selección de materiales: Elegir materiales con propiedades adecuadas para la aplicación específica puede ayudar a reducir los efectos de la fatiga [21].
- F) Influencia de las propiedades del material. Las propiedades del material, como su dureza, tenacidad y resistencia, desempeñan un papel crucial en la fatiga y el daño acumulado en piezas cementadas. La interacción entre la capa cementada y el núcleo del material puede afectar la propagación de grietas y la resistencia de la fatiga. Materiales con una tenacidad adecuada pueden resistir mejor la formación y propagación de grietas, contribuyendo así a una mayor vida útil de las piezas sometidas a ciclos de carga [21].
- G) Efecto de las condiciones de carga. Las condiciones de carga, como la amplitud y frecuencia de las cargas cíclicas, así como las variaciones en la temperatura, también influyen en la fatiga. Cargas de alta amplitud y frecuencia pueden acelerar el proceso de daño acumulado por fatiga. Además, cambios en la temperatura

pueden afectar las propiedades mecánicas del material, lo que a su vez impacta en su resistencia a la fatiga [21].

- H) Factores ambientales. El entorno en el que operan las piezas cementadas también puede contribuir a la fatiga y el daño acumulado por fatiga. Ambientes corrosivos o la presencia de sustancias químicas pueden debilitar la superficie de la pieza y acelerar la formación de grietas. La combinación de cargas cíclicas y ambientes agresivos puede llevar a un deterioro más rápido, lo que subraya la importancia de considerar los factores ambientales en el análisis de fatiga [21].
- I) Envejecimiento y ciclo de vida de la pieza. A medida que una pieza cementada experimenta ciclos de carga repetidos, su estructura interna se puede alterar con el tiempo. El envejecimiento del material puede cambiar sus propiedades mecánicas y afectar la resistencia de la fatiga. Por lo tanto, es esencial evaluar cómo el envejecimiento y el ciclo de vida de la pieza interactúan con los mecanismos de fatiga y daño acumulado por fatiga [21].
- J) Modelado y simulación de la fatiga en piezas cementadas. El modelado y la simulación computacional son herramientas valiosas en el estudio de la fatiga en piezas cementadas. El método de los elementos finitos (MEF) permite simular el comportamiento de las piezas bajo cargas cíclicas y evaluar los esfuerzos y deformaciones resultantes. Estos modelos pueden proporcionar información detallada sobre la distribución de esfuerzos y predecir áreas propensas a la formación de grietas [21].
- K) Casos de estudio y aplicaciones prácticas. Se puede explorar casos de estudio y aplicaciones prácticas para ilustrar la relevancia de la fatiga y el daño acumulado en piezas cementadas. Por ejemplo, se pueden examinar componentes específicos en la industria automotriz, aeroespacial o manufacturera que estén sujetos a cargas cíclicas y que requieran una mayor resistencia a la fatiga [21].
- L) Normativas y estándares. En la ingeniería mecánica, existen normativas y estándares específicos que definen los requisitos para la resistencia a la fatiga en diferentes aplicaciones. Estas normativas, como las especificaciones ASTM o ISO, establecen pautas para el diseño y prueba de piezas sometidas a cargas cíclicas, la seguridad y calidad en diversas industrias [21].
- M) Efectos de la microestructura de la fatiga. La microestructura del material desempeña un papel crítico en la fatiga de piezas cementadas. Las variaciones en la estructura de grano y presencia de inclusiones pueden afectar la propagación

de grietas y la resistencia a la fatiga. La orientación de los granos puede influir en la dirección en la que se propagan las grietas, lo que a su vez impacta en la vida útil de la pieza bajo cargas cíclicas [21].

- N) Daño por vibraciones resonantes. Las vibraciones resonantes, causadas por la coincidencia entre la frecuencia natural de una pieza y la frecuencia de las cargas cíclicas, pueden acelerar significativamente el proceso de fatiga. Estas vibraciones pueden generar concentraciones de esfuerzos en áreas específicas de la pieza, aumentando la probabilidad de formación de grietas. El análisis de frecuencias naturales y la mitigación de vibraciones resonantes son consideraciones clave en el diseño para prevenir la fatiga [21].
- O) Mecanismos de iniciación y propagación de grietas. Las grietas se pueden iniciar en diferentes puntos de la pieza, como en la superficie, en inclusiones o en cambios abruptos de geometría. Una vez que se inicia una grieta, su propagación es influenciada por factores como las cargas aplicadas y la estructura de grano del material. Entender estos mecanismos son esenciales para predecir la vida útil de la pieza y diseñar estrategias de mitigación efectivas [21].
- P) Consideraciones de diseño y reducción de esfuerzos. El diseño de piezas para resistir la fatiga implica reducir concentradores de esfuerzos y minimizar cambios bruscos en la geometría. La incorporación de radios adecuados, transiciones suaves y cambios graduales en la forma puede ayudar a distribuir los esfuerzos de manera más uniforme y reducir los puntos de inicio de las grietas [21].
- Q) Ensayos de fatiga y validación experimental. Los ensayos de fatiga en laboratorio son esenciales para validar las predicciones teóricas y los modelos de simulación. Estos ensayos involucran la aplicación controlada de cargas cíclicas a muestras representativas de piezas cementadas y el monitoreo de su respuesta. Los resultados de los ensayos pueden ser utilizados para ajustar y validar los modelos de análisis [21].
- R) Consideraciones en la fabricación y proceso de cementación. El proceso de cementación, que involucra altas temperaturas y cambios químicos en la superficie del material, puede introducir esfuerzos residuales y distorsiones. Controlar adecuadamente los parámetros de la cementación y los tratamientos térmicos posteriores es esencial para minimizar los esfuerzos y prevenir la formación temprana de grietas [21].

- S) Análisis de falla y fractográfico. Cuando ocurre una falla por fatiga en una pieza cementada, el análisis fractográfico puede proporcionar información valiosa sobre los mecanismos de propagación de grietas y la secuencia de eventos que llevaron al fallo. Mediante la observación microscópica de la superficie fracturada, se pueden identificar características como las marcas de inicio de grieta y las zonas de fatiga [21].
- T) Aplicaciones futuras y desarrollo tecnológico. El estudio de la fatiga y el daño acumulado por fatiga en piezas cementadas continúa evolucionando con el avance tecnológico. La aplicación de técnicas de modelado más sofisticadas, el desarrollo de materiales incrementados y la integración de sensores para monitorear la fatiga en tiempo real son áreas de investigación prometedoras que pueden tener un impacto significativo en la ingeniería mecánica [22].
- U) Aplicación Industrial y Beneficios Económicos. La aplicación exitosa de estrategias de diseño y análisis de fatiga en piezas cementadas se puede traducir en beneficios económicos significativos. La reducción de costos de mantenimiento, reparación y reemplazo, así como el incremento de la eficiencia operativa, hacen que la comprensión de la fatiga sea un aspecto crítico en la industria y en la ingeniería de productos [23].

1.6.1. REGLA DEL DAÑO ACUMULADO POR FATIGA

La teoría del daño acumulado por fatiga supone que el ciclo de esfuerzo con un esfuerzo alternante por sobre el límite de resistencia causa un daño permanente mensurable. Además, supone que el daño total causado por una cantidad de ciclos de esfuerzo es igual a la suma de los daños causados por los ciclos de esfuerzo individuales [24].

A) Regla de daño lineal

Es más, si se somete una estructura a n_1 ciclos a un esfuerzo alternante S_1 y n_2 ciclos a un esfuerzo alternante S_2 , el factor de daño total D se calcula como:

$$D = \left(\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} \right) \quad (1.1)$$

donde: N_1 es la cantidad de ciclos necesaria para causar un fallo bajo S_1 , y
 N_2 es la cantidad de ciclos necesarios para causar un fallo bajo S_2 .

Esta regla se denomina la Regla de daño lineal o la Regla de Miner. El factor de daño, también llamado factor de uso representa la relación de la vida útil de la estructura que se consumió. Un factor de daño de 0.35 significa que el 35% de la vida útil de la estructura se consumió. El fallo por fatiga se produce cuando el factor de daño alcanza 1.0 [24].

La regla de daño lineal no considera los efectos de la secuencia de carga. En otras palabras, predice que el daño causado por el ciclo de esfuerzo es independiente de dónde se produce en el historial de carga. También supone que la tasa de acumulación de daño es independiente del nivel de esfuerzo. El comportamiento observado indica que las fisuras se inician en algunos ciclos con amplitudes de esfuerzo altos, mientras que la iniciación de las fisuras a amplitudes de esfuerzo bajos consume casi toda la vida útil [24].

La regla de daño lineal se utiliza en su forma simple al especificar que los sucesos de fatiga no interactúan unos con otros en las propiedades del estudio. Al establecer la interacción entre los sucesos como aleatoria, el programa utiliza el código de Construcción de calderas y recipientes a presión (ASME) edición 1983 para evaluar el daño combinando los picos de suceso [24].

Suponiendo que la curva S-N indica que se necesitan N_1 ciclos a un esfuerzo alternativo S_1 para que produzca un fallo de fatiga, entonces la teoría afirma que cada ciclo causa un factor de daño D_1 que consume $1/N_1$ de la vida útil de la estructura [25].

La fatiga del acero es un modo de falla común en el diseño estructural, especialmente para condiciones de carga cíclica, la cual ocurre cuando los ciclos de esfuerzo repetidos causan daños irreversibles y el crecimiento de grietas en el material, lo que reduce la resistencia y la rigidez. Para predecir la vida útil a fatiga de los componentes de acero, los ingenieros deben utilizar modelos de acumulación de daños que tengan en consideración los efectos de diferentes intervalos de esfuerzo, frecuencias e historiales de carga. Uno de los modelos más utilizados es la regla de Palmgren-Miner, que asume que el daño causado por cada ciclo de esfuerzo es proporcional a la relación entre su duración y el límite de fatiga [25].

1.6.2. ANÁLISIS DE FATIGA

Si se somete a la pieza a $n < N$ ciclos, no se producirá el fallo por fatiga; no obstante, aunque no se haya llegado al fallo, la pieza sí que habrá quedado “dañada”. Se define el concepto de “daño” como n/N , relación entre los ciclos n aplicados y los ciclos N necesarios para que ocurra el fallo. Así, el fallo ocurre cuando el daño n/N alcanza el valor de 1 (100% de daño) cuando el número de ciclos aplicados n alcanza el número de ciclos de fallo N ($n = N$) [26].

A) Método de Palmgren-Miner de daño acumulado por fatiga

El análisis se complica cuando, en lugar de un estado de esfuerzo como el de la Fig. 1.6, la pieza se somete a un esfuerzo como en la figura a lo largo de su vida útil, donde no se ve un comportamiento cíclico que se pueda caracterizar por un esfuerzo media y un esfuerzo alternante [26].

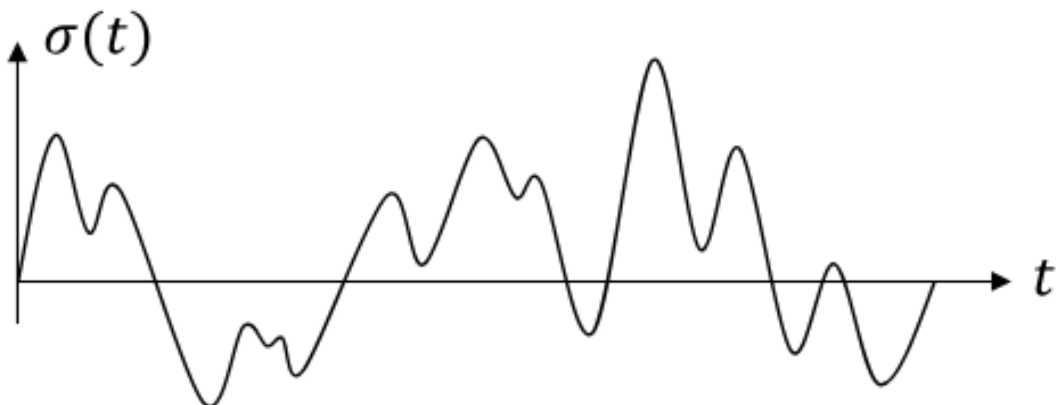


Fig. 1.6. Estado de esfuerzo sin patrón cíclico [26].

En estos casos, se aplica un método de cómputo de ciclos y se obtiene una sucesión de “bloques” aplicados durante n_i ciclos como el de la Fig. 1.7, totalmente equivalente respecto a fatiga al estado de esfuerzo de la Fig. 1.6. Los métodos de cómputo de ciclos más populares, cuya descripción queda fuera del alcance de este trabajo de aplicación, son los métodos “range-pair” y “rainflow” [26].

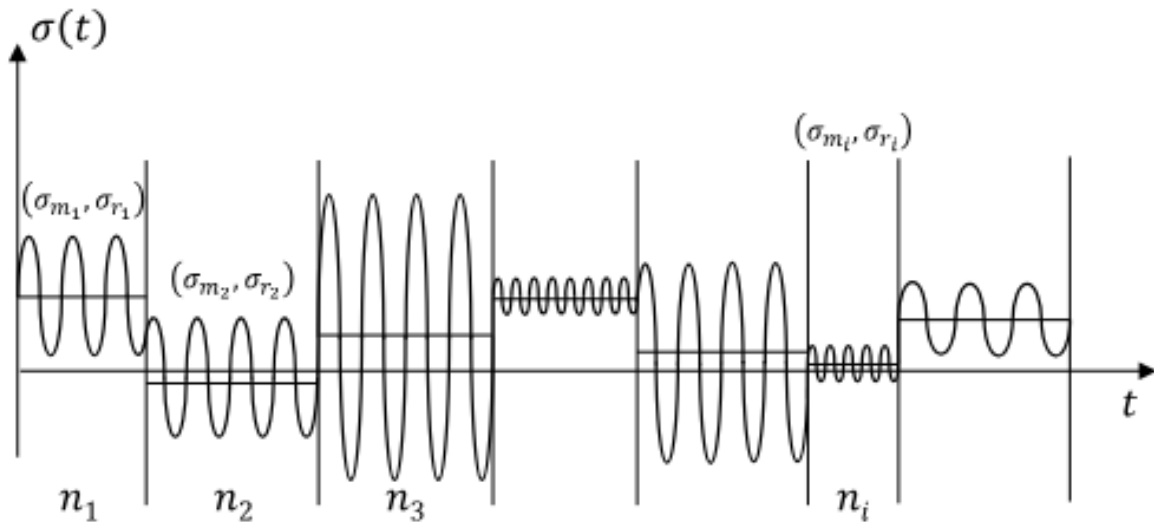


Fig. 1.7. Sucesión de bloques (obtenido mediante método de cómputo de ciclos) equivalente al estado de esfuerzo de la Fig. 1.6 [26].

1.6.3. TEORÍAS Y MODELOS DE DAÑO ACUMULADO POR FATIGA

Cuando la variación de cargas de amplitud no necesariamente constante durante la vida de un objeto, o sea, se fatiga, produce un fenómeno en la estructura del metal conocido como daño acumulado por fatiga. Esto sucede cuando a nivel estructural se producen degradación ante las sollicitaciones en el objeto. Este nivel de daño será la acumulación de una historia de cargas. También, se necesita considerar si existe un pre-daño en el material [27].

El incremento de daño es en función del estado actual de daño, el parámetro de control del proceso de fatiga, la historia anterior, el incremento del ciclo y algunas propiedades del material. El concepto de daño acumulado por fatiga es fácil de comprender, aunque no así su evaluación [27]:

A) Definición gráfica de daño acumulado por fatiga

Considerando una sección de un elemento de volumen finito donde existan irregularidades en su interior. Su sección total es el área de la sección considerada y la sección efectiva de resistencia es el área donde existen concentradores de esfuerzos que soportan la carga (ver Fig. 1.8) [27].

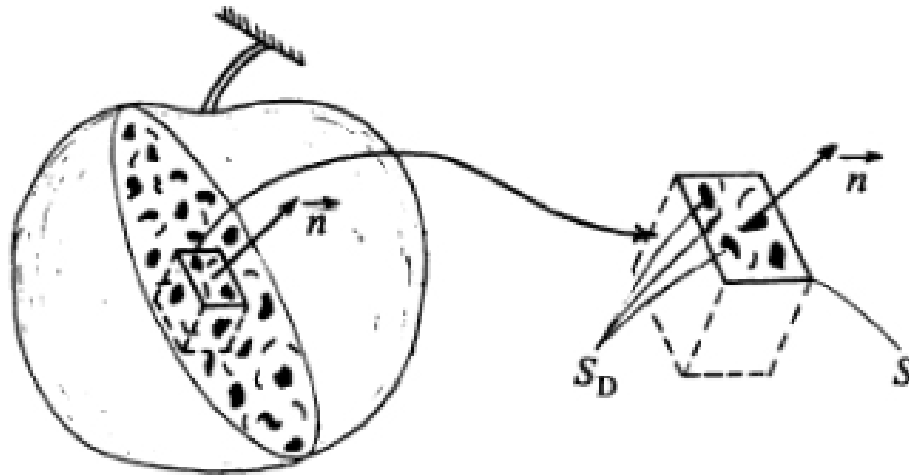


Fig. 1.8. Ejemplo en un elemento de daño [27].

Por lo tanto, el área total en donde esta dañada S_D se define como la suma de todas las áreas donde existen defectos y microgrietas incapaces de soportar esfuerzo. También es la diferencia del valor del área de la sección total menos el valor de la sección efectiva de resistencia [27].

B) Teoría de Palmgren-Miner

La definición más básica de daño fue realizada por Palmgren-Miner conocida como la regla de Palmgren-Miner o regla lineal de acumulación de daño. Según esta regla, el daño que sufre la pieza bajo la acción de una amplitud del esfuerzo sometido cíclicamente es proporcional al número de ciclos a los realizados por esa amplitud de esfuerzo [27].

C) Teoría de S.S. Mason

Mason intentó la cuantificación del daño acumulado por fatiga separadamente entre los dos estados. Esto hizo que obtuviese unas reglas doblemente lineales de daño, también conocida como Double linear damage rule (DLDR). Esta la definió en 1965 separando los criterios de estados en la vida del material de iniciación y propagación [27].

D) Teoría de J. Lemaitre y R. Laboche

Jean Lemaitre describe que un material es libre de daño ante la ausencia de grietas a nivel de escala microscópico. Lemaitre y Laboche desarrollaron la teoría donde predijeron que el deterioro del material al que llamaron daño se produce con el desarrollo a distintas escalas:

- Atómica: Las propiedades mecánicas de los materiales están determinadas por los átomos o moléculas constituyentes, su matriz y el tipo de fuerzas interatómicas o

intermoleculares entre ellas. El daño de los materiales en la escala atómica es inducido por la separación de estos enlaces interatómicos o intermoleculares [27].

- Microscópica: Cuando un material se observa en una cierta escala, aunque el campo visual tiene una estructura discontinua en su conjunto, puede haber regiones en parte continuas en el material. Este nivel de escala se llama generalmente la microescala. Así, los daños microescala, es decir, daño microscópico, se encuentra en microcavidades, microfisuras, o en la descohesión en microestructuras de materiales. La ruptura de fibra y la descohesión de la interfase de fibra-matriz en materiales compuestos reforzados con fibra son ejemplos del último caso [27].
- Mesoscópica: Los materiales en la actualidad contienen varias discontinuidades microscópicas, por ejemplo, microcavidades, microfisuras, granos de cristal o inclusiones. Tomando en consideración una pequeña región de una escala apropiada alrededor de un punto arbitrario de un material. Si el valor que representa una propiedad o un estado mecánicos del material promediado sobre la región pequeña se puede expresar como una función continua de la posición del punto material, entonces el material se puede idealizar como un continuo. Luego, se dice que la escala de la región es mesoescala [27].

1.7. MODOS DE FALLA

A veces se describen los modos de falla como categorías de falla. Un modo de falla potencial describe el camino por el cual un producto, equipo o proceso pudiera no cumplir la función deseada (intención del diseño o requerimientos de actuación) tal como se establece en las necesidades, especificaciones y expectativas de los clientes externos e internos [28]

Según la norma SAE-JA1011 el modo de falla se define como un evento único que causa una falla potencial. La norma ISO-14224 describe el modo de falla como efecto por el que se observa una falla en un ítem fallado. También, se puede definir como la manera en que un sistema o componente puede fallar en el cumplimiento de sus requerimientos [28].

1.7.1. CLASIFICACIÓN DE LAS FALLAS

Los modos de falla representan las diversas formas en que un sistema puede dejar de cumplir sus funciones, y estos se pueden clasificar según las causas que los generan. Entre los principales tipos de fallas se encuentran aquellas por fatiga, desgaste, corrosión y fluencia, cada una con mecanismos específicos que comprometen la integridad y el rendimiento del sistema. Estas categorías permiten analizar detalladamente cómo y por qué se producen las fallas, facilitando su identificación y prevención.

A) Fallo por fatiga

En la ciencia de los materiales, la fatiga es el debilitamiento de un material causado por una carga cíclica que da lugar a un daño estructural progresivo, frágil y localizado, la cual es el modo de fallo más habitual y el que generalmente produce otros tipos de fallos. Una vez que se ha iniciado una grieta, cada ciclo de carga hará crecer la grieta un poco más, incluso cuando los esfuerzos alternos o cíclicos repetidos sean de una intensidad considerablemente inferior a la resistencia normal [29].

B) Fallo por desgaste

El desgaste es un daño superficial inducido mecánicamente que elimina progresivamente material por efecto del movimiento relativo entre superficies o por el contacto entre la superficie y una sustancia, como un fluido o las partículas duras y abrasivas que, por ejemplo, forman parte de un lubricante [29].

C) Fallo por corrosión

Hay que tener en consideración que todos los metales y aleaciones están sujetos a corrosión. En este sentido, la corrosión se asocia al fallo mecánico de un objeto y se produce cuando los átomos de metal se desprenden de su elemento estructural hasta que éste falla. Otro modo de fallo por corrosión muy habitual es el que se produce por acumulación de óxido en una tubería hasta que se tapona [29].

D) Fallo por fluencia

La fluencia consiste en la deformación permanente que aumenta con el tiempo bajo una carga o esfuerzo constante. Se produce debido a la exposición prolongada a grandes esfuerzos mecánicos externos y es más grave en materiales sometidos a calor durante mucho tiempo. En este aspecto, es un modo de fallo muy considerado en industrias como la aeroespacial, por ejemplo, al diseñar motores a reacción [29].

1.7.2. ANÁLISIS DE FALLAS

El Análisis de Modos de Fallas y Efectos (FMEA) es una herramienta para realizar un análisis sistemático y proactivo de un proceso en el que pueden ocurrir daños. En un FMEA, un equipo, que representa todas las áreas del proceso bajo revisión, se reúne para predecir y registrar dónde, cómo y en qué medida el sistema podría fallar. Luego, los miembros del equipo con la experiencia adecuada trabajan juntos para idear mejoras y así prevenir dichas fallas, especialmente las que puedan ocurrir o causar daños graves a los pacientes o al personal [30].

La herramienta FMEA solicita a los equipos que revisen, evalúen y registren lo siguiente:

- Pasos en el proceso
- Modos de falla (¿Qué podría salir mal?)
- Causas de falla (¿Por qué ocurriría la falla?)
- Efectos de falla (¿Cuáles serían las consecuencias de cada falla?)

Los equipos utilizan FMEA para evaluar los procesos en busca de posibles fallas y así prevenirlos, corrigiendo dichos procesos de manera proactiva en lugar de reaccionar ante eventos adversos después de que ocurrieron fallas. Este énfasis en la prevención puede reducir el riesgo de daño tanto para los pacientes como para el personal. FMEA es útil para evaluar un nuevo proceso antes de la implementación y para evaluar el impacto de un cambio propuesto en un proceso existente [30].

1.8. MODOS DE FRACTURA

Se puede definir a la Fractura como la culminación del proceso de deformación plástica. En general, se manifiesta como la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo la acción de un dado estado de cargas [30].

En la práctica, todas las estructuras ingenieriles contienen fisuras, o defectos tipo fisuras a alguna escala, en la mayoría de los casos detectables por medio de ensayos no destructivos, los cuales revelan algún defecto; como en general la estructura o pieza se ha estado comportando satisfactoriamente, se produce la discusión si el defecto deberá ser reparado o no. La situación se complica cuando se

sabe, o se sospecha, que el defecto puede crecer lentamente por fatiga o por acción del medio ambiente. Además, se reconoce que cuando existen ciertas condiciones, se puede producir una fractura frágil inestable a niveles de esfuerzo bien por debajo del límite de diseño elástico (por ejemplo: bajas temperaturas de servicio, defectos de soldadura, etc.).

El conocimiento de la mecánica de fractura mejora las condiciones de diseño donde los efectos de los defectos y las condiciones de operación son explícitamente tomados en consideración para reducir las consecuencias de una posible fractura.

La mecánica de fractura considera el efecto de los defectos semejantes a fisuras (tanto en micro como en macro escala) sobre la integridad estructural. Se basa en la suposición de que fisuras o defectos semejantes a fisuras están inicialmente presentes, o se podrían desarrollar durante el servicio.

En un criterio simple, la fractura está dada por la condición de que una fisura se propague. La mecánica de fractura busca cuantificar las combinaciones críticas de esfuerzo y tamaño de fisura que produzcan la extensión de la misma.

Los tres parámetros importantes que analiza la mecánica de fractura son (ver fig.1.9):

- 1) El esfuerzo global aplicada sobre el componente o estructura (σ);
- 2) Las propiedades de resistencia a la fractura, características del material; y
- 3) El tamaño de cualquier defecto presente semejante a una fisura (a).

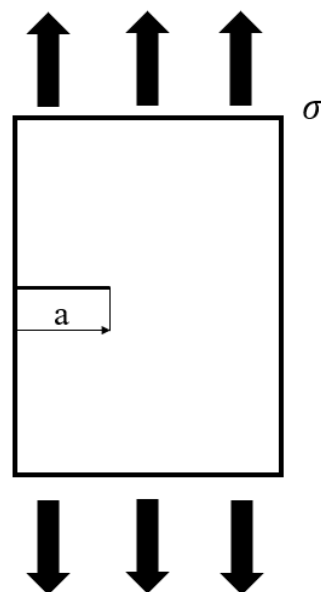


Fig. 1.9. Diagrama de una fisura [30].

1.8.1. FRACTURA FRÁGIL

Muchos sólidos presentan fracturas precedidas por cantidades muy pequeñas de deformación plástica, con una fisura propagándose rápidamente a lo largo de planos cristalográficos bien definidos que poseen baja energía superficial. Este tipo de fractura se denomina frágil.

Un análisis realizado por Griffith, sobre la base de la primera ley de la termodinámica, el cual establece que en un sistema cerrado la energía se conserva. Dos tipos de energía se consideran, energía de deformación y energía de superficie. Se consideran dos probetas en forma de láminas, delgadas, sujetas a un esfuerzo de tracción " σ ". Una probeta tiene una fisura, que es muy pequeña en longitud respecto al ancho de la lámina; la otra no tiene fisura. Si cada una de estas probetas se cargan a tracción hasta obtener el mismo desplazamiento, habrá una pequeña diferencia en los gráficos carga-deformación, ya que se requerirá menos carga para extender la probeta fisurada que la no fisurada, una dada cantidad. Como se expresa en la Ec. 1.2.

$$K = (2/\pi)\sigma(\pi * a)^{1/2} \quad (1.2)$$

La mecánica de fractura define un parámetro K, denominándolo factor de intensidad de los esfuerzos, que como se explicó anteriormente, depende entre otras cosas del tipo de carga y la geometría de la fisura presente (σ y a). El trabajo necesario por unidad de área para extender la fisura suele designar como fuerza impulsora crítica (G_c).

Las propiedades de los materiales, los esfuerzos y los defectos se relacionan entre sí en términos de los parámetros del campo del extremo de la fisura.

Cualquier movimiento relativo de las superficies de una fisura se puede obtener como una combinación de tres movimientos básicos o modos de apertura, o sea, existen tres diferentes modos de carga en un cuerpo fisurado:

- Modo I: Apertura; el cuerpo fisurado se carga con esfuerzos normales.

- Modo II: Deslizamiento o corte plano; el desplazamiento de la superficie de la fisura se halla en el plano de fisura y es perpendicular al borde principal de la fisura.
- Modo III: Rasgado, causado por corte fuera de plano; el desplazamiento de las superficies de la fisura se halla en el plano de fisura y es paralelo al borde principal de la fisura.

1.8.2. FRACTURA DÚCTIL

Algunos metales sometidos a un ensayo de tracción presentarán una estricción en la zona de ensayo de la probeta para romper finalmente con valores de reducción de área que pueden llegar en algunos casos cerca del 100%. Este tipo de fractura se denomina dúctil. Existe sin embargo considerable confusión respecto de la manera de diferenciar entre ambos tipos de fractura. Esto obedece fundamentalmente a que en general se tiende a considerar el proceso global de deformación que conduce al fenómeno de fractura. Ahora bien, un metal puede fallar por clivaje, que es un proceso de fractura frágil, luego de una deformación macroscópica importante. Del mismo modo, es posible tener en un metal una deformación plástica global despreciable, que finalmente falla de manera dúctil.

La confusión se reduce si en lugar de considerar el proceso global de deformación que precede a la fractura, se tiene en consideración la deformación localizada en el material que rodea al vértice de la fisura durante la propagación de la misma. De este modo, la fractura frágil es aquella en la cual la fisura se propaga con muy poca deformación plástica en su vértice, mientras que la fractura dúctil es aquella que progresa como consecuencia de una intensa deformación plástica asociada al extremo de la fisura.

1.9. LEY FORESTAL DE EL SALVADOR

Durante el proceso de secado de la madera en ausencia de oxígeno, se eliminan los componentes volátiles, como el agua y otros gases, dejando atrás una

estructura carbonosa. El resultado es un material con alto contenido de carbono y baja presencia de otros elementos, lo que lo hace similar en composición al carbón mineral.

Sin embargo, es importante señalar que el carbón de madera no es idéntico al carbón mineral en términos de contenido de carbono y otras propiedades. El carbón mineral se forma a partir de la transformación de materia orgánica en el subsuelo durante millones de años, mientras que el carbón de madera se obtiene mediante un proceso de carbonización más rápido y controlado. Aunque ambos materiales tienen un alto contenido de carbono y se utilizan en diversas aplicaciones, hay diferencias en su estructura y propiedades debido a sus diferentes orígenes y métodos de formación.

A pesar de ello existe la posibilidad de su uso en los procesos de cementación por ello es importante tomar en consideración las leyes forestales de El Salvador.

1.9.1. APROVECHAMIENTO DE BOSQUES NATURALES

El artículo 8 regula el aprovechamiento de bosques naturales en propiedades privadas, exigiendo un plan de manejo forestal elaborado por el propietario y aprobado por el MAG para garantizar su uso sostenible.

Art. 8. Cualquier aprovechamiento de los bosques naturales de propiedad privada, estará regulado por su respectivo plan de manejo forestal, el cual será elaborado bajo la responsabilidad del propietario o poseedor del terreno y aprobado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) [31].

1.9.2. APROVECHAMIENTO POR CAUSAS NATURALES

El artículo 11 establece que el aprovechamiento de productos y subproductos forestales de árboles dañados o caídos por causas naturales en bosques naturales debe ser autorizado por el MAG al propietario o poseedor del terreno.

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

1.9.3. APROVECHAMIENTOS ILÍCITOS

El artículo 13 establece que los productos y subproductos forestales de origen ilícito, cuyo origen no pueda ser comprobado, serán decomisados por la autoridad competente y entregados al MAG. Si el legítimo propietario no reclama los bienes en un plazo de 15 días hábiles, el MAG podrá disponer de ellos y venderlos a precio de mercado, destinando los ingresos al Fondo de Actividades Especiales del organismo encargado de la actividad forestal.

Art. 13. Los productos y subproductos forestales cuyo origen ilícito no pueda ser demostrado legalmente, serán decomisados por la autoridad competente y puestos a la orden del MAG. Transcurridos quince días hábiles sin que el legítimo propietario presente el reclamo correspondiente, el MAG podrá disponer de ellos sin perjuicio de la aplicación de las sanciones respectivas.

1.9.4. APROVECHAMIENTOS PERMITIDOS

El artículo 17 establece que los aprovechamientos presentes están exentos del requerimiento de planes de manejo forestal y autorización

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

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

1.9.5. OBLIGACIÓN DE PROBAR ORIGEN DE MADERA

El artículo 18 establece que, para el transporte de productos forestales maderables y no maderables provenientes de árboles aislados y sistemas

agroforestales sin plan de manejo, se requiere un permiso emitido por el MAG. En el mismo sentido, el artículo 19 obliga a las personas naturales o jurídicas que transporten, almacenen, comercialicen o industrialicen productos forestales bajo un plan de manejo a demostrar su origen legal mediante documentos, incluyendo un formato proporcionado por el productor con el número de registro forestal emitido por el MAG.

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

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

1.9.6. USO RESTRINGIDO

El artículo 23 establece las Áreas de Uso Restringido, específicamente los casos donde los propietarios deben manejar la vegetación de manera sostenible.

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

- A) Los terrenos que bordeen los nacimientos de agua o manantiales, en un área que tenga por radio por lo menos veinticinco metros, o lo que determine el estudio técnico respectivo, medidos horizontalmente a partir de su máxima crecida.
- B) Los terrenos riberaños de ríos y quebradas en una extensión equivalente al doble de la mayor profundidad del cauce, medida en forma horizontal a partir del nivel más alto alcanzado por las aguas en ambas riberas en un período de retorno de cincuenta años.
- C) Los terrenos en una zona de cincuenta metros medida horizontalmente a partir de su más alta crecida en tiempo normal de los lagos y lagunas naturales y de las riberas de los embalses artificiales construidos por el Estado o por particulares la cual deberá estar permanentemente arbolada.

- D) Los terrenos de las partes altas de las cuencas hidrográficas, en especial las que están en zona de recarga hídrica.
- E) Las áreas que por su potencial de deslizamiento debido a fuertes pendientes constituyen un peligro para las poblaciones; y
- F) Los suelos clase VIII.

1.9.7. COMPETENCIA SANCIONATORIA

El artículo 34 otorga al MAG la competencia para conocer las infracciones a la presente ley e imponer las sanciones correspondientes, sin perjuicio de las acciones judiciales que puedan corresponder.

Art. 34. Corresponde al MAG conocer de las infracciones a la presente Ley e imponer las sanciones respectivas, sin perjuicio de la acción judicial correspondiente.

Las infracciones a esta Ley y sus respectivas sanciones son las siguientes:

- A) Talar sin la autorización correspondiente, árboles en los bosques naturales: 2 a 5 salarios mínimos por cada árbol talado.
- B) Comercializar las guías de transporte para productos forestales: 2 a 5 salarios mínimos por cada guía.
- C) Incumplir las medidas y disposiciones que se dicten sobre plagas y enfermedades forestales: 3 a 5 salarios mínimos.
- D) El propietario, colindantes, o cualquier otra persona que estando legalmente obligada se negare a colaborar en la extinción de incendios forestales, una vez requerido al efecto para la autoridad correspondiente: 2 a 3 salarios mínimos.
- E) Dejar abandonados en los bosques naturales, materiales inflamables o que puedan originar combustión o peligros de incendios tales como gasolina u otra clase de combustible, cigarrillos encendidos, vidrios; 3 a 5 salarios mínimos.
- F) Transportar productos o subproductos forestales, sin la documentación que acredite su legítima procedencia o presentarla con falsificaciones o alteraciones: 5 a 8 salarios mínimos.
- G) Efectuar quemas de cualquier clase, excepto cuando se prescriba como actividad silvicultural: 5 a 8 salarios mínimos.
- H) No cumplir con los lineamientos o condiciones establecidas en las autorizaciones otorgadas por el MAG: 20 a 25 salarios mínimos.

- I) Destruir por cualquier medio bienes del patrimonio Forestal del Estado a que se refiere esta Ley; 8 a 10 salarios mínimos.
- J) Aprovechar por cualquier medio los bienes del patrimonio Forestal del Estado a que se refiere esta Ley, sin la autorización correspondiente: 10 a 12 salarios mínimos.
- K) Obstruir u obstaculizar por cualquier medio a los funcionarios o empleados del MAG para que cumplan con sus funciones relacionadas con esta Ley: 5 a 8 salarios mínimos.
- L) Provocar incendios en los bosques naturales y plantaciones forestales: 20 a 25 salarios mínimos por hectárea dañada, sin perjuicio de la acción penal a que hubiere lugar.
- M) Incumplir las recomendaciones o medidas que se hayan dado para evitar incendios o controlarlos, cuando éstos ocurran: 10 a 15 salarios mínimos.
- N) Instalar en plantaciones y bosques naturales o en sus inmediaciones, hornos de cualquier clase, maquinarias, combustibles o explosivos que puedan crear peligro, sin cumplir con las normas de seguridad, prevención y control de incendios: 15 a 20 salarios mínimos.
- O) Derribar o destruir árboles que por razones históricas o que por ser especie en peligro de extinción deban ser conservados, a menos que se cuente con la autorización correspondiente: 20 a 25 salarios mínimos.

Por lo tanto, el presente trabajo se centrará en la evaluación del daño acumulado por fatiga en probetas de acero SAE 1020 que han sido sometidas a un proceso de cementación con carbón vegetal de bálsamo. El objetivo principal es analizar de manera detallada cómo este tratamiento termoquímico específico influye en la acumulación de daño en el acero, comparando sus propiedades antes y después de la cementación. Para alcanzar este propósito, se llevará a cabo un análisis experimental bastante completo, que incluirá pruebas y mediciones para evaluar las propiedades mecánicas del material, permitiendo así comprender mejor las implicaciones de dicho tratamiento en su desempeño estructural.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el diseño experimental para evaluar el comportamiento de probetas de acero SAE 1020 cementadas, con post-tratamiento térmico de temple y revenido, frente al daño por fatiga. Se describen las etapas clave del estudio, que incluyen el dimensionamiento y maquinado de las probetas, el proceso de cementación con carbón vegetal de bálsamo, y el diseño de los ensayos mecánicos.

Los ensayos abarcan pruebas de fatiga por flexión rotativa, análisis de daño acumulado, ensayos de dureza, así como estudios metalográficos y fractográfico para caracterizar las muestras. También se detallan los equipos, parámetros empleados y procedimientos de preparación de probetas para los análisis. Finalmente, se presenta el método para la medición del espesor de la capa cementada, un aspecto clave para evaluar la calidad del tratamiento superficial y su influencia en la resistencia del material.

2.1. FLUJOGRAMA DE LA METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A continuación, se representa de forma sistemática y ordenada los pasos que se seguirán para desarrollar este trabajo de aplicación. Es por ello, que se creó un flujograma (ver Fig. 2.1) iniciando con el dimensionamiento necesario de probetas, continuando con la descripción de todas las etapas del proceso de cementación, la obtención de probetas listas para ser ensayadas, la realización de los ensayos de fatiga y un estudio de la capa cementada.

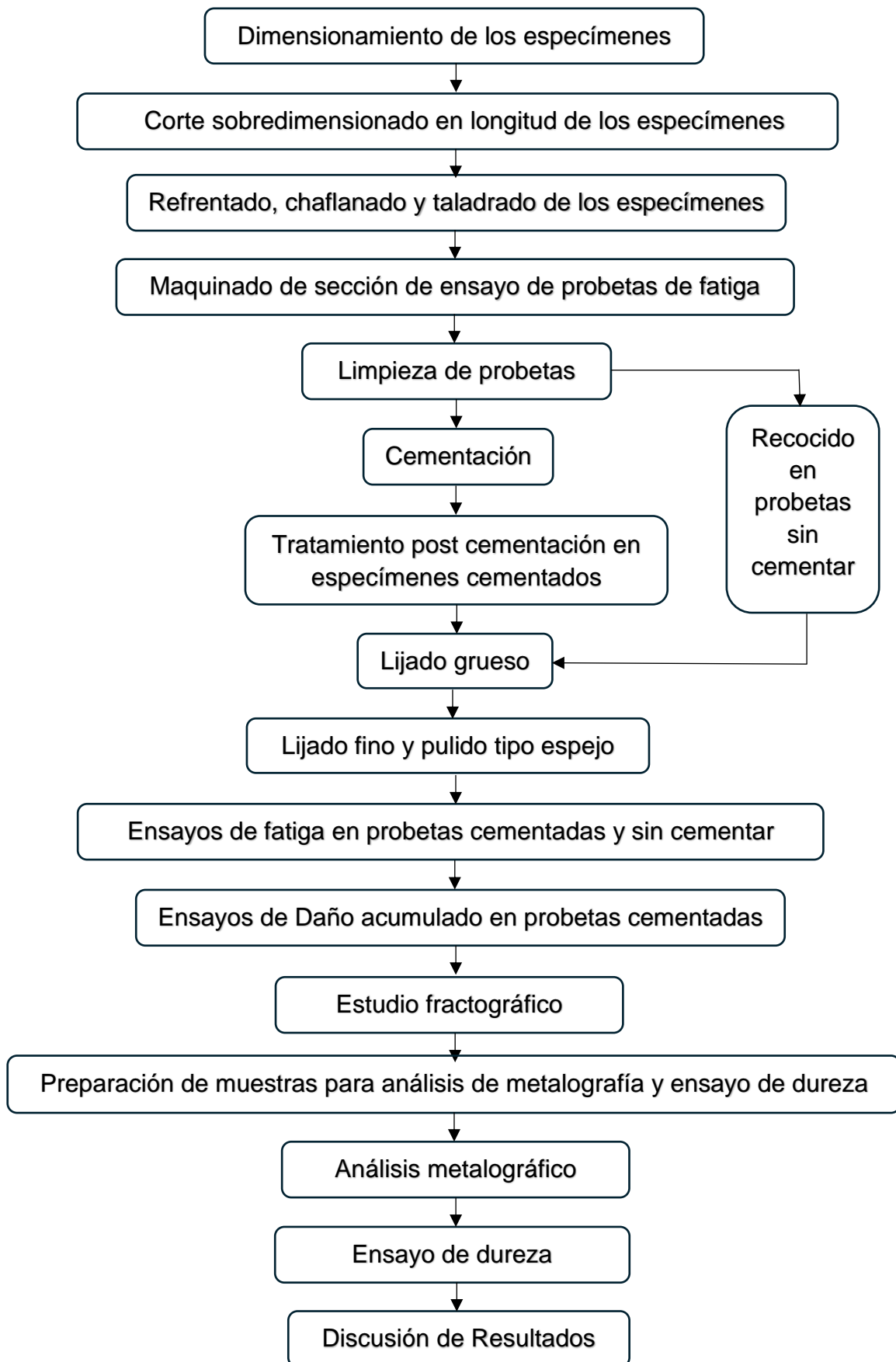


Fig. 2.1. Flujograma de actividades para el desarrollo del experimento.

2.2. DIMENSIONAMIENTO DE PROBETAS

El dimensionamiento de probetas se realizó sobre la base del manual de la máquina para ensayos de fatiga por flexión rotativa marca GUNT modelo WP 140.

El diámetro mayor de la probetas es de 12 mm, con una medida real que oscila entre 12.00 y 11.96 mm debido al ajuste, la longitud de esa sección es de 40 mm para una buena sujeción en la mordaza de la máquina ya que para evitar fallos en el agarre de estas probetas este extremo es de mayor sección, el diámetro menor es de 8.00 mm, permitiendo una tolerancia que oscila entre 7.99 y 7.97 mm, en ese extremo se prefirió utilizar 7.97 mm debido a que se facilita el montaje de la probeta en el rodamiento del equipo, la longitud del cilindrado de menor diámetro es de 104 mm, y en la unión entre las dos secciones de diferente diámetro la probeta posee un radio de 8 mm, la longitud total de probetas es de 146 mm, en cada extremo se maquinó un chaflán de 1 mm a 45°, con el fin de eliminar las aristas vivas, el resumen de las dimensiones de probetas maquinadas se presentan en la Fig. 2.2.

Las probetas se pulieron utilizando diferentes tipos de papel lija de SiC, desde una más gruesa (papel lija número 100) hasta una más fina (papel lija número 1,500) con el fin de eliminar las rayas del maquinado, lo cual se consiguió totalmente al ser lijadas diagonalmente o en dirección longitudinal.

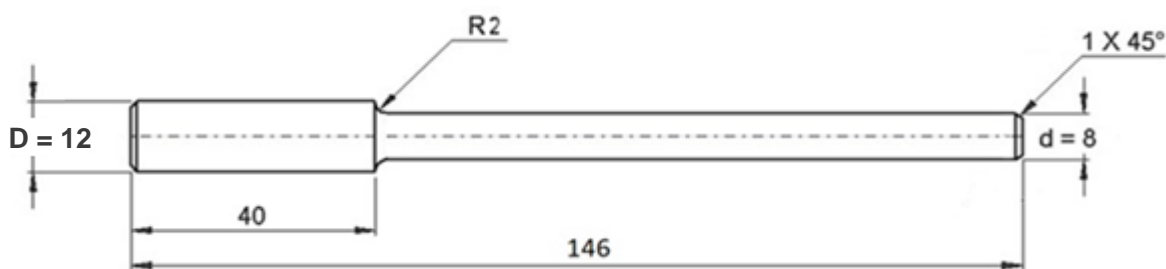









Fig. 2.2. Dimensiones de probetas para ensayos de fatiga y daño acumulado [33]. Cotas en mm.

2.3 MAQUINADO DE PROBETAS

El proceso de maquinado de probetas inició con un corte sobredimensionado de los especímenes, a una longitud de 164 mm, utilizando una sierra manual y asegurando la barra de acero en una prensa mecánica. Posteriormente, en un torno, se llevó a cabo el refrentado y la perforación de los especímenes con una broca de

centrado, permitiendo su correcta ubicación en el centro del torno para las operaciones de mecanizado. Seguidamente, la sección de ensayo de probetas fue trabajada en el torno. A continuación, se realizó un corte adicional con sierra manual y un refrentado en ambas caras, logrando las dimensiones finales y eliminando los agujeros de centrado. Para culminar el proceso, se realizaron biseles a 45° en ambos extremos de las probetas. Finalmente, el proceso concluyó con un pulido meticuloso, empleando papel de lija de carburo de silicio (SiC), comenzando desde un grano grueso de número 100 hasta una lija fina de número 600. El proceso se detalla en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Proceso de la fabricación de probetas para ensayos de fatiga por daño acumulado por fatiga.

Operación	Equipo y herramientas	Esquema
Corte de la barra de acero SAE 1020 a un diámetro de 12.7 mm y una longitud de 150 mm.	<ul style="list-style-type: none"> • Prensa mecánica • Marcador • Sierra manual • Cinta métrica 	
Refrentado en el lado de diámetro menor y perforación de centro punto y refrentado en cara de diámetro mayor a longitud final de 146 mm.	<ul style="list-style-type: none"> • Torno convencional • Broca para hacer centros • Equipo de protección para el uso del torno • Butil de refrentar 	
Primer cilindrado a un diámetro final de 12 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Torno convencional • Vernier • Butil para cilindrar 	
Segundo cilindrado a un diámetro de 8 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Torno convencional • Butil para cilindrar • Vernier • Equipo de protección para el uso del torno 	
Biselado en los extremos y cambio de sección con radio de 2 mm de la probeta	<ul style="list-style-type: none"> • Probeta • Torno convencional • Vernier digital • Sierra manual 	
Recocido de alivio de esfuerzos residuales a 875 °C.	<ul style="list-style-type: none"> • Horno con cámara para tratamientos térmicos • Tanque de Argón • Aceite para realizar el enfriamiento 	
Lijado de probetas para ser cementadas.	<ul style="list-style-type: none"> • Papel lija 100 hasta la 600 	

2.4. CONDICIONES EXPERIMENTALES DE TRABAJO

Para desarrollar la cementación sólida de probetas, es esencial comprender y controlar una serie de variables claves. En este contexto, se llevó a cabo un análisis descriptivo de las siguientes variables críticas en el diseño del experimento: acero utilizado, las variaciones en la composición de la mezcla cementante, el tiempo de cementación aplicado, descripción de probetas tanto en las pruebas de capa endurecida como en los ensayos de fatiga y daño acumulado por fatiga y la respectiva distancia entre ellas, todos los cuales desempeñan un papel esencial en la determinación de las condiciones de esta investigación, estas son:

- Descripción del acero SAE 1020: El acero que se utilizó fue el SAE 1020, es un material versátil y ampliamente utilizado en la industria debido a sus propiedades mecánicas y características químicas favorables, responde bien al trabajo en frío y al tratamiento termoquímico de cementación. Tiene un alto índice de soldabilidad, y por su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para elementos de maquinaria y usos convencionales de baja exigencia. Este tipo de acero pertenece a la familia de los aceros de bajo carbono y es usado para la fabricación de ejes, cadenas, remaches, tornillos, pernos, sujetadores, engranajes, piñones, piezas de maquinaria, pasadores de baja resistencia, prensas y levas, su composición se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Composición química del acero SAE 1020.

Elemento	C	Mn	Si	P	S
Porcentaje, %	0.18 - 0.23	0.30 - 0.60	0.15 - 0.30	0.04 máx.	0.05 máx.

Como se sabe la cementación sólida es un proceso de tratamiento termoquímico en el que se incrementa la dureza y la resistencia superficial de un material de bajo contenido de carbono, como el SAE 1020, lo que lo convierte en un buen candidato debido a su contenido de carbono relativamente bajo, que permite que el proceso tenga un efecto notable en la capa superficial sin hacer que el material se vuelva frágil en su conjunto. Estas características hacen que sea una elección común en aplicaciones donde se requiere un incremento en la dureza superficial y la resistencia mecánica, como componentes de maquinaria y piezas sujetas a desgaste en la industria.

- Calibración del Horno: En todo proceso experimental los instrumentos y equipos a utilizar se deben calibrar con el fin de reducir el margen de error en la lectura y obtención de datos. Si el horno no está calibrado correctamente, la temperatura real en el interior del horno puede diferir significativamente de la temperatura deseada, lo que afectaría la calidad y la consistencia de la cementación. La calibración adecuada del horno garantiza que el proceso se pueda repetir con precisión. El horno que se utilizó en el experimento se calibro de la siguiente manera:
 - ✓ Para empezar, se garantizó que el horno estuviese limpio y en condiciones adecuadas de funcionamiento. Luego se colocó la termocupla en el interior del horno, lo más cerca posible de la ubicación donde se desea medir la temperatura, de tal manera que esté correctamente posicionada y fija en su lugar y se continuará a configurar el controlador del horno para que funcione a la temperatura deseada, que servirá como punto de referencia para la calibración.
 - ✓ Se registraron las lecturas de temperatura de la termocupla en intervalos regulares de 15 min mientras el horno alcanza y mantiene la temperatura deseada. Comparando las lecturas de temperatura de la termocupla con las lecturas del equipo de medición de temperatura de referencia, si hay una diferencia significativa entre las dos lecturas, se ajustara el controlador del horno para que la temperatura coincida con la lectura de referencia.
- Carbón vegetal: En este trabajo de aplicación se utilizó carbón de madera de bálsamo. Siendo este un subproducto, se puede considerar un recurso renovable y también a menudo es económico. La madera de bálsamo es conocida por su durabilidad y resistencia a la descomposición, lo que la hace ideal para diversas aplicaciones. Sin embargo, al igual que otros tipos de madera, la madera de bálsamo puede contener más humedad que el carbón vegetal tradicional. La humedad puede afectar los procesos termoquímicos, por lo que es importante secar adecuadamente el material antes de su uso. El secado se puede hacer al aire libre o en hornos industriales controlados. Los granos de carbón vegetal obtenidos a partir de la pirolisis fueron fragmentados y tamizados hasta obtener un tamaño de grano de entre 4 y 5 mm, luego el carbón se sometió a un proceso de secado dentro del horno a una temperatura de 150 °C durante 4 h [32].

- Descripción de la mezcla: Como mezcla cementante se puede utilizar una proporción de 70 a 80% de carbón vegetal triturado de tamaño de grano de 3 a 6 mm, con un 20 a 30% de alguno de los siguientes carbonatos: carbonato de bario (BaCO_3), carbonato de sodio (Na_2CO_3) o carbonato de potasio (K_2CO_3) que actúan como catalizador y que contribuyen al desprendimiento del carbono en estado elemental, necesario para la cementación [32]. La proporción de mezcla cementante que se utilizó en este trabajo de aplicación fue: Mezcla 80:20 mezcla compuesta de un 80% en peso de carbón vegetal a partir de la madera de bálsamo y un 20% en peso de Carbonato de Bario.
- Tiempo de cementación: Entre las variables analizadas en la cementación sólida, se incluye el factor del tiempo, y en el contexto de este proceso en particular, sobre la base de una investigación previa, se determinó trabajar con un tiempo de 8 h [32].
- Determinación del número de probetas: La cantidad de probetas que se requirió para llevar a cabo los ensayos de fatiga y daño acumulado por fatiga es un aspecto fundamental en la planificación y ejecución de estos procesos. La elección de este número está estrechamente relacionada con la precisión de los resultados que se buscan obtener, además el número de probetas que se utilizó depende del tamaño y forma de la cámara del horno. Por lo tanto, fue esencial establecer con precisión cuántas probetas se necesitan para cada tipo de ensayos.

El análisis experimental se llevó a cabo utilizando un total de 40 probetas de acero SAE 1020. Para los ensayos de fatiga, se tienen 2 grupos: G1) se emplearon 6 probetas sin cementar (metal base) y G2) 6 probetas cementadas, estas probetas se sometieron a un conjunto de cargas cíclicas de la misma amplitud a diferentes niveles hasta alcanzar la fractura, lo que permitió evaluar la resistencia y la durabilidad del material en condiciones de uso repetitivo, lo que permitió una comparación entre ambas condiciones. Además, se utilizaron 16 probetas cementadas específicamente para el análisis de daño acumulado por fatiga, divididas en 4 grupos: primero G3 y G4) dos bloques de esfuerzos alternantes ascendentes el primero a bajo esfuerzo durante 25 y 50% de la vida encontrada respectivamente, luego se aplicó el otro bloque a alto esfuerzo hasta que fallaron las probetas (4 probetas para cada grupo); por último G5 y G6) dos bloques de esfuerzos alternantes descendentes el primero a alto esfuerzo durante 25 y 50%

de la vida encontrada respectivamente, luego se aplicó el otro bloque a bajo esfuerzo hasta que fallen las probetas (4 probetas para cada grupo).

Además, se incluyeron 12 probetas cementadas adicionales como reserva, destinadas a asegurar la continuidad del estudio en caso de imprevistos.

2.5. DISEÑO DE CAJA

El diseño de la caja para la cementación es una parte fundamental en la realización de los ensayos y pruebas, lo cual involucran probetas y especímenes. La efectividad de esta caja depende en gran medida de consideraciones claves relacionadas con sus dimensiones y la disposición de las probetas en su interior, como:

- Cálculo de largo de la caja: Para las medidas internas se consideró una separación de 2 mm entre las caras de la probeta y las paredes de la caja:

$$Largo = 2(2) + 146 = 150 \text{ mm}$$

- Cálculo de la altura de la caja: Se considero una separación de 7.5 mm entre las paredes internas de la caja respecto al diámetro menor de la probeta y de la misma forma entre cada probeta respecto a su diámetro menor, además, se agregaron 3.5 mm para asegurar el recubrimiento en su totalidad de probetas en el nivel superior. De tal manera que la altura es:

$$Altura = 7.5(5) + 8(4) + 3.5 = 73 \text{ mm}$$

De esta manera la caja de cementación tiene como dimensiones un largo de 150 mm y una altura de 73 mm, a los cuales se debe agregar un espesor de las paredes de la caja de 5 mm, estas dimensiones están cuidadosamente seleccionadas para acomodar las probetas y garantizar un espacio adecuado para llevar a cabo la cementación.

- Construcción de la caja: Se seleccionó hierro dulce de 5 mm de grosor como materia prima. La elección del hierro dulce se debe a que es conocido por su excelente maleabilidad y ductilidad, lo que facilita su conformado y soldado. Estas

propiedades permiten que el material se adapte fácilmente a las formas requeridas sin comprometer su integridad estructural (ver Fig. 2.3).

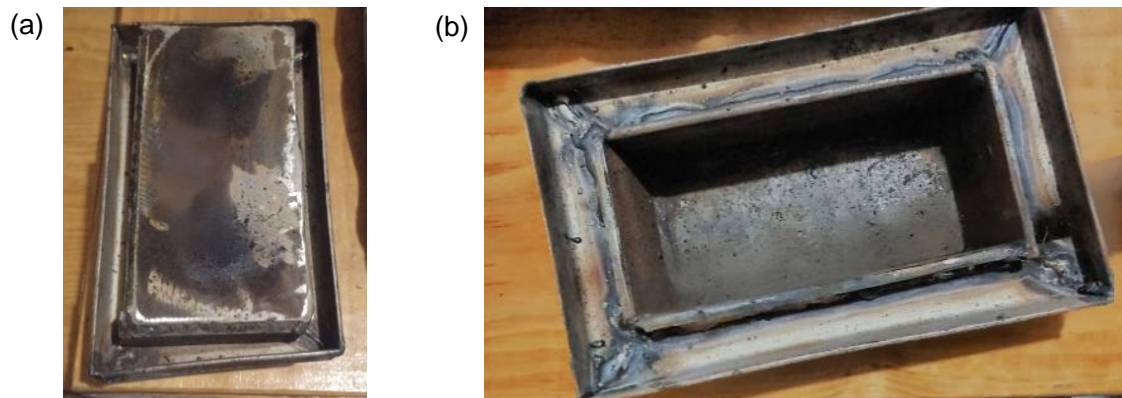


Fig. 2.3. Vista superior de la caja de cementación terminada: a) Vista con tapa puesta; y b) vista sin tapa.

Una característica importante de la caja es el canal superior, que desempeña un papel vital en la retención de calor y en el sellado adecuado de la caja. La caja tiene un canal de 10 mm de ancho y una profundidad de 10 mm. Este canal se ha diseñado meticulosamente para permitir un sellado hermético, lo que contribuye a la preservación de la atmósfera en el interno de la caja. Esto es importante, ya que la cementación requiere mantener temperaturas específicas durante ciertos períodos. La tapadera y su canal se han concebido como una solución efectiva para garantizar la atmósfera y no permitir el ingreso de oxígeno en la caja.

- Distanciamiento entre probetas: Las probetas se separaron entre sí por 7.5 mm como se presenta en la Fig. 2.4. Esto es esencial para evitar interferencias no deseadas y asegura que las condiciones de ensayo sean las más adecuadas para una cementación uniforme a lo largo de cada una de probetas, distancia considerada a partir de los resultados obtenidos en la investigación realizada por Artiga Domínguez *et. al.* [32].

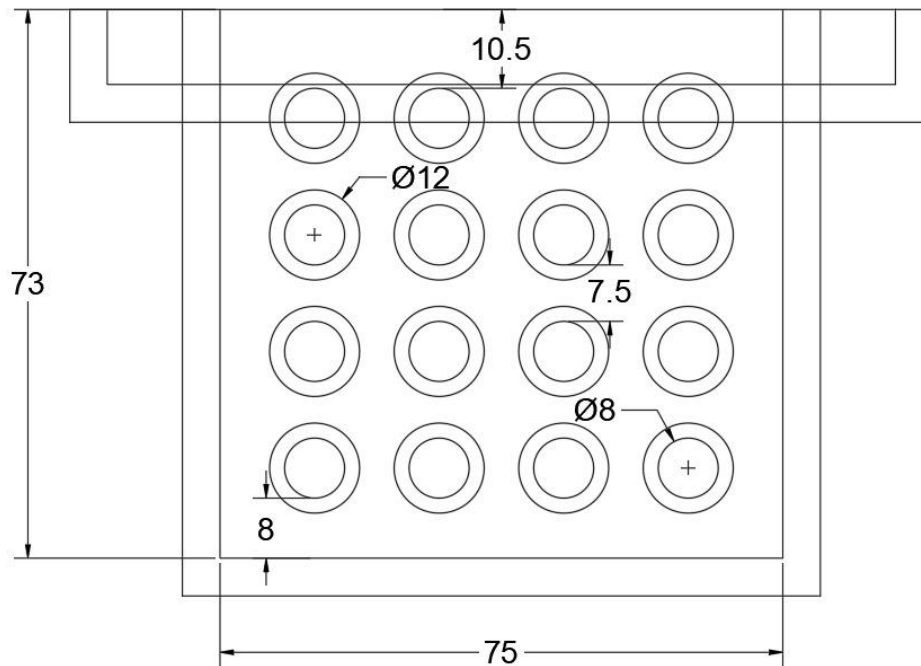


Fig. 2.4. Distribución de probetas dentro de la caja de cementación.

Además, se agregó un espacio de 3.0 mm de la parte superior de la caja de manera estratégica para permitir que las probetas puedan ser recubiertas de manera completa por la mezcla utilizada en el proceso de cementación. Esto asegurará que los elementos sometidos a ensayo estén rodeados uniformemente por el material cementante, lo que es esencial para obtener resultados precisos y reproducibles en los ensayos.

2.6. PROCESO DE CEMENTACION

A continuación, se describirán una serie de etapas que se consideran fundamentales para alcanzar los objetivos de la investigación. Estas etapas, que se abordarán con el debido rigor, se han identificado para garantizar la integridad y la validez de los datos a obtener de este trabajo y definido previamente como componentes críticos que pueden influir en los resultados experimentales.

2.6.1. ETAPAS DE LA CEMENTACION

El proceso experimental diseñado consiste en una secuencia precisa de pasos que inicia con la limpieza inicial de probetas, la preparación de la mezcla carburante, la distribución de probetas dentro de la caja y su respectivo sellado. Luego, se aplicó el tratamiento termoquímico en las probetas seleccionadas, y finalmente, se ejecutó el proceso post-cementación. Cada uno de estos pasos se diseñó a partir de una investigación previa [32], a continuación, se proporciona un análisis detallado de cada uno de estos procedimientos, así:

➤ Limpieza de probetas

Previo a la cementación, fue necesario eliminar cualquier tipo de impureza que esté presente en la superficie de las piezas; el proceso que se siguió para eliminar las impurezas fue un lavado con soda cáustica al 5% [32].

Los tiempos y temperaturas de exposición de las piezas a la soda cáustica fueron controlados y monitoreados cuidadosamente para evitar cualquier efecto adverso en el material. El uso de una concentración al 5% es relativamente suave, aunque aun así se debe manejar con precaución. El lavado se realizó a temperatura ambiente (20 a 25 °C) en un baño de 1,000 ml con 50 g de soda caustica (ver Fig. 2.5), el tiempo de inmersión fue de 10 a 20 min y finalmente se realizó un enjuague con agua, de manera completa hasta que el pH del enjuague fue neutro.

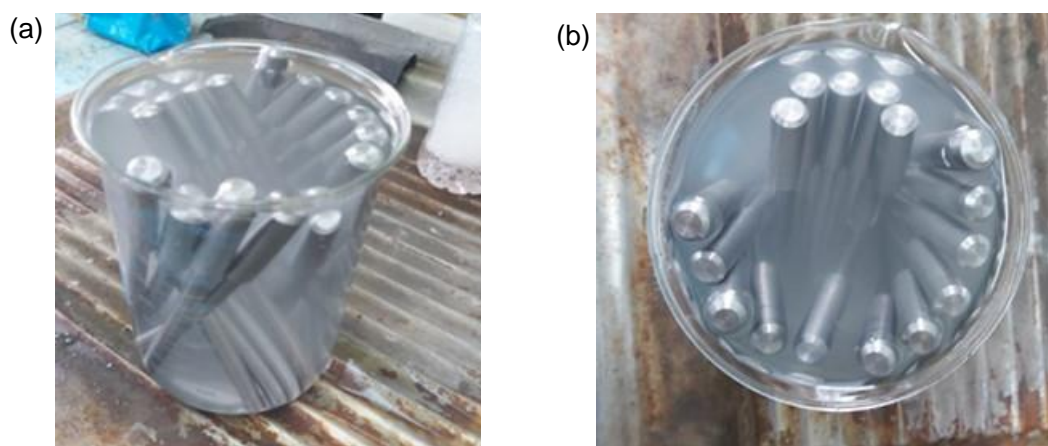


Fig. 2.5. Limpieza de probetas previo a la cementación en inmersión completa en solución al 5% soda caustica de inmersión completa: a) vista de perfil; y b) vista superior.

- Volumen de mezcla cementante: La mezcla que se utilizó estaba compuesta por un 80% de carbón vegetal reutilizado; es decir, que previamente se utilizó en un tratamiento de cementación y un 20% de carbón vegetal sin usar. El desarrollo de la cantidad necesaria se detalla a continuación:

$$V_{necesario} = (V_{interno} - 16V_{probeta}) \quad (2.3)$$

$$V_{necesario} = [838 \text{ cm}^3 - 16(9.85 \text{ cm}^3)] = 680.4 \text{ cm}^3$$

Por concepto, se sabe que el carbón vegetal es un sólido con una estructura porosa e irregular, lo que significa que no se distribuye de forma homogénea y dejará espacios vacíos entre sus partículas. Esto provoca que, el carbón ocupe menos volumen, por ello, para calcular el volumen de carbón vegetal se llenó la caja por completo y luego cuidadosamente se pesó en una báscula digital, la cantidad que se obtuvo fue de 243 g (ver Fig. 2.6). Por regla de 3, la cantidad de carbón vegetal y carbonato de bario resulta de:

$$V_{\text{Carbón}} = \frac{(243 \text{ g})(680.4 \text{ cm}^3)}{838 \text{ cm}^3} = 197.299 \text{ g}$$

$$V_{\text{BaCO}_3} = 0.2(197.299 \text{ g}) = 39.46 \text{ g}$$



Fig. 2.6. Pesaje de carbón vegetal y carbonato de bario en una báscula digital.

- Colocación de probetas dentro de la caja: Utilizando un vernier analógico, se midió con precisión la distancia entre las probetas para asegurar que se mantuvieran equidistantes a lo largo de los cuatro niveles dispuestos. Cada medición estableció una separación constante de 7.5 mm entre una probeta y otra, garantizando una distribución homogénea y simétrica en todas las direcciones. En la Fig. 2.7 se presenta como las probetas se cubrieron en su totalidad de manera uniforme por la mezcla cementante.

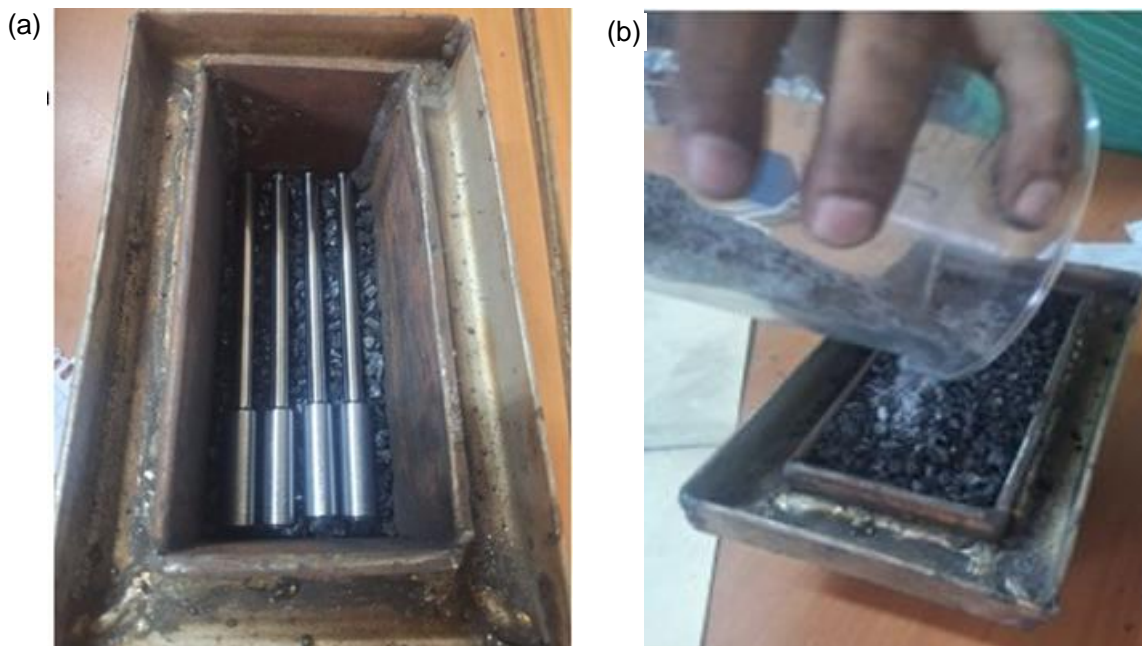


Fig. 2.7. Colocación del primer grupo de probetas: a) primer nivel inferior descansando sobre la primera capa de carbón vegetal; y b) caja una vez cubierta en su totalidad.

Para garantizar el sellado de la tapa de la caja de cementación se utilizó una masilla hecha con arena de moldeo de fundición como se presenta en la Fig. 2.8. El sellado impide que el oxígeno del aire entre en la caja durante el proceso de cementación, lo cual es crucial porque la presencia de oxígeno podría causar oxidación en las piezas de acero, además, en presencia de oxígeno el carbón vegetal se quemaría rápidamente, y en lugar de generar el ambiente rico en carbono necesario para el proceso de cementación. Esto reduciría la cantidad de carbono disponible para difundir en la superficie del acero.

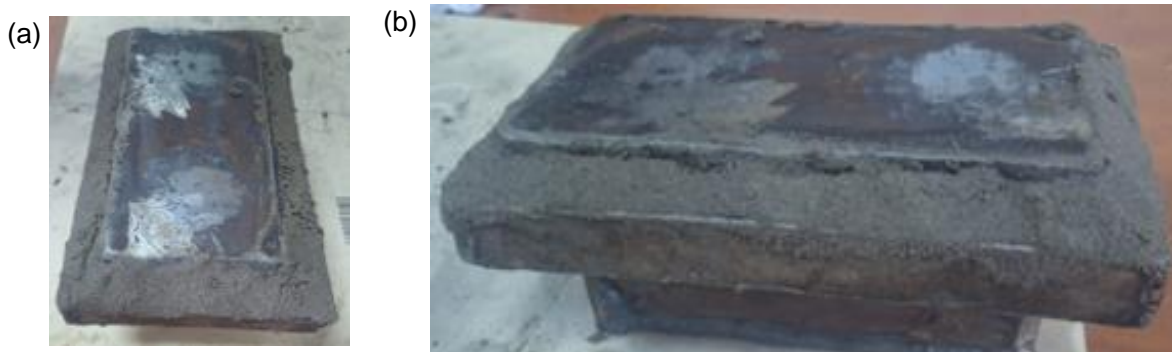


Fig. 2.8. Caja de cementación completamente sellada con arena de fundición: a) Vista superior; y b) vista lateral.

➤ TTTQ-C de probetas

La caja de cementación se ubicó al centro de la cámara del horno (ver Fig. 2.9) a una temperatura de 950 °C durante 8 h más 1 h de estabilización de la temperatura.

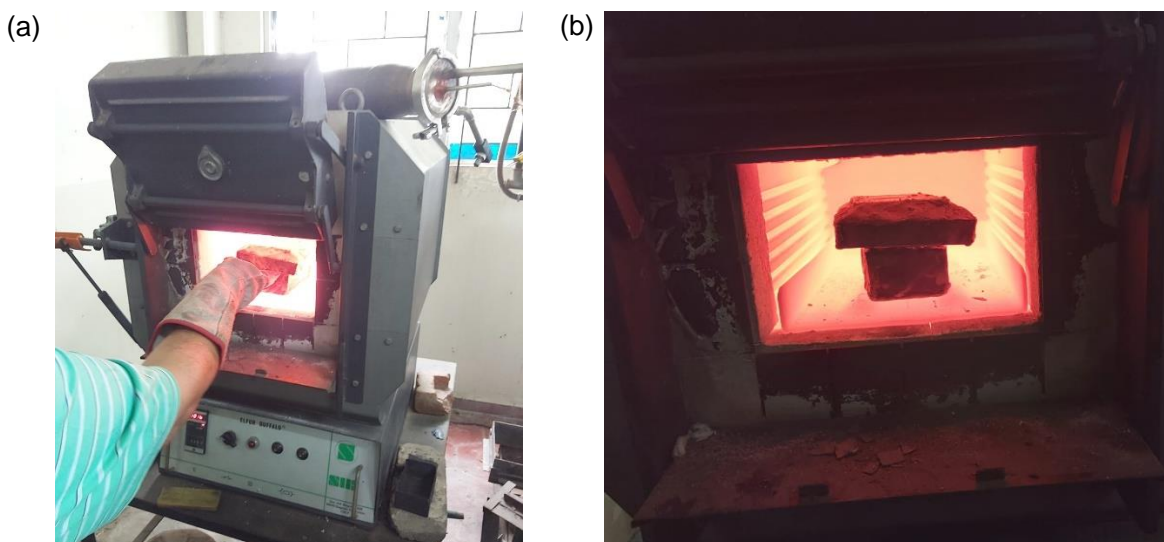


Fig. 2.9. Inicio de tratamiento termoquímico de cementación en probetas durante 8 h a 950 °C: a) Colocación de caja de cementación dentro del horno; y b) instantes antes de sellar el horno.

➤ Proceso Post-Cementación

Todas las probetas se llevaron desde la temperatura de cementación hasta la temperatura ambiente. Luego se perforaron con una broca de nitruro de titanio de 1/8 pulg a una distancia de 7 mm del extremo de la sección de agarre de la probeta para formar un mecanismo de sujeción con alambre de amarre de 0.75 mm de diámetro en dos grupos de 8 probetas cada uno (ver Fig. 2.10), de tal manera que estas se pudieron introducir en el aceite de manera vertical para evitar deflexión en las probetas. Si una probeta se introduce en una posición horizontal o inclinada, las partes

inferiores se suelen enfriar más rápido debido a la acumulación del medio de enfriamiento en esa zona. Esto puede causar una deformación desigual (curvatura o alabeo) debido a la contracción no uniforme del material. La introducción en el medio de manera vertical ayuda a reducir este efecto, manteniendo la simetría durante el enfriamiento.

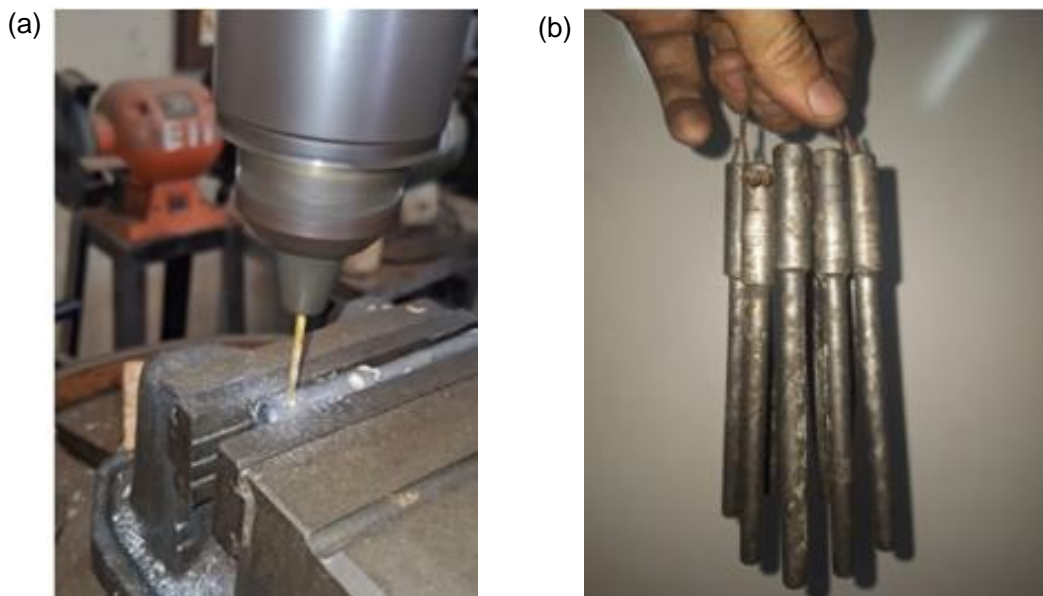


Fig. 2.10. Perforación de probetas: a) Taladrado; y b) grupo de 8 probetas sujetas con alambre de amarre previo al tratamiento térmico.

Posteriormente, se realizó el temple utilizando una cámara de acero inoxidable con atmósfera inerte de argón a 850 °C (ver Fig. 2.11), una vez alcanzada la temperatura se colocaron las probetas en el interior de la cámara, se sujetaron con alambre de amarre de 0.75 mm de diámetro y se colocó una manta térmica de fibra de cerámica para sellar el horno y se mantuvieron durante 40 min dentro de la cámara y se monitoreo de tal manera que la temperatura se mantuviera constante como se presenta en la Fig. 2.12.

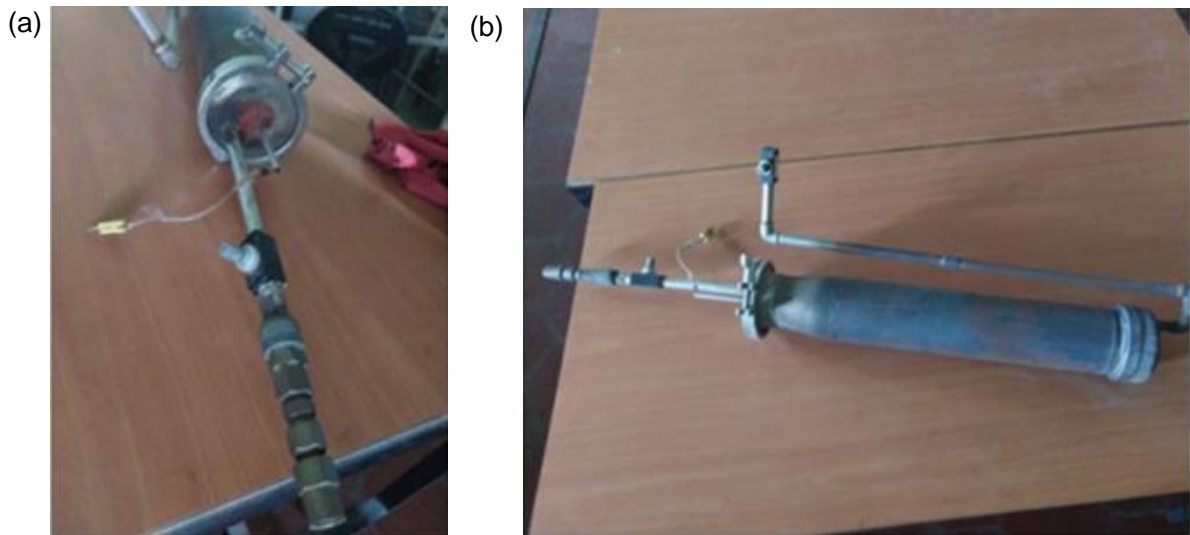


Fig. 2.11. Cámara de acero inoxidable con gas inerte de argón utilizado para realizar los tratamientos térmicos: a) vista de perfil; y b) vista superior.

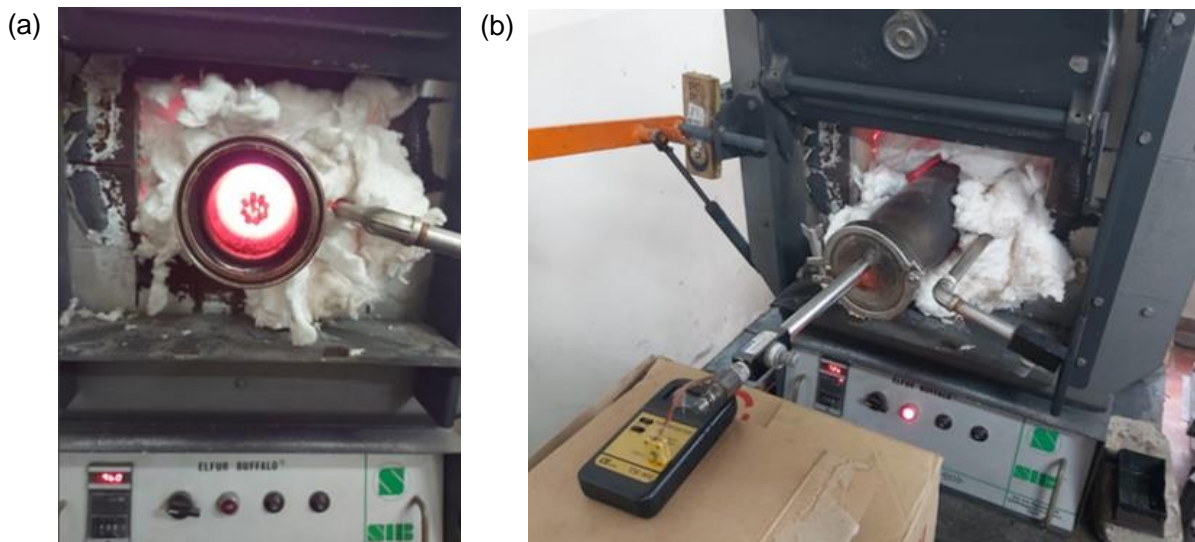


Fig. 2.12. Inserción del primer grupo de probetas: a) Cámara de acero inoxidable para el temple; y b) monitoreo de temperatura durante el proceso mediante termómetro digital.

Finalmente, se sacaron e inmediatamente se templaron en aceite en un lapso de 4 a 6 s (ver Fig. 2.13). El enfriamiento debe ser brusco, sumergiendo las probetas directamente en el medio de enfriamiento como agua o aceite. Esto se hace inmediatamente después de sacarlas del horno para obtener una microestructura martensítica, que es la que proporciona mayor dureza. En este trabajo de aplicación se utilizó aceite, ya que este proporciona un enfriamiento más lento que el agua, lo cual es útil para evitar la distorsión o el agrietamiento, no obstante, sigue siendo rápido en términos de tiempo.



Fig. 2.13. Instantes antes de sumergir las probetas por completo en aceite.

Luego se continuo con un revenido a 200 °C durante 20 min para reducir la fragilidad generada por el temple (ver Fig. 2.14), aliviar los esfuerzos internos, y mejorar la ductilidad y tenacidad de probetas. Además, este proceso ajusta la dureza final, permitiendo que el acero mantenga su resistencia sin que se vuelva quebradizo, lo que es esencial para mejorar su comportamiento frente a la fatiga.



Fig. 2.14. Tratamiento térmico de revenido en probetas a 200 °C.

Finalmente, las probetas se lijaron hasta obtener un acabado tipo espejo con lija fina de 1,500 para eliminar irregularidades superficiales, como marcas o microfisuras, que podrían actuar como concentración de esfuerzos y causar fallos prematuros (ver Fig. 2.15). Este proceso asegura una superficie uniforme, mejorando la distribución homogénea de los esfuerzos durante la prueba y reduciendo el riesgo

de fallos superficiales. Además, facilita el análisis post-ensayo al permitir una mejor observación de las zonas de fractura.



Fig. 2.15. Probetas lijadas hasta 1,500 con acabado tipo espejo sumergidas en aceite.

2.7. DISEÑO DE ENSAYO DE FATIGA POR FLEXIÓN ROTATIVA

En este apartado, se describen las etapas del diseño del ensayo de fatiga por flexión rotativa. Cada una de estas fases se implementó para asegurar que los resultados reflejen fielmente el comportamiento del material ante cargas cíclicas. Al abordar el proceso con un enfoque sistemático, se busca no sólo obtener datos precisos, sino también establecer una base sólida para interpretar los resultados y su relevancia en aplicaciones prácticas.

2.7.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El ensayo de fatiga se realizó sobre la base del manual de la máquina para ensayos de fatiga por flexión rotativa y una investigación realizada previamente [18]. Los ensayos de fatiga se realizaron en una máquina para ensayos de fatiga por flexión rotativa marca GUNT modelo WP 140, de frecuencia de 60 Hz (3,250 rpm), la cual se encuentra ubicada en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica (ver Fig. 2.16).



Fig. 2.16. Máquina para ensayos de fatiga por flexión rotativa marca GUNT modelo WP 140 [33].

2.7.2. FUNCIONAMIENTO Y USO DE LA MÁQUINA

La fuerza necesaria se aplica mediante el dispositivo de carga o balanza de resorte con un apoyo libre. Con ayuda de un husillo roscado, se ajusta la amplitud de carga. Un contador tipo display registrará el número de ciclos de carga y lo indicará digitalmente. Un sensor de proximidad en el acoplador del motor se encargará de suministrar los impulsos para el contador. El contador también se puede utilizar para medir el número de revoluciones. Para realizar los ensayos de fatiga se siguió el siguiente procedimiento (ver Fig. 2.17):

- Abatir hacia arriba la cofia protectora (1).
- Descargar el dispositivo de carga por medio del volante de mano (2) de forma tal que el rodamiento de apoyo libre (3) se debe encontrar a la altura del husillo (4).
- Desenroscar levemente la tuerca de la pinza porta probeta (5).
- La probeta (6) se debe insertar en el rodamiento de apoyo libre del dispositivo de carga.
- A continuación, se inserta la probeta en la pinza porta probeta y se introduce hasta el tope.
- Apretar cuidadosamente la tuerca de la pinza porta probeta con una llave de boca SW30 (7), y una SW21 (8) opuesta al husillo.
- Comprobar el giro circular de la probeta.
- Abatir hacia abajo la cofia protectora.

- Soltar el interruptor de paro de emergencia (9).
- Poner a funcionar la máquina por medio del interruptor de inicio y paro (10).
- Ajustar rápidamente la carga deseada girando el volante de mano y leer la carga en la escala de la balanza de muelle (11).
- Reiniciar el contador (12) en la caja de distribución (13) con el pulsador RST para comenzar con la cuenta de los ciclos.

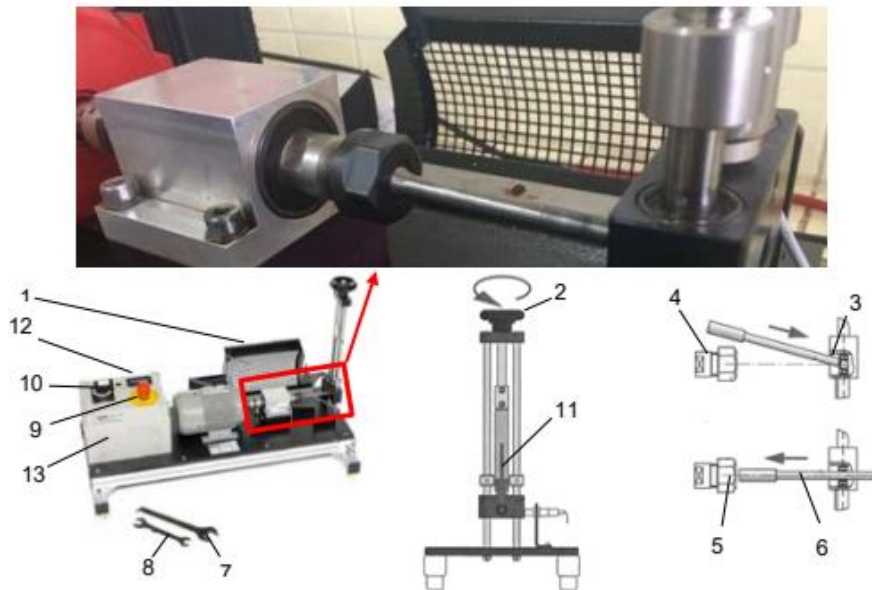


Fig. 2.17. Montaje para el ensayo [33].

2.7.3. PARAMETROS DEL ENSAYO

En esta máquina de fatiga por flexión rotativa se somete a la probeta a un movimiento giratorio, la cual es soportada por uno de sus extremos y en el otro extremo se aplica una carga constante. Así, de esta manera, en la superficie del material de la probeta cilíndrica, se produce un esfuerzo de flexión alternante de forma sinusoidal que es más alto en el cambio de sección de la probeta. Por lo cual, después de una determinada cantidad de ciclos de carga, la probeta se rompe a consecuencia del proceso de fatiga del material. Con una máquina de fatiga por flexión rotativa se puede determinar el comportamiento a la fatiga por cargas alternantes, tal como se presenta en la Ec. 2.1.

$$S_a = \frac{M_b}{I} \quad (2.1)$$

donde: S_a es la carga alternante en MPa,
 M_b es el momento de flexión en N·mm, y
 I es el Momento de inercia en mm⁴.

El esfuerzo producido en la superficie de la probeta corresponderá al de una barra de flexión que soporta una fuerza F . De esta manera, sobre el material actuará un momento de flexión M_b de forma triangular. El momento de flexión (M_b) se calculará a partir de la fuerza de carga (F) y del brazo de palanca a), Ec. 2.2.

$$M_a = F \cdot a \quad (2.2)$$

donde: F es la fuerza aplicada en N, y
 a es el brazo de palanca en mm.

Si se introduce el momento de Inercia del material de la probeta cilíndrica Ec. 2.3.

$$I = \frac{(\pi d^3)}{32} \quad (2.3)$$

donde: I es la inercia en mm³, y
 d es el diámetro de la sección de ensayo en mm.

Sustituyendo en la Ec. 2.1 las Ecs. 2.2 y 2.3 con sus respectivos valores $a = 100.5$ mm y $d = 8$ mm, se obtiene la Ec. 2.4 la cual corresponde a la amplitud de esfuerzo alternante (S_a).

$$S_a = \frac{2}{mm^2} F \quad (2.4)$$

Ahora bien, para identificar la carga máxima que se aplicó se despejo la Ec. 2.4 para F , conociendo el límite elástico del material.

$$F = \frac{S_a \left(\frac{\pi d^3}{32} \right)}{a}$$
$$F = \frac{(340 \text{ MPa}) \left(\frac{\pi (8 \text{ mm})^3}{32} \right)}{(100.5)} = 170 \text{ N}$$

A partir del esfuerzo de 340 MPa, se someten las probetas a ensayos de fatiga para determinar el número de ciclos hasta la falla, verificando mantener una relación de $S_a = 2F/mm$ para que las cargas cíclicas sean lo suficientemente altas para alcanzar el límite de fatiga, donde los materiales pueden sufrir micro daños acumulativos, no obstante, al mismo tiempo evita que los esfuerzos sean tan grandes como para provocar fallos en pocos ciclos o fuera del rango esperado. Con base en los resultados obtenidos, se evalúa si los niveles de esfuerzo se deben establecer por encima de ese valor o por debajo, ajustando la diferencia de esfuerzo en intervalos de 40 MPa. Este enfoque permite identificar con precisión el comportamiento del material frente a diferentes cargas cíclicas y establecer los límites óptimos de esfuerzo para los ensayos de daño acumulado por fatiga.

Para obtener la ecuación de resistencia a la fatiga tanto de las probetas de metal base como para las probetas cementadas se ensayaron 6 probetas distribuidas en tres niveles de esfuerzo. Posteriormente con los resultados de las 6 probetas ensayadas hasta la fractura, se realizó una regresión lineal considerando todas las probetas ensayadas, con el fin de obtener las correspondientes ecuaciones de resistencia a la fatiga con su coeficiente de correlación (R^2), tal como lo recomienda en la norma ASTM designación E-739 [34].

Además, la utilización y distribución de las 6 probetas que se ensayó para determinar la ecuación de resistencia a la fatiga fueron obtenidas de las recomendaciones de la misma norma ASTM designación E-739 en la cual se establece que cuando se obtiene una reproducibilidad entre 33 y 50, y se han ensayado entre 6 a 12 probetas, las ecuaciones obtenidas son confiables. Así, en la Ec. 2.5 se presenta el % de reproducibilidad:

$$\% \text{ de reproducibilidad} = \left(1 - \frac{\# \text{ de niveles}}{\# \text{ de probetas ensayadas}}\right) * 100\% \quad (2.5)$$

2.8. DISEÑO DE ENSAYO DE DAÑO ACUMULADO POR FATIGA

Luego de evaluada la resistencia a la fatiga del material, se diseñaron los ensayos de daño acumulado por fatiga en cuatro grupos de probetas. Se realizaron 2 grupos de dos bloques de manera ascendente y 2 grupos de dos bloques de manera decreciente, utilizando cuatro probetas para cada grupo de ensayo.

Primero dos bloques de esfuerzos alternantes ascendentes el primero a bajo esfuerzo durante 25% y el segundo durante 50% de la vida encontrada respectivamente, luego se aplicó el otro bloque a alto esfuerzo hasta que fallaron las probetas.

Posteriormente dos bloques de esfuerzos alternantes descendentes el primero a alto esfuerzo durante 25% y el segundo durante 50% de la vida encontrada respectivamente, luego se aplicó el otro bloque a bajo esfuerzo hasta que fallaron las probetas.

2.9. ESTUDIO FRACTOGRÁFICO

Después de llevar a cabo los ensayos de fatiga, se continuo con un estudio fractográfico a bajos aumentos en algunas de probetas que fallaron por fatiga. El objetivo de este análisis es describir las características de la fractura de manera detallada. Para realizar este procedimiento, se utilizó una lupa estereoscópica de la marca AmScope, la cual está conectada a una computadora. En dicha computadora, se registraron y almacenaron las fotografías obtenidas durante el estudio. Estas imágenes permitirán una mejor comprensión de los patrones y características de las fracturas (ver Fig. 2.18).



Fig. 2.18. Lupa estereoscópica utilizada para realizar el estudio fractográfico.

2.10. ANÁLISIS METALGRÁFICO

A continuación, se detalla el proceso de preparación de las muestras de acero cementadas para el análisis metalográfico. La preparación de las muestras incluyó el corte, embutido, desbastado, lijado, pulido y ataque químico, con el fin de optimizar la observación de las microestructuras de las mismas. Una vez listas, las muestras fueron analizadas mediante un microscopio óptico, lo que permitió identificar y estudiar las diferentes fases y características microestructurales, esenciales para la evaluación de los efectos del tratamiento termoquímico sobre el material.

2.10.1. PREPARACION DE PROBETAS

La preparación de las muestras para el análisis metalográfico es un proceso esencial en la investigación, y en este caso, se ha diseñado tomando como base una investigación previa [32]. Este proceso implica una serie de pasos que garantizan la calidad y la representatividad de probetas sometidas al análisis metalográfico. Los pasos que involucra este proceso son los siguientes:

➤ Selección de muestras

Se seleccionaron 3 probetas, una de cada nivel en disposición diagonal para asegurar una mayor representación de las variaciones en la microestructura a lo largo de toda la caja. Esta selección permitió evaluar de manera efectiva la influencia de las condiciones de cementación en las propiedades del material, garantizando resultados más representativos y evitando sesgos en el análisis.

➤ Marcado de muestras

Las muestras se marcaron utilizando punzones con una numeración relativa a su posición en la caja, identificando así la ubicación de las muestras dentro de la caja durante la cementarlas [32].

➤ Corte de muestras

Las muestras se cortaron en una máquina cortadora de disco abrasivo marca PRESI modelo MECATOME B (ver Fig. 2.19), el espesor de corte fue de ~5 mm. El total de muestras cortadas de cada probeta fue dos. El corte en la máquina tiene que ser muy lento, acompañado simultáneamente de abundante refrigerante (taladrina), esto con el fin de no calentar la probeta y prevenir la alteración de la microestructura del acero cementado lo cual lleva a resultados erróneos [32].

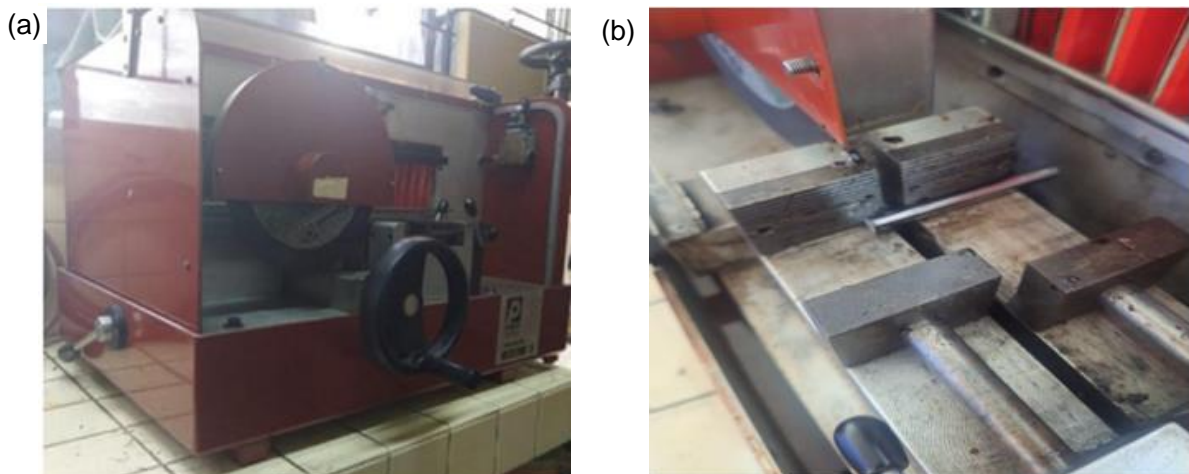


Fig. 2.19. Corte de la muestra con disco abrasivo: a) Máquina cortadora; y b) posición de la probeta previo al corte.

➤ Embutido

Después de cortar las muestras se procedió a la etapa de embutido. Para este propósito se utilizó resina poliéster transparente para facilitar su identificación, manipulación y preparación [32]. Este paso es necesario porque las muestras

suelen ser pequeñas o tener formas irregulares, lo que dificulta su sujeción durante las siguientes etapas de preparación, como el pulido o el ataque químico.

En esta etapa la resina poliéster se encuentra en estado líquido y se le agrego un catalizador para acelerar el endurecimiento (ver Fig. 2.20), la mezcla resina-catalizador fue vertida en un molde cilíndrico que contiene en el fondo las muestras que se embutirán. El tiempo de solidificación fue de ~12 h, lo cual depende de la cantidad de catalizador utilizado [32].



Fig. 2.20. Muestras embutidas.

➤ Lijado

El pulido mecánico se llevó a cabo mediante un proceso de abrasión controlada sobre la superficie de muestras, utilizando partículas más duras y de tamaños progresivamente menores. Este proceso comprendió dos etapas:

- ✓ Lijado grueso: Después del embutido de las muestras, se procedió con el desbaste mecánico empleando una serie de lijas de carburo de silicio bajo un flujo constante de agua. Las lijas utilizadas para esta fase fueron de los números 100, 200, 220, 320, 400, 500 y 600 [32].
- ✓ Lijado fino: Una vez finalizado el desbastado, se llevó a cabo el pulido grueso utilizando lijas de carburo de silicio de los números 1,200 y 1,500 en secuencia [32].

Ambas operaciones se realizaron en una mesa de lijado rotativa de alta velocidad, donde se aplicó abundante agua para evacuar las partículas de metal y residuos de lija generados durante el proceso, con el fin de prevenir que estos

restos dañaran la superficie ya pulida [17]. La mesa de lijado empleada en estas etapas se presenta en la Fig. 2.21.



Fig. 2.21. Mesa lijadora de muestras metalográficas.

➤ Pulido tipo espejo

Para lograr un acabado tipo espejo en la superficie de las muestras, se utilizó alúmina (Al_2O_3) con un tamaño de partícula entre 1 y $0.5 \mu\text{m}$, aplicada sobre un paño afelpado [32]. Este pulido final se llevó a cabo en una máquina pulidora marca MECAPOL modelo 2B, como se presenta en la Fig. 2.22. Después de un tiempo aproximado de 1 horas de pulido continuo, se alcanzó el deseado acabado tipo espejo [17].

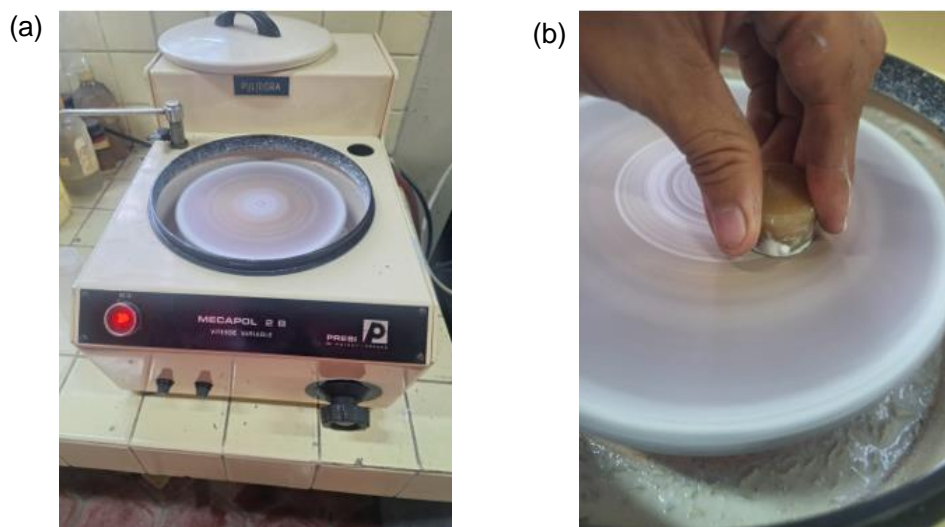


Fig. 2.22. Máquina pulidora utilizada para el tratamiento de muestras metalográficas: a) Perspectiva frontal; y b) proceso de pulido en curso utilizando alúmina como abrasivo.

➤ Ataque químico

Después de dar un pulido de espejo a las muestras fue necesario un ataque químico con el propósito de revelar la microestructura presente después del tratamiento termoquímico del acero.

Se realizó un ataque químico con el propósito de revelar la microestructura presente en el acero después del tratamiento termoquímico. Para este proceso, se utilizó Nital al 2% de concentración, un reactivo compuesto de ácido nítrico (2%) diluido en alcohol (98%) [17]. Después de completar este procedimiento, las muestras quedaron listas para su análisis metalográfico, el cual se llevó a cabo utilizando un microscopio óptico marca Leitz modelo Metallovert con cámara digital incorporada marca AmScope modelo MU800 (ver Fig. 2.23).

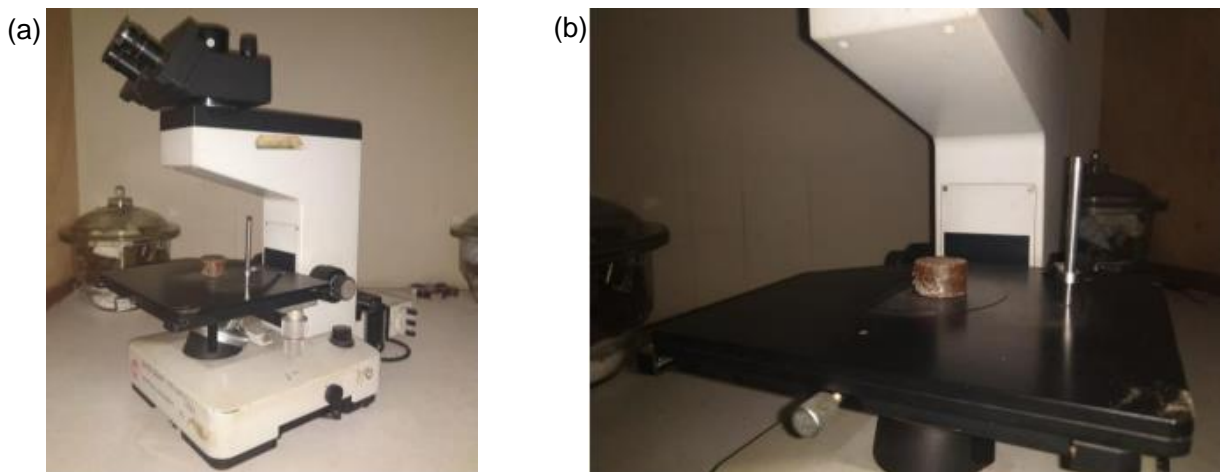


Fig. 2.23. Microscopio para análisis metalográfico: a) Vista completa del microscopio, mostrando su estructura y componentes principales; y b) muestra preparada para el análisis bajo el microscopio.

2.11. MEDICION DE LA CAPA CEMENTADA

Para la medición del espesor de la capa cementada en las muestras de acero SAE 1020, se seleccionaron 3 probetas de cada muestra del ensayo metalográfico y se siguió el mismo procedimiento de preparación, el cual incluyó las etapas de corte, marcado, embutido, lijado y pulido de las muestras. Las muestras fueron cortadas a un tamaño de aproximadamente de 10 mm de largo desde la parte del diámetro de 12mm, garantizando una adecuada manipulación durante el embutido y posterior análisis. Una vez cortadas, las muestras fueron embutidas en resina poliéster, lo que

facilitó el proceso de manejo y permitió asegurar que las muestras mantuvieran una estructura estable durante las etapas de preparación y análisis.

A continuación, se procedió al lijado y pulido de las muestras, utilizando la mesa lijadora rotativa de alta velocidad hasta lija 1,500 y pulido en la máquina pulidora con alúmina hasta obtener un acabado tipo espejo, siguiendo el mismo proceso empleado para los ensayos metalográficos. Este acabado fue crucial para garantizar una superficie perfectamente plana y libre de rugosidades, lo que facilitó la observación precisa de la capa cementada bajo el microscopio óptico.

La diferencia clave en este procedimiento, en comparación con las muestras utilizadas en el ensayo metalográfico, radicó en el tratamiento térmico aplicado antes de la medición del espesor de la capa cementada. Mientras que en un proceso estándar de templado y revenido se busca optimizar las propiedades mecánicas del acero para aplicaciones estructurales, en este caso las muestras fueron recocidas a 850 °C para asegurar una estructura uniforme y libre de esfuerzos internos. La razón de elegir el recocido en lugar del templado y revenido fue asegurar que las muestras presentaran claramente las fases de perlita y ferrita para una interpretación del contenido de carbono en función del espesor, lo que resulta fundamental para poder visualizar y medir correctamente la capa cementada.

Una vez recocidas y preparadas, las muestras se sometieron a un ataque químico con Nital al 2% para revelar la capa cementada, lo que permitió su observación bajo el microscopio óptico y facilitó la medición del espesor de la capa cementada, utilizando el software AmScope para obtener datos cuantitativos.

2.12. DETERMINACIÓN DE MICRO DUREZA

Para determinar la dureza de la capa cementada identificada en las muestras de acero SAE 1020, se utilizó una máquina de ensayo de microdureza marca Innova test, modelo VERZUS 750CCD (ver Fig. 2.24). Este equipo tiene diversos indentadores para realizar ensayos en diversas escalas, incluyendo Knoop con dos cargas de ensayo de 1 y 2 kg_f. La elección de la escala Knoop con una carga de 1 kg_f se realizó para obtener mediciones precisas de microdureza en una zona delgada y detallada de la capa cementada. Este método es ideal para evaluar la dureza en áreas pequeñas y se usó esta carga para evitar posibles deformaciones en las mediciones.



Fig. 2.24. Máquina de ensayo de microdureza Innova-test, modelo VERZUS 750CCD: a) Vista lateral, donde se aprecian el diseño y los componentes principales; y b) vista de perfil, mostrando la interfaz y la zona de ensayo.

Para marcar y analizar la dureza de la capa cementada en la muestra, se utilizaron tres puntos de referencia dibujados con un marcador, ubicados a 1, 2 y 3 mm respecto al borde de la muestra hacia el centro. La muestra se posicionó cuidadosamente sobre el yunque de la máquina y con ayuda de un perno de posicionamiento, se desplazó la muestra manualmente para realizar las indentaciones de manera precisa, asegurando que todas las marcas se alinearan en la misma línea hacia el centro de la probeta. Las mediciones de dureza se realizaron siguiendo un patrón bien definido para capturar de manera efectiva la progresión de dureza desde la superficie cementada hacia el núcleo del material.

3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se exponen de manera detallada los resultados obtenidos después de la implementación de las técnicas experimentales descritas en el capítulo 2. Cada sección incluye un análisis de los datos recopilados, organizados en tablas y representaciones gráficas que facilitan la interpretación de los resultados. Además, se presenta un análisis de cada técnica experimental, lo que permite evaluar su eficacia y consistencia en la determinación del daño acumulado por fatiga, así como su contribución al entendimiento integral del fenómeno. La discusión abarca tanto los aspectos generales como específicos de los resultados obtenidos en el análisis fractográfico y metalográfico y de determinación dureza destacando las implicaciones de cada técnica en el comportamiento del material.

Por último, se incluyen imágenes representativas de las muestras sometidas a ensayos de daño por fatiga, que proporcionan una visión más clara del daño y de las características microestructurales que afectan su respuesta bajo diferentes condiciones de cargas. Estas imágenes y su análisis contribuyen a una mejor comprensión del comportamiento a la fatiga, enriqueciendo las conclusiones sobre la relación entre los métodos de ensayo y los resultados observados.

3.1. ENSAYOS DE FATIGA

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a fatiga para el acero SAE 1020 en muestras sin y con cementación ensayadas a fatiga en un sólo bloque o nivel de esfuerzo alternante el cual corresponde a la condición de ensayo G1 y G2, asimismo se presentan los resultados de los ensayos de daño acumulado por fatiga correspondiente a los grupos G3 y G4 para ensayos ascendentes y G5 y G6 para ensayos descendentes. Además, se presentan dichos resultados en forma gráfica con su correspondiente ecuación de resistencia a la fatiga. Cabe destacar que el comportamiento a la fatiga al aire se expresa mediante la ecuación de resistencia a la fatiga; así, para determinar la resistencia a la fatiga o ecuación de Basquin (1910) se utilizaron 6 probetas lo cual, aunque limitado, es funcional dado el enfoque exploratorio y los recursos disponibles para el ensayo siguiendo la norma ASTM designación E-739 [34].

3.1.1. DETERMINACION DE RESISTENCIA A LA FATIGA EN PROBETAS SIN CEMENTAR

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de fatiga realizados sobre el acero SAE 1020, utilizando 8 probetas de metal base. Estas probetas fueron sometidas a ensayos con el objetivo de comparar su comportamiento frente a las probetas cementadas, con el fin de analizar las diferencias en los niveles de esfuerzo entre las condiciones de ambos materiales. Además, los resultados se presentan en forma gráfica acompañados de sus respectivas ecuaciones, tal como se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultado de los ensayos de fatiga a probetas de metal base para determinar la resistencia a la fatiga de un acero SAE 1020.

Probeta #	S, MPa	N_f , Ciclos a la fractura
1	300	41833
2		29145
3	260	67457
4		87717
5	180	391203
6		136149

En la Fig. 3.1 se presenta la gráfica de resistencia a la fatiga de las probetas de metal base, en la cual los valores de número de ciclos y esfuerzo fueron transformados a escala logarítmica para facilitar la representación de los puntos.

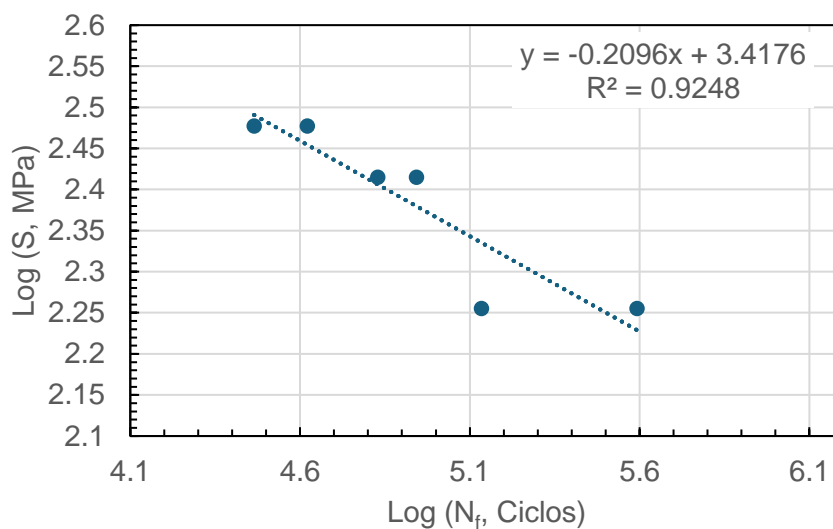


Fig. 3.1. Resultados de los ensayos de fatiga en probetas sin cementar.

Con una ecuación para la resistencia a la fatiga para metal base, se tiene lo siguiente:

$$\text{Log}(S) = -0.2096\text{Log}(N_f) + 3.4176$$

3.1.2. DETERMINACION DE RESISTENCIA A LA FATIGA EN PROBETAS CEMENTADAS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de fatiga realizados sobre el acero SAE 1020 cementado, utilizando un bloque de 6 probetas. Estas probetas fueron sometidas a ensayos con el objetivo de determinar su resistencia a la fatiga, lo cual permitió establecer los bloques de esfuerzo que se utilizaron para los ensayos de daño acumulado por fatiga. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.2 y en la Fig. 3.2 e presenta la curva de resistencia a la fatiga de dichos resultados.

Tabla. 3.2. Resultado de los ensayos de fatiga a probetas cementadas para determinar la resistencia a la fatiga de un acero SAE 1020.

Probeta #	S, MPa	N_f , Ciclos a la fractura
1	340	88538
2		49456
3	300	180455
4		243725
5	260	488679
6		1103179

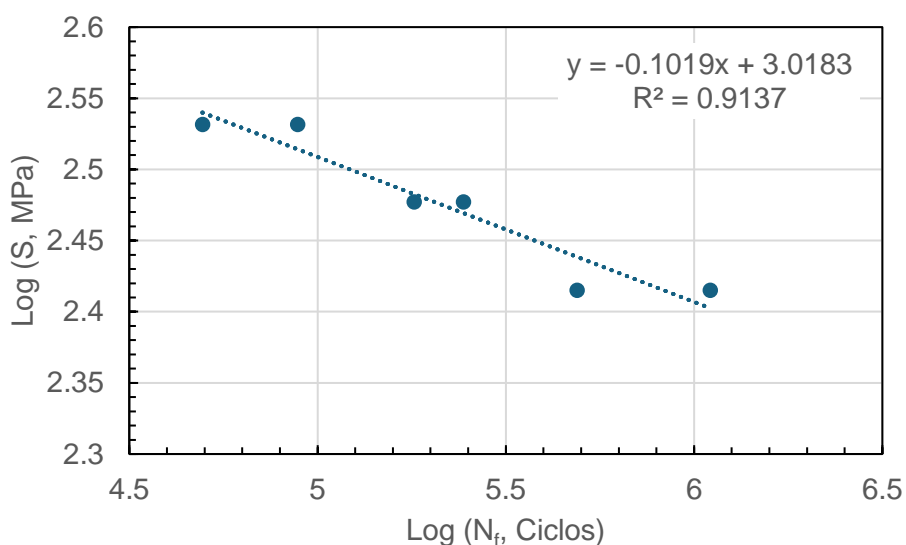


Fig. 3.2. Gráfica de los resultados de los ensayos de fatiga en probetas cementadas

Con respecto a la reproducibilidad de los resultados obtenidos aplicando un sólo bloque de esfuerzo alternante, es práctica habitual realizar un análisis estadístico de dicha reproducibilidad de las ecuaciones de Basquin, tal como lo recomienda la norma de la ASTM designación E-739. Así, esta reproducibilidad se calcula mediante la Ec. (2.5):

$$\% \text{ de reproducibilidad} = \left(1 - \frac{3}{6}\right) * 100\% = 50\%$$

En tal sentido, dado que todas las ecuaciones de resistencia a la fatiga se obtuvieron a partir de 6 probetas y distribuidas en 3 niveles de esfuerzo, se determinó que estas ecuaciones tienen una reproducibilidad de 50%, con lo cual de dicha norma de la ASTM designación E-739 se obtienen que son confiables [34].

3.1.3. ENSAYOS DE DAÑO ACUMULADO POR FATIGA

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de daño acumulado por fatiga realizados sobre acero SAE 1020 cementado con carbón vegetal de bálsamo. En la Tabla 3.3 se presentan los resultados de los ensayos aplicando la Ley de Palmgren-Miner con dos bloques de esfuerzos alternantes ascendentes. El primer bloque se aplicó a bajo esfuerzo durante el 25% de la vida útil determinada para el ensayo con un solo bloque, seguido del segundo bloque a alto esfuerzo hasta la falla de las probetas, correspondiente a G3.

Tabla 3.3. Resultados de ensayos de fatiga aplicando dos bloques de esfuerzos alternantes ascendentes el primero a bajo esfuerzo (260 MPa) durante 25% de la vida y luego ensayada a alto esfuerzo (340 MPa) hasta la fractura.

Probeta #	S ₁ , MPa	n ₁ , ciclos	S ₂ , MPa	n ₂ , ciclos	$\sum \frac{n_i}{N_{fi}}$	$\overline{\sum \frac{n_i}{N_{fi}}}$
1	260	208311	340	51680	1.11	1.09
2		208311		46128	1.02	
3		208311		54537	1.16	
4		208311		49056	1.07	

De igual manera, en la Tabla 3.4 se presentan los ensayos correspondientes a la misma ley, con un primer bloque a bajo esfuerzo durante el 50% de la vida útil del

ensayo de un solo bloque, seguido del segundo bloque a alto esfuerzo hasta la falla de las probetas, correspondiente a G4.

Tabla 3.4. Resultados de ensayos de fatiga aplicando dos bloques de esfuerzos alternantes ascendentes el primero a bajo esfuerzo (260 MPa) durante 50% de la vida y luego ensayada a alto esfuerzo (340 MPa) hasta la fractura.

Probeta #	S ₁ , MPa	n ₁ , ciclos	S ₂ , MPa	n ₂ , ciclos	$\sum \frac{n_i}{N_{fi}}$	$\overline{\sum \frac{n_i}{N_{fi}}}$
1	260	416622	340	33652	1.06	1.02
2		416622		35946	1.10	
3		416622		30507	1.01	
4		416622		25621	0.93	

A continuación, en la Tabla 3.5 se presentan los resultados de los ensayos realizados aplicando la Ley de Palmgren-Miner, utilizando dos bloques de esfuerzos alternantes descendentes. El primer bloque se aplicó a alto esfuerzo durante el 25% de la vida útil determinada para el ensayo con un solo bloque, seguido del segundo bloque a bajo esfuerzo hasta la falla de las probetas, correspondiente a G5.

Tabla 3.5. Resultados de ensayos de fatiga aplicando dos bloques de esfuerzos alternantes descendentes el primero a alto esfuerzo (340 MPa) durante 25% de la vida y luego ensayada a bajo esfuerzo (260 MPa) hasta la fractura.

Probeta #	S ₁ , MPa	n ₁ , ciclos	S ₂ , MPa	n ₂ , ciclos	$\sum \frac{n_i}{N_{fi}}$	$\overline{\sum \frac{n_i}{N_{fi}}}$
1	340	14975	260	407490	0.74	0.81
2		14975		446675	0.79	
3		14975		535934	0.89	
4		14975		482947	0.83	

De manera similar, en la Tabla 3.6 se presenta los ensayos correspondientes a la misma ley, aunque con un primer bloque a alto esfuerzo durante el 50% de la vida útil del ensayo de un solo bloque, seguido del segundo bloque a bajo esfuerzo hasta la falla de las probetas, correspondiente a G6.

Tabla 3.6. Resultados de ensayos de fatiga aplicando dos bloques de esfuerzos alternantes descendentes el primero a alto esfuerzo (340 MPa) durante 50% de la vida y luego ensayada a bajo esfuerzo (260 MPa) hasta la fractura.

Probeta #	S ₁ , MPa	n ₁ , ciclos	S ₂ , MPa	n ₂ , ciclos	$\sum \frac{n_i}{N_{fi}}$	$\overline{\sum \frac{n_i}{N_{fi}}}$
1	340	29950	260	235115	0.78	0.72
2		29950		186086	0.72	
3		29950		169928	0.70	
4		29950		128670	0.65	

3.2. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO

En esta sección se presentan las fotografías obtenidas del análisis fractográfico realizado sobre cada probeta sometida a los ensayos de fatiga. A través de la observación de las fracturas, es posible analizar las diferencias entre los materiales base y cementados, así como las influencias de los ciclos de carga alternante en el tipo de daño. Así, las Figs. 3.3 y 3.4 corresponden a probetas ensayadas a un sólo bloque de esfuerzo alternante para los niveles de esfuerzo más alto y bajo, respectivamente en probetas de metal base correspondientes al grupo 1 (G1).

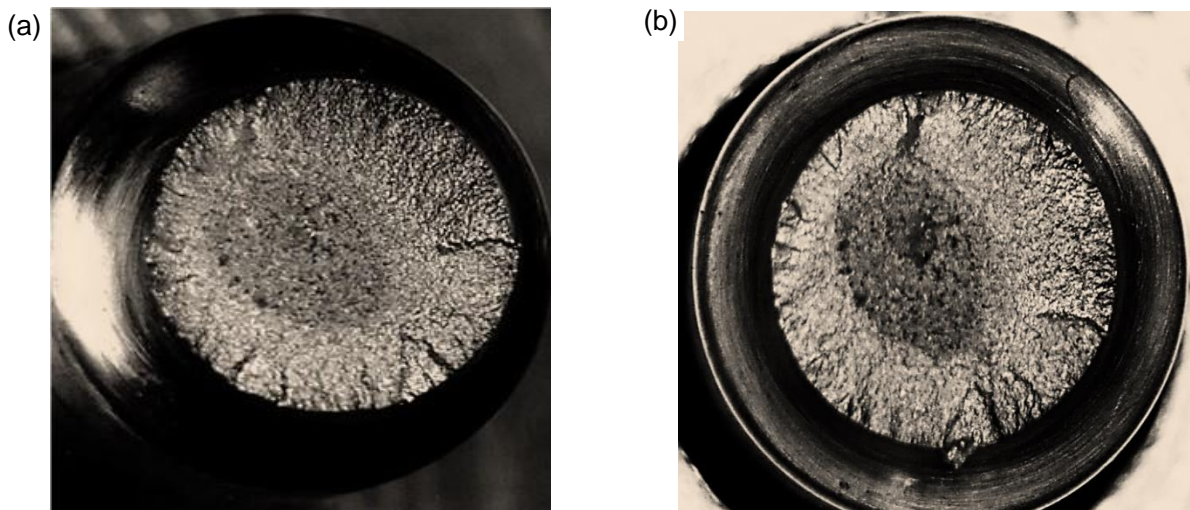


Fig. 3.3. Macrografías de una probeta de acero SAE 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa a alto esfuerzo (340 MPa): a) Vista de planta; y b) probeta inclinada.

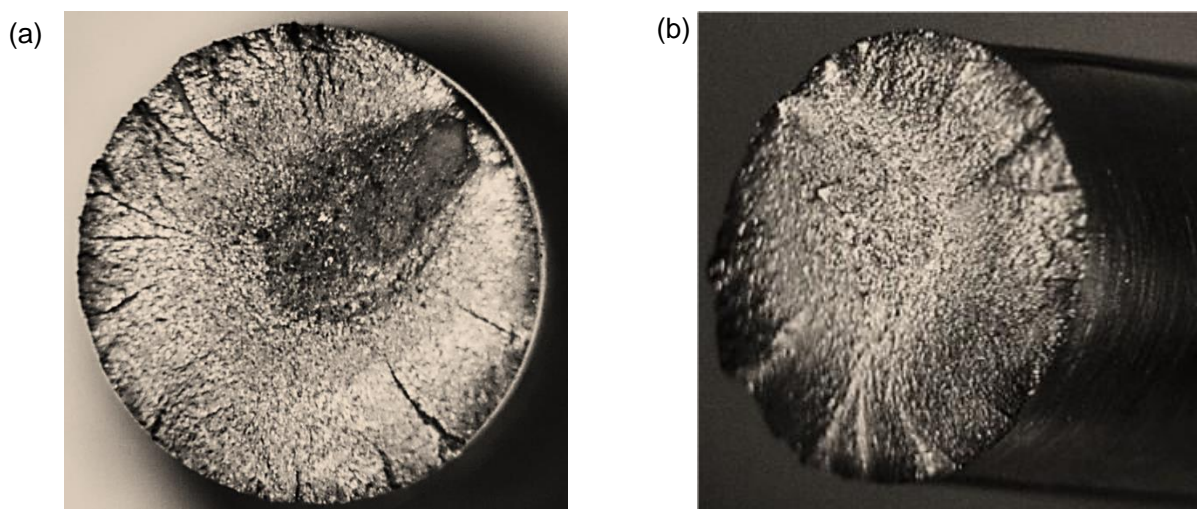


Fig. 3.4. Macrografías de una probeta de acero SAE 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa a bajo esfuerzo (260 MPa): a) Vista de planta; y b) probeta inclinada.

Las Figs. 3.5 y 3.6 corresponden a probetas ensayadas utilizando un sólo bloque de esfuerzo alternante para los niveles de esfuerzo más alto y bajo, respectivamente en probetas cementadas la cual representa a las probetas que fallaron del grupo 2 (G2).

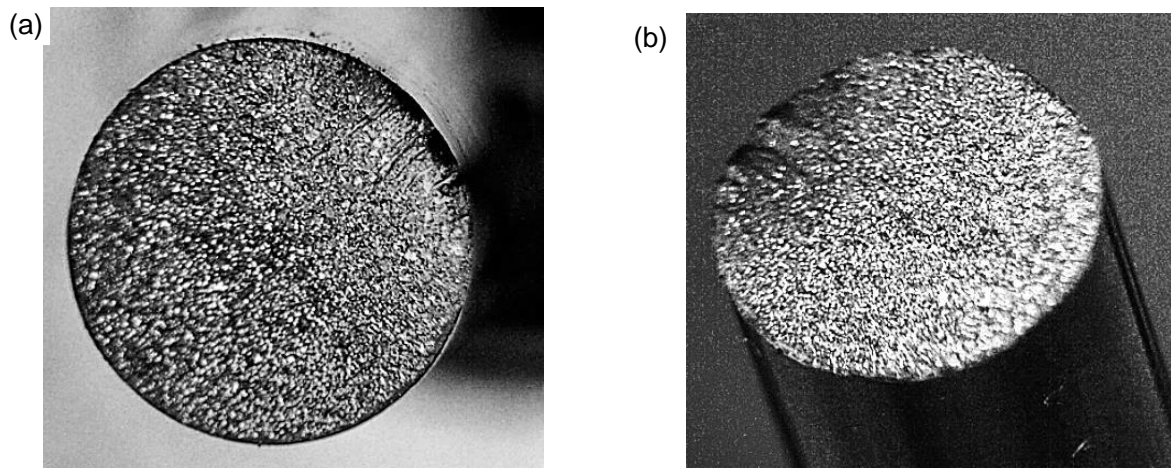


Fig. 3.5. Macrografías de una probeta de acero SAE 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa a alto esfuerzo (340 MPa): a) Vista de planta; y b) probeta inclinada $\approx 45^\circ$.

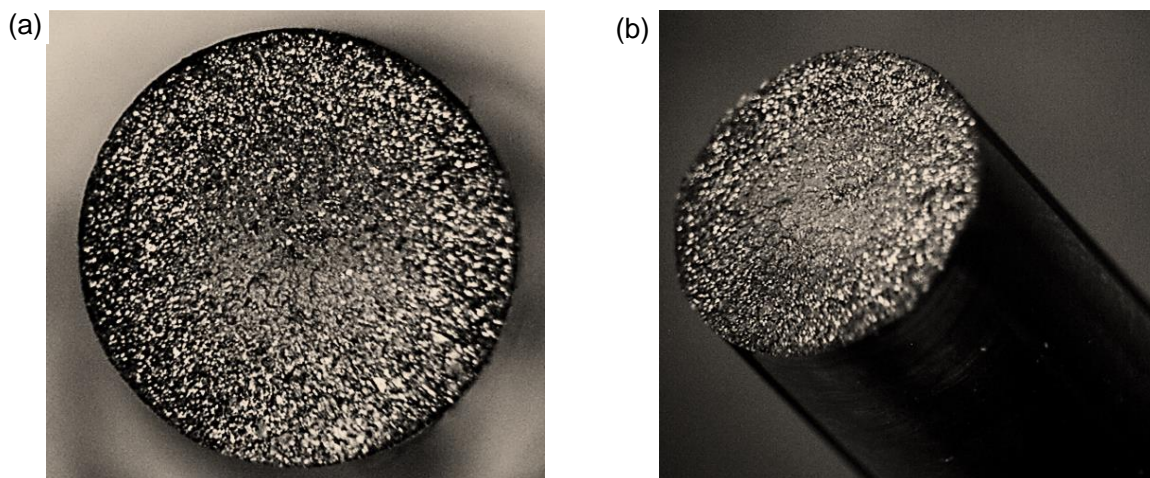


Fig. 3.6. Macrografías de una probeta de acero SAE 1020 ensayadas a fatiga por flexión rotativa a bajo esfuerzo (260 MPa): a) Vista de planta; y b) probeta inclinada $\approx 45^\circ$.

Posteriormente, en la Fig. 3.7 se presenta la superficie de fractura de una probeta ensayada en la región de vida finita aplicando dos bloques de esfuerzos alternantes ascendentes el primero a bajo esfuerzo (260 MPa) durante 25% de la vida encontrada para la condición de ensayo de un sólo bloque y luego se aplicó el otro bloque a alto esfuerzo (340 MPa) hasta que la probeta falló, lo cual corresponde al grupo 3 (G3). En el mismo sentido, en la Fig. 3.8 se presenta la superficie de fractura

de una probeta ensayada en la región de vida finita aplicando dos bloques de esfuerzos alternantes ascendentes el primero a bajo esfuerzo (260 MPa) durante 50% de la vida encontrada para la condición de ensayo de un solo bloque y luego se aplicó el otro bloque a alto esfuerzo (340 MPa) hasta que la probeta falló, lo cual corresponde al grupo 4 (G4).

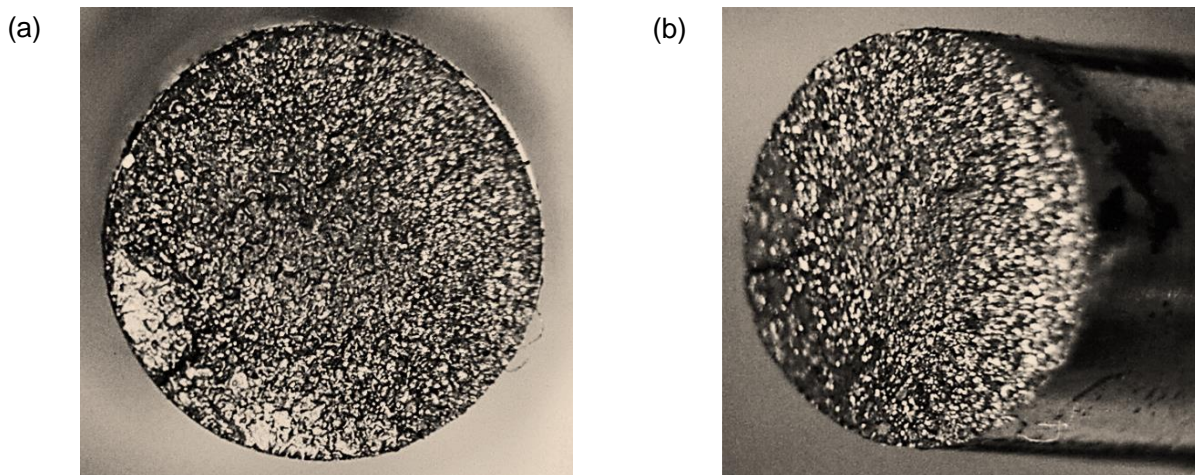


Fig. 3.7. Macrografías de probeta de acero SAE 1020 sometida a dos bloques de esfuerzos alternantes ascendentes; el primero a bajo esfuerzo durante 25% de la vida encontrada y luego se aplicó el otro bloque a alto esfuerzo hasta que falló la probeta: a) Vista de planta; y b) probeta inclinada $\approx 45^\circ$.

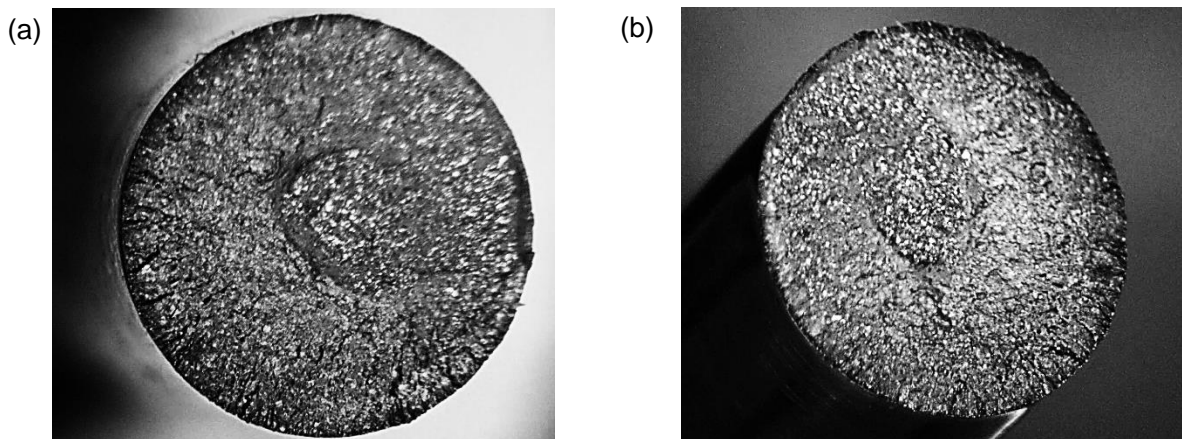


Fig. 3.8. Macrografías de probeta de acero SAE 1020 sometida a dos bloques de esfuerzos alternantes ascendentes; el primero a bajo esfuerzo durante 50% de la vida encontrada y luego se aplicó el otro bloque a alto esfuerzo hasta que falló la probeta: a) Vista de planta; y b) probeta inclinada $\approx 45^\circ$.

En la Fig. 3.9 se presenta la superficie de fractura de una probeta ensayada en la región de vida finita aplicando dos bloques de esfuerzos alternantes descendentes el primero a alto esfuerzo (340 MPa) durante 25% de la vida encontrada para la condición de ensayo de un sólo bloque y luego se aplicó el otro bloque a bajo esfuerzo

(260 MPa) hasta que la probeta falló, lo cual corresponde al grupo 5 (G5). En el mismo sentido, en la Fig. 3.10. se presenta la superficie de fractura de una probeta ensayada en la región de vida finita aplicando dos bloques de esfuerzos alternantes descendentes el primero a alto esfuerzo (340 MPa) durante 50% de la vida encontrada para la condición de ensayo de un solo bloque y luego se aplicó el otro bloque a bajo esfuerzo (260 MPa) hasta que la probeta falló, lo cual corresponde al grupo 6 (G6).

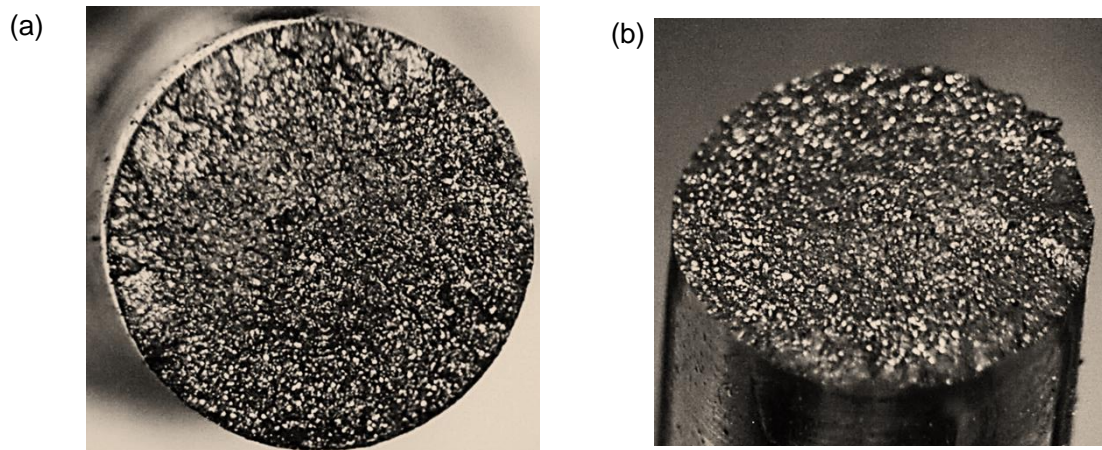


Fig. 3.9. Macrografías de probeta de acero SAE 1020 sometida a dos bloques de esfuerzos alternantes descendentes; el primero a alto esfuerzo durante 25% de la vida encontrada y luego se aplicó el otro bloque a bajo esfuerzo hasta que falló la probeta: a) Vista de planta; y b) probeta inclinada $\approx 45^\circ$.

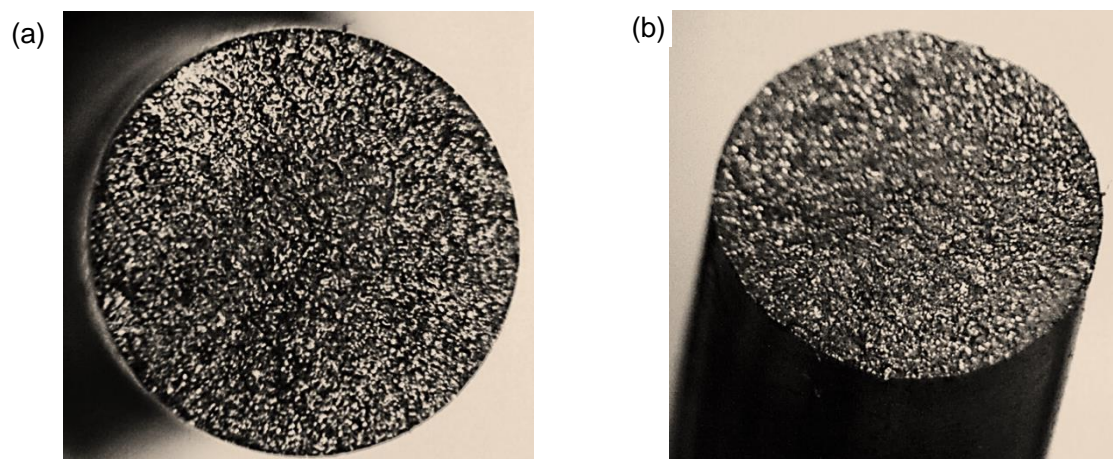


Fig. 3.10. Macrografías de probeta de acero SAE 1020 sometida a dos bloques de esfuerzos alternantes descendentes; el primero a alto esfuerzo durante 50% de la vida encontrada y luego se aplicó el otro bloque a bajo esfuerzo hasta que falló la probeta: a) Vista de planta; y b) probeta inclinada $\approx 45^\circ$.

Con respecto al análisis primeramente se realizan comentarios generales de las superficies de fractura, en la cual se destacan la cantidad de las grietas observadas en función del esfuerzo al cual se ensayaron las probetas. Luego se realizan

comentarios destacando algunos detalles particulares para las superficies de fractura para cada condición de ensayo.

En general para las probetas ensayadas hasta la fractura aplicando un único bloque de esfuerzo, se puede observar que las superficies de fractura para alto esfuerzo en probetas de metal base (ver Fig. 3.3) presenta múltiples zonas de inicios de la grieta de fatiga en la periferia de las probetas. Contrario a esto, se puede observar que las superficies de fractura para alto esfuerzo en probetas cementadas (ver Fig. 3.5) presenta un menor número de zonas de inicios de la grieta de fatiga en la periferia de las probetas, siendo casi nulas. Lo mismo sucede con las superficies de fractura para bajo esfuerzo en probetas de metal base en comparación con las cementadas (ver Figs. 3.4 y 3.6 respectivamente).

En los dos grupos G3 y G4 de probetas utilizadas para encontrar la resistencia a la fatiga aplicando dos bloques de esfuerzos alternantes, en donde el primero de los bloques se ensayó a bajo esfuerzo durante 25 y 50% (ver Fig. 3.7 y 3.8, respectivamente) de la vida a la fatiga, respectivamente; luego se aplicó el segundo bloque a alto esfuerzo hasta la fractura. Se observa que la superficie de fractura de las probetas de ambos grupos presenta principalmente sólo una zona de la grieta por fatiga, lo cual se debe a que durante el primer ciclado a bajo esfuerzo alternante se propiciaron sólo una zona de inicio de la grieta por fatiga, la cual al ser ensayada en el segundo bloque de esfuerzo alternante más alto continuó propagándose.

En los dos grupos G5 y G6 de probetas utilizadas para encontrar la resistencia a la fatiga aplicando dos bloques de esfuerzos alternantes, en donde el primero de los bloques se ensayó a alto esfuerzo durante 25 y 50% (ver Figs. 3.5 y 3.6, respectivamente) de la vida a la fatiga, respectivamente; luego el segundo bloque a bajo esfuerzo. Se observa que la superficie de fractura de ambos grupos presentan principalmente sólo un zona inicio de la grieta por fatiga la cual se extiende por una buena parte el perímetro de la probeta, lo cual se debe a que las probetas cicladas durante 50% de los ciclos en su primer bloque de alto esfuerzo alternante posibilitó mayor número de inicios de la grietas por fatiga en el mismo plano, luego cuando se sometió al segundo bloque de bajo esfuerzo alternante las grietas continuaron propagándose y propiciando que la zona de falla por sobrecarga quedara confinada en el centro de la superficie de fractura.

3.3. RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la prueba de dureza Knoop realizada en probetas de acero SAE 1020 cementadas. Para el ensayo, se utilizó un penetrador de diamante en forma piramidal alargada, que genera una hendidura estrecha y poco profunda. Las probetas, previamente embutidas y pulidas hasta alcanzar un acabado tipo espejo, fueron analizadas en un grupo de tres muestras.

El ensayo se llevó a cabo desde la superficie hacia el núcleo, realizando una serie de mediciones con una separación de 1 mm entre huellas en dirección vertical. Para asegurar la precisión, las probetas se desplazaron de manera constante en una sola dirección, de manera que la toma de las huellas distribuidas fuera en una misma dirección hasta alcanzar el centro de la muestra. En la Fig. 3.11 se detalla el patrón de las mediciones realizadas.

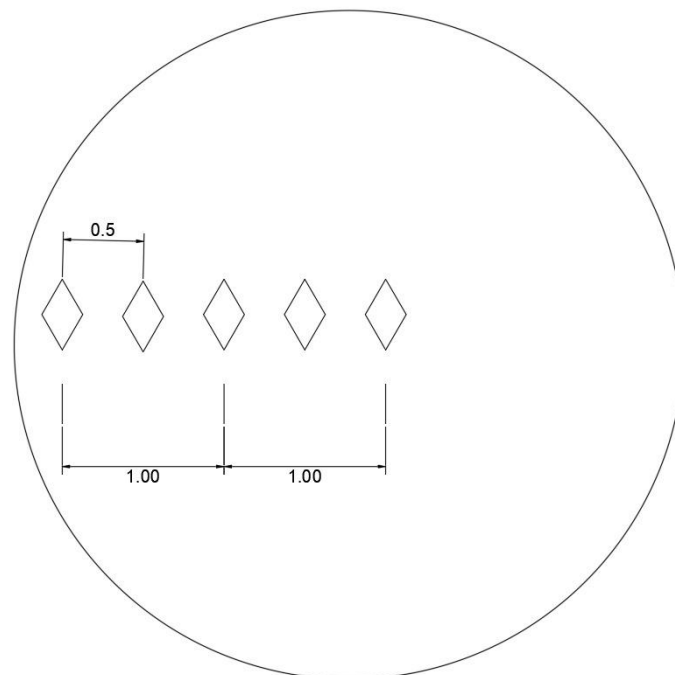


Fig. 3.11. Representación del recorrido de las huellas tomadas en ensayo de dureza Knoop en probeta cementada.

Los resultados de microdureza Knoop se presentan en la Tabla 3.7, los cuales se obtuvieron de la sección transversal de 3 muestras cementadas con PTT de temple y revenido de 8 mm de diámetro, las mediciones se realizaron a aproximadamente 1, 1.5, 2, 2.5 y 3 mm desde la superficie. Además, se presentan los valores promedio y

desviación estándar de microdureza para cada distancia desde la superficie. Así se obtuvo una disminución en los valores de microdureza desde la superficie hasta el núcleo de muestra, correspondientes al contenido de carbono en la sección transversal producto de la cementación y del PTT de temple y revenido realizado.

Tabla 3.7. Resultados de los ensayos de dureza Knoop para las muestras cementadas.

Distancia desde la superficie, mm	Valores de microdureza Knoop				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	DE
1.0	490	562	639	564	75
1.5	445	534	537	505	52
2.0	400	518	480	466	60
2.5	354	478	448	427	65
3.0	335	445	393	391	55

Como se anticipa teóricamente, los valores de dureza tienden a disminuir conforme se avanza hacia el núcleo debido a la menor concentración de carbono y al cambio en la microestructura. La Fig. 3.12 se presenta esta tendencia de manera gráfica, ilustrando la transición de dureza desde la superficie cementada hacia el interior de la probeta.

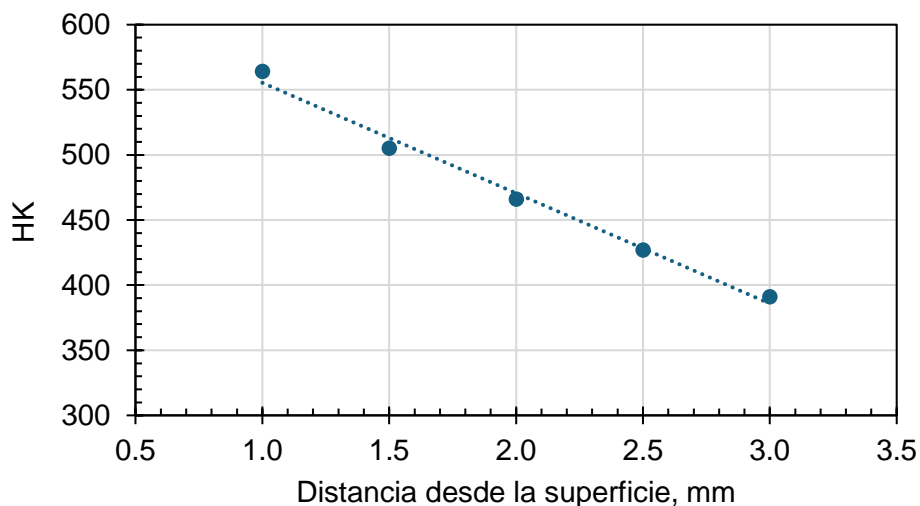


Fig. 3.12. Gráfica de los ensayos de dureza Knoop promediados, realizados a 3 probetas cementadas.

Para finalizar en la Fig. 3.13 se presentan las marcas de indentaciones obtenidas durante el ensayo Knoop para las tres muestras analizadas. En ella se puede observar claramente la primera marca situada en la capa más superficial de

cada muestra, mientras que la última marca se encuentra aproximadamente en el núcleo, lo que permite visualizar la distribución de la dureza a lo largo del material.

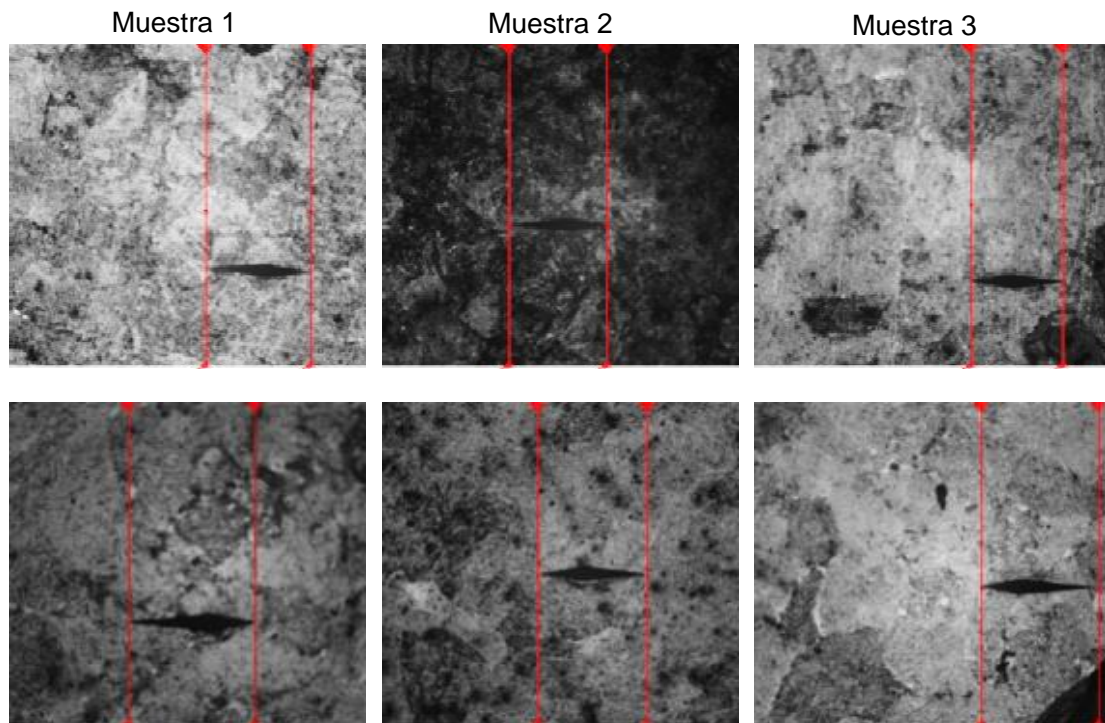


Fig. 3.13. Marcas de indentaciones del ensayo Knoop en tres muestras, donde la marca superior se encuentra en la capa superficial y la marca inferior cerca del núcleo, evidenciando la variación de dureza a través del material."

3.4. RESULTADOS DE ENSAYO METALGRÁFICO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del ensayo metalográfico realizado a las probetas de acero SAE 1020 después del proceso de cementación. Este análisis permitió caracterizar detalladamente la microestructura de la capa cementada y el núcleo, evaluando aspectos críticos como el espesor de la capa, la distribución del carbono y las fases presentes en el material.

3.4.1. ESPESOR DE LA CAPA CEMENTADA

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del análisis del espesor de la capa cementada en las probetas de acero SAE 1020. Para asegurar un examen detallado y preciso de la microestructura de la capa cementada, se optó por tomar

micrografías con un aumento de 100x, ya que este nivel de aumento permite una observación clara de la transición entre la capa cementada y el núcleo, así como una evaluación precisa de la distribución y homogeneidad de la zona tratada. En la Fig. 3.14 se presenta las áreas donde se tomaron las micrografías.

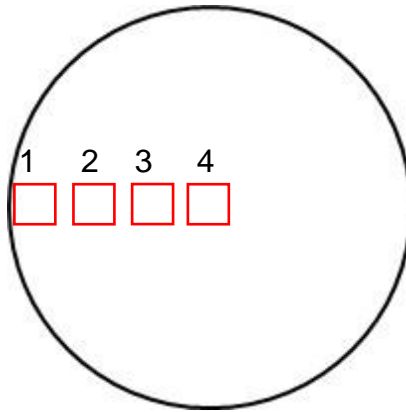


Fig. 3.14. Ubicación de las micrografías tomadas para las probetas sometidas a recocido a 100x.

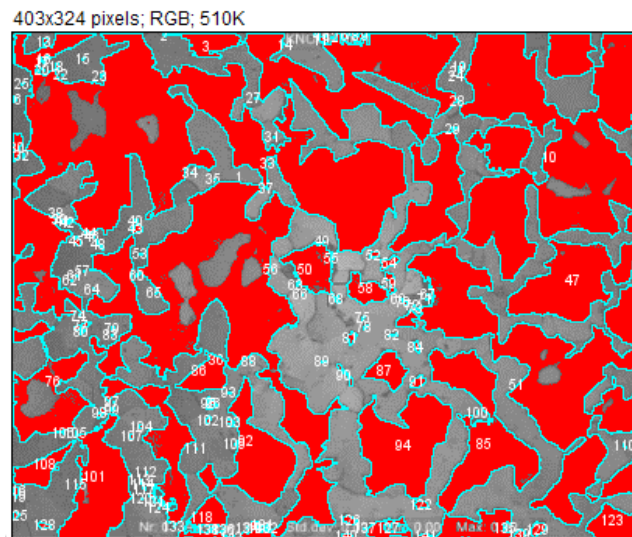
La medición del espesor de la capa cementada se realizó en paralelo al análisis metalográfico, con el propósito de evaluar tanto el espesor de la capa como su microestructura a lo largo del material. Para ello, se trabajó con dos tipos de muestras: unas sometidas a un tratamiento térmico de temple y revenido, y otras que fueron recocidas para eliminar los efectos de dicho tratamiento. Debido a las limitaciones en la resolución de los equipos, las muestras con temple y revenido no permitieron distinguir con claridad la transición entre la capa cementada y el núcleo del material. Sin embargo, las muestras recocidas facilitaron este análisis, permitiendo observar con mayor precisión la transición microestructural, estimar los porcentajes de perlita y ferrita, y definir con claridad la región correspondiente a la capa cementada.

Para identificar el espesor de la capa cementada, se consideró que la capa cementada finaliza con un contenido de carbono de 0.5% [35]. Este valor se establece como el punto de referencia inicial para identificar la región cementada, ya que a partir de este contenido de carbono las microestructuras presentes cambian significativamente. Con base en este criterio, se procede a realizar los cálculos necesarios para determinar las proporciones de las fases presentes, como la microestructura perlítica.

$$\%Perlita = \frac{0.5 - 0.025}{0.8 - 0.025} * 100\% = 61.29\%$$

Esto indica que el 61% de la microestructura es perlítica en el punto de referencia, lo que corresponde a la fracción de la muestra donde se ha alcanzado un contenido de carbono suficiente para formar perlita en equilibrio.

A partir de este valor se determinaron las proporciones de ferrita y perlita en esta zona utilizando un software especializado en ciencia de materiales llamado imageJ. Inicialmente, se partió de imágenes en escala de grises, lo que facilitó la identificación de las variaciones tonales entre las fases presentes. Posteriormente, se aplicó una binarización mediante un umbral con el fin de separar las regiones claras, correspondientes a la ferrita, de las oscuras, asociadas a la perlita. Finalmente, se empleó una función para "analizar partículas" para contar y medir las áreas de las diferentes fases, obteniendo una distribución de 58.66% de perlita y 31.34% de ferrita a una distancia aproximada de 2 mm como se observa en la Fig. 3.15, consistente con las características esperadas en materiales cementados, donde la perlita domina la microestructura debido al enfriamiento rápido y la alta concentración de carbono en la capa cementada.



Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area
MICROGRAFIA2.png	252	70056	278	58.662

Fig. 3.15. Análisis de microestructura en capa cementada en programa ImageJ

El espesor efectivo de la capa cementada sin tratamiento posterior de temple y revenido (PTT) en las probetas de acero SAE 1020 se presenta en la Fig. 3.16.

Además, en la imagen, se puede observar claramente la transición de materiales, comenzando en la superficie (lado izquierdo de la foto) con acero hipereutectoide, seguido de una zona de acero eutectoide, compuesta completamente por perlita, y luego una región de acero Hipoeutectoide que desemboca en el núcleo del acero SAE 1020.

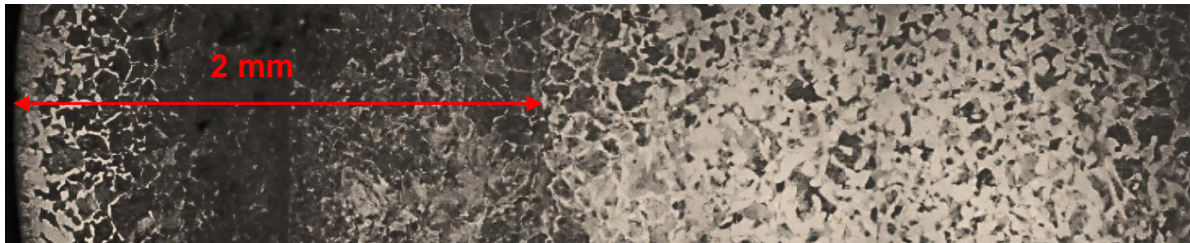


Fig. 3.16. Mosaico de fotos de la microestructura a un aumento de 100x de la capa cementada sin PTT.

El espesor de la capa cementada obtenido en este trabajo refleja una diferencia significativa en comparación con la investigación realizada por Artiga Domínguez *et. al.* [32], quien reportó un espesor de 0.98 mm bajo las mismas condiciones de cementación: 8 horas de duración, distancia entre probetas de 7.5 mm y una mezcla carburante 80:20 utilizando carbón vegetal de bálsamo para acero AISI 1020. Cabe mencionar que en el estudio de Artiga Domínguez *et. al.* [32] se utilizó una temperatura de cementación de 900 °C y la caja de cementación fue sellada con arcilla refractaria, mientras que en este caso se realizaron ajustes adicionales para garantizar una temperatura interna de 950 °C, lo que requirió aumentar la temperatura del horno a 1050 °C debido a los diferenciales registrados con una termocupla, además, se empleó arena de fundición, que permitió un sellado más eficiente al minimizar las fugas de carbono, como lo evidencia la menor transformación del carbón vegetal en ceniza al finalizar el tratamiento.

3.3.2. MICROESTRUCTURA RESULTANTE

Posteriormente, se capturaron micrografías con un aumento de 500x para un análisis comparativo del tamaño de grano en la capa cementada y en el núcleo del acero SAE 1020. Para obtener una observación precisa de la microestructura, facilitando la identificación de las fronteras de grano y la evaluación de su uniformidad, aspectos cruciales para determinar la calidad del proceso de cementación y su

impacto en las propiedades mecánicas del material. En la Fig. 3.17 se presenta las zonas donde aproximadamente se tomaron las micrografías, resaltando las zonas clave de la estructura para un análisis comparativo entre las regiones.

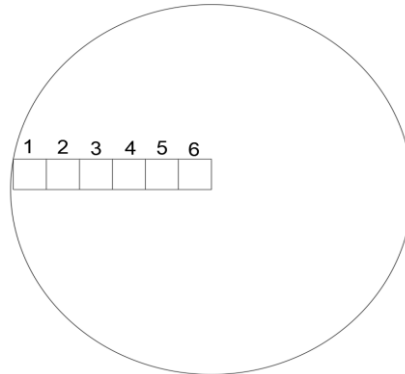


Fig. 3.17. Ubicación de las micrografías tomadas para las probetas sometidas a recocido con lente de 500x de aumento.

En la Fig. 3.18 se presentan las micrografías de los recubrimientos obtenidos para una de las muestras con el fin de visualizar mejor la microestructura obtenida.

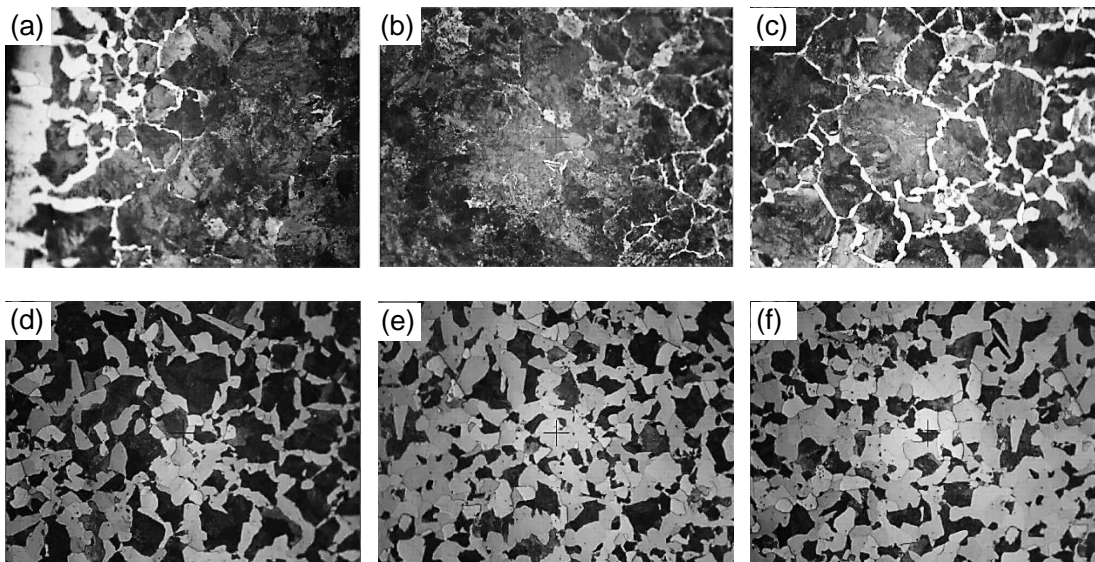


Fig. 3.18. Micrografía de tamaño de grano de primera muestra cementada en: a) Posición 1; b) posición 2, c) Posición 3; d) posición 4, e) Posición 5; y f) posición 6,

Las macrografías presentadas, tomadas desde el extremo de la muestra hasta el núcleo, permiten observar la evolución de la microestructura a través de la capa

cementada en el acero SAE 1020. A continuación, se describe la estructura identificada en cada imagen:

- En las micrografías. 3.18 (a-b) correspondiente a la región más superficial, se observa una estructura compuesta por una mezcla de ferrita y perlita fina. En la zona cercana a la superficie, se sigue observando una mezcla de ferrita y perlita, aunque con una menor cantidad de perlita que en la región más externa. Esto refleja una transición gradual en el contenido de carbono. La cementación inicial enriqueció esta zona con carbono, y el recocido posterior promovió la formación de una microestructura más homogénea, aliviando esfuerzos internos y reduciendo la dureza extrema que podría haber sido resultado de una martensita no revenida. La distribución de la perlita indica que el carbono se ha redistribuido uniformemente después del recocido.
- En las micrografías. 3.18 (c-d) se presenta la zona de transición entre la capa cementada y el núcleo del acero. A medida que se avanza hacia el interior, la microestructura presenta un aumento en la proporción de ferrita en relación con la perlita, reflejando una disminución gradual del contenido de carbono. Obteniendo en la posición (d) una microestructura compuesta predominantemente por ferrita con perlita dispersa.
- Finalmente, en las micrografías. 3.18 (e-f) cerca del núcleo, la microestructura consiste en una matriz ferrítica con una pequeña cantidad de perlita. El recocido permitió una distribución uniforme del carbono y la relajación de cualquier estrés residual, asegurando que la microestructura no tuviera zonas endurecidas ni frágiles. Y en el núcleo de la muestra, la microestructura es casi completamente ferrítica, con trazas de perlita fina. Esta estructura es típica del acero SAE 1020 en su estado de bajo contenido de carbono. La ferrita en esta región proporciona una alta ductilidad y una buena tenacidad, características importantes para el rendimiento del material en aplicaciones mecánicas.

CONCLUSIONES

- ✓ Los resultados obtenidos demuestran que las probetas cementadas ensayadas presentan un nivel de esfuerzo significativamente mayor en comparación con las probetas de metal base, las cuales alcanzaron una resistencia aproximadamente un 700% mayor.
- ✓ El daño por fatiga bajo dos bloques de esfuerzo ascendente mostró valores de Palmgren-Miner mayores que 1, lo que se atribuye al menor daño acumulado por fatiga en el primer bloque debido a los esfuerzos alternantes bajos. El análisis fractográfico confirmó esta tendencia, evidenciando múltiples nucleaciones de grietas por fatiga y una zona de despegue por sobrecarga confinada en el núcleo de la probeta, lo que sugiere una menor propagación inicial del daño hacia regiones externas.
- ✓ El daño por fatiga bajo la aplicación de dos bloques de esfuerzo descendente presenta que los valores obtenidos mediante la ley de Palmgren-Miner son menores que 1. Esto se atribuye al mayor daño acumulado por fatiga durante la aplicación de los esfuerzos alternantes elevados del primer bloque. En el mismo sentido, el análisis fractográfico revela múltiples sitios de nucleación de grietas por fatiga con una propagación predominante, lo cual se relaciona con una menor densidad de nucleación de grietas dependiente del número de ciclos aplicados en el primer bloque de carga.
- ✓ La diferencia en el espesor de la capa cementada obtenida en este trabajo con respecto a la investigación de Artiga Domínguez *et. al.* [32] evidencia la influencia de los parámetros de procesamiento en la eficiencia del tratamiento termoquímico. El incremento en la temperatura interna a 950 °C, logrado mediante una calibración precisa de la temperatura del horno a 1,050 °C, así como el uso de arena de fundición para un sellado más efectivo, optimizó la retención del carbono y redujo la conversión del carbón vegetal en ceniza.

- ✓ Las mediciones de microdureza reveló un descenso gradual en la dureza conforme se avanzaba desde la superficie hacia el núcleo, lo cual se atribuye a la disminución progresiva del contenido de carbono y a la transición microestructural característica de la zona cementada hacia el núcleo ferrítico-perlítico del acero base. Los resultados demuestran que la dureza promedio disminuye desde 564 HK a 1.0 mm, hasta 391 HK a 3.0 mm, lo cual confirma la presencia de una capa cementada superficial endurecida con un núcleo dúctil.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Budynas, R (2008). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V. Octava edición. México.
- [2] Buitrago Ortiz, C.B., y Arévalo Carvajal, C.A. (2021). Influencia del tratamiento de cementación, temple a temperaturas intercríticas, criogenización y revenido en la resistencia al impacto de un acero AISI 1020 [Universidad Distrital Francisco José de Caldas], Colombia.
- [3] Alemán Montaña, R.A. (2014). Evaluación del proceso de endurecimiento superficial de un acero SAE: 1020 mediante carburización sólida y posterior temple y revenido [Universidad Nacional de San Agustín], Perú.
- [4] Puértolas, J.A., Ríos, R., Castro, M., y Casals, J.M. (2010). Tecnología de superficies en materiales. Editorial Síntesis. Primera Edición. Madrid.
- [5] Czerwinski, F. (2012). Thermochemical Treatment of Metals. INTECH open science | open minds. Croacia.
- [6] Suchánek, J., y Kuklík, V. (2009). Influence of heat and thermochemical treatment on abrasion resistance of structural and tool steels. Editorial Elsevier. Republica Checa.
- [7] Apraiz, J. (1982). Aceros especiales y otras aleaciones. Editorial Dossat. Sexta Edición. Madrid.
- [8] Nikolov, K., Bunk, K., Jung, A., Kaestner, P., Brauer, G., y Klages, C.P. (2014). High-efficient surface modification of thin austenitic stainless-steel sheets applying short-time plasma nitriding by means of strip hollow cathode method for plasma thermochemical treatment. Editorial Elsevier. Alemania.
- [9] Matsuda, F., Nakata, K., y Makishi T. (1987). Rapid Plasma Nitriding Process by Means of Hollow Cathode Glow Discharge (Materials, Metallurgy & Weldability). Transactions of JWRI. Japón.
- [10] Lajtín, Yu., y Arzamásov, B. (1987). Tratamiento químico-térmico de los metales. Editorial Mir Moscú. Primera Edición. URSS.
- [11] Speich, G. R. (2014). ASM Handbook, Volume 4D: Heat Treating of Irons and Steels, ASM International. Estados Unidos.
- [12] Dehghan-Manshadi, M. (2013). Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels, ASM International. Estados Unidos.
- [13] Avner, S.H. (1988). Introducción a la Metalurgia Física. McGraw-Hill. Segunda Edición. México.

- [14] Temas para la educación (2011). Revista digital para profesionales de la enseñanza. Federación de Enseñanza de CC.OO. De Andalucía.
- [15] Edwan, A. (2015). (Título no especificado). Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 35(1), ISSN 0255-6952.
- [16] Miguel Ipohorski, R.J. Acuña. (2023). Fractografía: Aplicaciones al análisis de fallas. Comisión Nacional de Energía Atómica.
- [17] "Metal Failures: Mechanisms, Analisis, Prevention" Arthur J. McEvily - Jonhn Wiley & Son, Inc - 2002.
- [18] "The Practical Use of Fracture Mechanics" David Broek - Kluwer Academic Publishers - 1994.
- [19] TEMAS PARA LA EDUCACIÓN (2011). Revista digital para profesionales de la enseñanza. Federación de Enseñanza de CC.OO. De Andalucía.
- [20] Edwan, A. (2015). Título no especificado. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 35(1), ISSN 0255-6952.
- [21] Autor no especificado. (Fecha no especificada). Metalografía y Tratamientos Térmicos, Cementación.
- [22] Miguel Ipohorski, R.J. Acuña. (2023). FRACTOGRAFIA: Aplicaciones al Análisis de Fallas. Comisión Nacional de Energía Atómica.
- [23] Wilfredo Van de Velde. (2021). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Beneficiones economicos para fatiga.
- [24] DASSAULT S4STEMES. (2018). Teoria del daño acumulativo. Ayuda de SOLIDWORKS. (s.f.).
- [25] LinkedIn in (¿Cuáles son las ventajas y desventajas de utilizar la regla de Palmgren-Miner para el análisis de fatiga del acero?). (2023). 8 marzo.
- [26] Mikel, A., Santiago, N., Edurne, I., y Javier, C. (2027). Universidad del País Vasco. Daño Acumulativo.
- [27] Sergio, H., y Zoser Kalengayi. (2017). Universidad Carlos III de Madrid - Departamento de ingeniería mecánica. Estudio comparativo de las teorías de daño acumulado por fatiga y predicción de la vida útil de componentes mecánicos aplicado a un eje ferroviario.
- [28] Predictiva (2023, 2 Jul). Modos de falla: efecto y causas. Preditiva 21.
- [29] Javier. Sanz. (2023, 16 marzo). Fallos y Modos de fallo ¿En qué consisten? INFINITIA Industria Consulting.
- [30] Institute for Healthcare Improbement. Kit de Herramientas de QI Essentials: Análisis de Modos de Falas y Efectos (FMEA).

- [31] Asamblea Legislativa, S.V (2002). Ley Forestal. Decreto Legislativo N.º 852. Tomo 35. Diario Oficial, 110.
- [32] 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.
- [33] Ponce Reyes, F.J. (2021). *Estudio de daño acumulado por fatiga flexión rotativa en un acero AISI 1045, aplicando la teoría de Palmgren-Milner*. Universidad de El Salvador.
- [34] ASTM Designation. (1997). E-739, vol. 3(1), pp. 594-600.
- [35] Apraiz, J. (1984). *Aceros especiales y otras aleaciones* (6ª ed.). Madrid, España: Dossat, S.A.