



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

AVANCES EN EL DESARROLLO Y APLICACIONES
DE HIERROS NODULARES CADI (CARBIDIC
AUSTEMPERED DUCTILE IRON)

TESINA
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

PRESENTA

ITZEL DEL RUBÍ RAMÍREZ MARTÍNEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX. , 2023





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: García Hinojosa José Alejandro
VOCAL: Profesor: Sánchez Santiago Arturo Alejandro
SECRETARIO: Profesor: Ruiz Tamayo Agustín Gerardo
1er. SUPLENTE: Profesor: Aranda Villada Víctor Antonio
2° SUPLENTE: Profesor: Flores Rosas Clara Saraid

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

ASESOR DEL TEMA:

Dr. José Alejandro García Hinojosa

SUPERVISOR TÉCNICO (Si lo hay):

(nombre y firma)

SUSTENTANTE:

Itzel del Rubí Ramírez Martínez

Tabla de contenido

.....	1
Nomenclatura	6
Abreviaciones	6
Lista de símbolos	6
Capítulo 1: Planteamiento del problema	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 <i>Objetivo general</i>	12
1.1.2 <i>Objetivos particulares</i>	12
Capítulo 2: Planteamiento metodológico	13
Capítulo 3: Marco teórico	15
3.1 Introducción	15
3.2 Industria de la fundición en México	17
3.3 Hierros fundidos	20
3.3.1 <i>Clasificación de los hierros fundidos</i>	20
3.3.2 <i>Diagrama Fe – C – Si</i>	25
3.3.3 <i>Tratamientos térmicos de los hierros fundidos</i>	27
3.4 Hierro ADI (Austempered Ductile Iron)	32
3.4.1 <i>Propiedades mecánicas</i>	35
3.4.2 <i>Aplicaciones ADI</i>	39
3.5 Hierro CADI (Carbide Austempered Ductile Iron)	40
3.5.1 <i>Efecto elementos aleantes</i>	41
3.5.2 <i>Métodos de introducción de carburos</i>	44
3.5.3 <i>Aplicaciones CADI</i>	46
Capítulo 4: Resultados y discusión	50
4.1 Revisiones de la literatura	50
4.2 Obtención de CADI	95
4.3 Propiedades mecánicas	101
Capítulo 5: Conclusiones	105
Referencias	107
Bibliografía	111

Nomenclatura

Abreviaciones

ADI	Austempered ductile iron
CADI	Carbide austempered ductile iron
EDX	Energy dispersive X-ray
EPMA	Electron probe micro-analyzer
HB	Brinell hardness
HR	Rockwell hardness
HRB	Rockwell hardness B
HRC	Rockwell hardness C
HV ₂₀₀	Vickers microhardness
S&A	Super-high temperature pretreatment and austempering treatment
SEM	Scanning electron microscope
TEM	Transmission electron microscopy
WDS	Wavelength dispersive X-ray
XRD	X-ray diffraction

Lista de símbolos

A_I	Comienzo de la formación de austenita
B_s	Comienzo de la formación de bainita
C_{eq}	Carbono equivalente
E	Índice relativo de resistencia al desgaste
M_s	Comienzo de la formación de martensita
t_g	Tiempo de austenización
T_g	Temperatura de austenización
t_a	Tiempo de austemperizado
T_a	Temperatura de austemperizado
t_{rev}	Tiempo de revenido
T_{rev}	Temperatura de revenido

Tabla de Figuras

Figura 1. Clasificación mundial de la industria de la fundición en 2021. Fuente: adaptado de (14).....	18
Figura 2. Porcentaje de producción de fundición ferrosa y no ferrosa en México, 2017. Fuente: adaptado de (15).	19
Figura 3. Porcentaje de consumo de piezas fundidas producidas en México en los principales sectores clientes. Fuente: adaptado de (15).	20
Figura 4. Representación esquemática de la clasificación de los hierros fundidos. Fuente: adaptado de (17).....	24
Figura 5. Diagrama Fe - C, las líneas continuas describen el sistema metaestable Fe - Fe ₃ C y las líneas punteadas representan el sistema estable Fe - C. Fuente: (12).....	25
Figura 6. Rangos aproximados del contenido (%) de C y Si para algunos hierros colados y aceros. Fuente: (12).	26
Figura 7. Representación esquemática de los distintos ciclos de calentamiento y enfriamiento para fundiciones: alivio de tensiones, recocido y normalizado. Fuente: adaptado de (17). ...	28
Figura 8. Representación esquemática del ciclo del tratamiento térmico de austemperizado. Fuente: adaptado de (15; 17).....	33
Figura 9. Microestructuras de ADI que muestran la ausferrita: a) muestra austenizada a 925°C con temple isotérmico a 370°C durante 30 min; b) muestra austenizada a 925°C con un temple isotérmico a 310°C durante 30 min; c) muestra austenizada a 850°C con temple isotérmico a 370°C durante 30 min; atacadas con Nital, a 400X. d) muestra austenizada a 925°C con temple isotérmico a 310°C durante 1 h, a 100X. Fuente: (6; 8).	35
Figura 10. Valores mínimos de resistencia a la tensión en función de la elongación de ADI para los grados 1 a 4 (ASTM A897). Fuente: (15).	36
Figura 11. Resistencia a la tensión en función de la elongación de hierros con distintos tratamientos térmicos. Fuente: (15).	37
Figura 12. Resistencia al desgaste en función de la dureza HRC para distintos hierros y aceros. Fuente: (18).	38
Figura 13. Resistencia relativa a la abrasión en función de la dureza HV para el hierro ADI y aceros resistentes a la abrasión. Fuente: (9).....	38
Figura 14. Representación esquemática del proceso de fabricación de un hierro CADI. Fuente: imágenes adaptadas de (35).	41
Figura 15. Efectos de los principales elementos de aleación en la etapa de austemperizado. Fuente: (17).	42
Figura 16. Elementos aleantes: efecto blanqueador y grafitizante. Fuente: (22).....	43
Figura 17. Modelo de placa con un enfriador de cobre en un extremo que muestra el lugar donde se obtuvieron las muestras para distintos ensayos mecánicos. Fuente: (25).....	45
Figura 18. Materiales resistentes al desgaste utilizados en la industria. Fuente: (10; 18)....	47
Figura 19. Ejemplos de aplicaciones recientes de los hierros nodulares austemperizados con carburos, CADI.....	48
Figura 20. Contenido de carburos en función de la distancia al enfriador para muestras de colada (C1 y C2) y para CADI 1 y 2.	51
Figura 21. Valores de pérdida de volumen en función de la distancia al enfriador para CADI 1 y 2. (se utilizó ADI T _a = 320°C como material de referencia).....	52
Figura 22. Microestructuras de CADI 1 (T _a = 320°C) a diferentes distancias del enfriador (mm): (a) 0, (b) 10, (c) 20, (d) 40 y (e) 60.	53

Figura 23. Microestructuras de CADI 2 ($T_a = 320^\circ\text{C}$) a diferentes distancias del enfriador (mm): (a) 0, (b) 10, (c) 20, (d) 40 y (e) 60.	53
Figura 24. Representación esquemática de los tratamientos térmicos aplicados: (a) austemperizado ordinario, b) prueba de contraste y (c) tratamiento S&A. Nomenclatura: SQ: temple en sales, AQ: temple en aire, FC: enfriamiento en el horno, WQ: temple en agua.	55
Figura 25. Microestructura de distintos CADI: (a) microscopía óptica de CADI después del tratamiento ordinario de austemperización, (b) imagen SEM de CADI después del tratamiento ordinario de austemperización, (c) microscopía óptica de CADI después del tratamiento S&A, (d) imagen SEM de CADI después del tratamiento S&A, (e) imagen SEM a gran aumento de CADI después del tratamiento S&A, (f) imagen SEM a gran aumento de CADI después de la prueba de contraste. Todas las muestras fueron atacadas con Nital al 4%.....	56
Figura 26. Comparación de distintas propiedades mecánicas del tratamiento S&A con el austemperizado ordinario.....	57
Figura 27. Comparación de pérdida por desgaste a diferentes cargas del tratamiento S&A con el austemperizado ordinario.	57
Figura 28. Dureza HRC de CDI y CADI estáticos y dinámicos.	58
Figura 29. Resistencia al impacto de CADI a 275°C y 375°C de T_a	58
Figura 30. Tasa de desgaste del CADI a 275°C y 375°C de T_a	59
Figura 31. Microestructura de CADI austemperado a 275°C con 1.5 %Cr y 1 %Nb con solidificación dinámica.	59
Figura 32. CADI austemperado a: (a) 371°C (b) 260°C . Las muestras fueron atacadas con Nital al 8%.....	60
Figura 33. Resultados de la prueba de abrasión para ADI y ADI con carburos. Los niveles de carburo se indican junto a cada punto. Los puntos representan un promedio de 2 especímenes de prueba.	60
Figura 34. Resultados de la prueba de abrasión para CADI de alto y bajo contenido de carburo junto con los resultados de los hierros resistentes a la abrasión de alto cromo.	61
Figura 35. Resultados de la prueba de abrasión para varios hierros fundidos y aceros competitivos. El punto con flechas representa una prueba para un hierro con 27% de Cr.	61
Figura 36. Carburos identificados en los hierros nodulares bajo estudio (a) Ledeburíticos y (b) Continuos.	63
Figura 37. Microestructura del hierro nodular aleado con Cr. Las zonas blancas ilustran a los carburos aleados.	65
Figura 38. Microestructura del hierro nodular no aleado. Las zonas blancas ilustran a los carburos ledeburíticos.	66
Figura 39. Microestructuras de CADI con distintos contenidos de agua (%): (a) 0, (b) 1, (c) 2 y (d) 3. A 200X.	68
Figura 40. Microestructuras de la muestra A3-280 a: (a) 2 mm y (b) 100 mm del enfriador.	70
Figura 41. Microestructuras de la muestra A4-280 a: (a) 2 mm y (b) 100 mm del enfriador.	70
Figura 42. Microestructuras obtenidas: (a) ausferrítica CADI-280 y (b) ausferrítica CADI-360.	72
Figura 43. Valores de dureza HB a distintas distancias, contenido de carbono y nódulos de cada tratamiento térmico aplicado.....	72
Figura 44. Valores de resistencia al impacto a distintas distancias, contenido de carbono y nódulos de cada tratamiento térmico aplicado.....	72
Figura 45. Resistencia al desgaste de distintas distancias, contenido de carbono y nódulos de cada tratamiento térmico aplicado.....	73

Figura 46. Influencia de la etapa de austenización en la dureza: (a) Temperatura de austenización y (b) tiempo de austenización.	74
Figura 47. Influencia de la etapa de austenización en la resistencia al impacto: (a) Temperatura de austenización y (b) tiempo de austenización.	75
Figura 48. Influencia de la etapa de austenización en la pérdida por desgaste y en la resistencia a la abrasión: (a) Temperatura de austenización y (b) tiempo de austenización.	75
Figura 49. Microestructuras después del tratamiento térmico: (a) #1; (b) #2; (c) #3; (d) #4; (e) #5; (f) #6; (g) #7.	76
Figura 50. Microestructuras a diferentes temperaturas de austenización (tiempo de permanencia de 7200 s): a) 1073 K, b) 1173 K, c) 1223 K, and d) 1273 K.	78
Figura 51. Gráfico del ajuste lineal de $\ln(1-S/S_0)$ frente a $1/T$ (tiempo de permanencia de 7200 s).	78
Figura 52. Microestructuras a diferentes tiempos de austenización (temperatura de austenización 1123 K): a) 60 s, b) 1800 s, c) 3600 s, d) 7200 s, y e) 10 800 s.	79
Figura 53. Gráfico del ajuste lineal de S/S_0 versus \sqrt{t} (a 1123 K).	79
Figura 54. Pérdida de peso en función de diferentes tiempos de austemperizado. Para las muestras C 2 y 3 a distintas temperaturas de austemperizado.	81
Figura 55. Microestructura de la muestra C2-250°C-1 h, los carburos se presentan como las zonas en color blanco. Atacada con Nital al 2%, a 200X.	81
Figura 56. Microestructura de la muestra C3-250°C-1 h, los carburos se presentan como las zonas en color blanco. Atacada con Nital al 2%, a 200X.	81
Figura 57. Microestructura de la muestra C1 900°C-1h 400°C-2h. A 500X.	83
Figura 58. Micrografías TEM de campo brillante de CADI austemperizado a 250°C durante 120 min; (a) micrografías TEM de campo brillante y SADPs; (b) microestructura interna de ferrita acicular.	84
Figura 59. Microestructuras del CADI austemperizado a 250°C a diferentes tiempos: (a) micrografías ópticas (OM) para 5 min; (b) OM para 10 min; (c) OM para 30 min; (d) OM para 60 min; (e) OM para 120 min; (f) imagen SEM para 120 min.	85
Figura 60. Microestructuras del CADI austemplado a 300°C durante diferentes tiempos: (a) OM durante 5 min; (b) OM durante 10 min; (c) SEM durante 10 min; (d) OM durante 30 min; (e) OM durante 60 min y (f) OM durante 120 min.	86
Figura 61. Microestructura del centro de la bola de molienda CADI con varios contenidos de boro (% en peso), (grabado) (a) 0,03% B, (b) 0,05% B, (c) 0,08% B, y (d) 0,12% B.	88
Figura 62. Microdureza del centro de la bola de molienda CADI para diferentes contenidos de Boro.	88
Figura 63. Relación de la resistencia al impacto y el contenido de carburos de Boro para diferentes contenidos de Boro.	88
Figura 64. Microestructura de la muestra austemperizada a 275°C a 180 min.	90
Figura 65. Microestructura de la muestra austemperizada a 300°C a 60 min.	91
Figura 66. Microestructura de la muestra austemperizada a 400°C.	91
Figura 67. Comparación de las propiedades de Resistencia al impacto y dureza para las muestras tratadas isotérmicamente a 400 y 300°C.	92
Figura 68. Microestructura de la matriz con carburos, obscurecida con una solución con HNO_3 , mostrando la distribución de carburos (a) zona intermedia de la pieza y (b) zona izquierda.	94

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Rangos de composición química, aplicaciones típicas y microestructura de hierros fundidos. Fuente (5; 14; 15).</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2. Principales tratamientos térmicos aplicados a los hierros nodulares. Fuente: (17). .</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3. Propiedades mecánicas de un hierro ADI tratado a diferentes temperaturas de austemperizado. Fuente: (15).</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 4. Propiedades mecánicas para los grados de hierro ADI grados especificados en ASTM A 897 y A 897M (métrica). Fuente: (15).</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 5. Aplicaciones de ADI en la industria automotriz. Fuente: (18; 19; 20; 38).</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 6. Factor de segregación de algunos elementos en los hierros colados. Fuente: adaptado de (18; 21).</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 7. Métodos de introducción de carburos. Fuente: (24).</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 8. Ventajas y desventajas del uso de hierros CADI. Fuente: (18).</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 9. Valores obtenidos de nodularidad y carburos en la caracterización microestructural para los dos hierros nodulares experimentales.</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 10. Valores obtenidos de nodularidad y carburos en la caracterización microestructural.</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 11. Carburos disueltos (CD%) en un hierro nodular no aleado.</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 12. Carburos disueltos (CD%) en un hierro nodular aleado con Cr.</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 13. Resistencia al impacto y dureza en función del contenido de agua para las muestras de CADI.</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 14. Valores obtenidos de los ensayos de resistencia al desgaste e impacto para las muestras de CADI.</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 15. Temperatura y tiempo del proceso de austenización.</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 16. Fracción de volumen de carburos en la microestructura de CADI.</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 17. Valores obtenidos del ensayo de desgaste para CADI bajo distintas condiciones de austemperizado.</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 18. Parámetros de temperatura (T_a) y tiempo (t_a) de austemperizado experimentales.</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 19. Condiciones experimentales del tratamiento de austenización para cada muestra (T_γ = temperatura de austenización).</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 20. Valores obtenidos de nodularidad y carburos en la evaluación microestructural. ...</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 21. Condiciones del tratamiento térmico para la producción de CADI.</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 22. Comparación de las propiedades mecánicas para las distintas condiciones reportadas por los autores en los artículos consultados.</i>	<i>101</i>

Capítulo 1: Planteamiento del problema

Los hierros dúctiles poseen una amplia gama de aplicaciones en la industria debido a sus propiedades mecánicas, en especial el hierro nodular austemperizado denominado ADI, que ha demostrado un incremento en sus usos debido a su resistencia a la tracción y al impacto (en particular el grado 5), lo cual le ha permitido reemplazar a los aceros forjados en muchas aplicaciones (1).

En los últimos años se ha desarrollado una variante de ADI, denominada CADI, que consiste en carburos en una matriz de ausferrítica y presencia de grafito esferoidal. Los hierros nodulares austemperizados con carburos (CADI), exhiben mejor resistencia al desgaste que los hierros nodulares austemperizados (ADI) y una mayor resistencia al impacto que los hierros blancos, a un menor precio y una mayor facilidad de producción. Los CADI pueden tener muchas aplicaciones debido a su buena combinación de propiedades mecánicas (1).

Conocer los avances en la producción, aplicación e innovación de esta familia de hierros CADI es de gran relevancia ya que sus aplicaciones como dientes de excavadora, bolas de molinos de bolas, revestimientos molinos, palas de arado, trituradores y algunas partes de automóviles (2), acelerarán su aplicación en la industria, llenando el espacio entre los ADI y los hierros blancos.

El hierro ADI utilizado ampliamente en motores, minería, ferrocarriles, maquinaria agrícola y otros campos debido a sus buenas propiedades de resistencia al impacto, corrosión y fatiga, carece de elevada resistencia al desgaste (2), característica que compensa significativamente los hierros CADI.

La literatura en general muestra ejemplos de aplicación y datos sobre la respuesta al desgaste, pero el procedimiento para producir hierros CADI en sus dos etapas aún es algo limitado (3).

La investigación de los hierros CADI se remonta hacia apenas unas cuantas décadas en el pasado, puesto que su desarrollo dio inicio desde principios de los años 90 y

su introducción al mercado en 1992 (4), por lo que realizar una revisión profunda de la literatura es fundamental ya que se pretende aportar una recopilación de información novedosa que permita el continuo avance de la tecnología relacionada al proceso y producción de hierros CADI.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

- Obtener una extensa recopilación bibliográfica de los avances en el desarrollo y aplicaciones de hierros nodulares austemperizados con carburos.

1.1.2 Objetivos particulares

- Sintetizar distintas publicaciones científicas sobre los avances realizados en la investigación de hierros CADI.
- Analizar información novedosa que permita el continuo avance de la tecnología relacionada al proceso y producción de hierros CADI.
- Comparar conocimientos existentes sobre la producción de hierros CADI.

Capítulo 2: Planteamiento metodológico

El proceso de investigación comenzó con la selección del tema a partir de intereses de investigación, siendo un proceso posterior al haberse realizado una investigación previa en la asignatura Proyecto. Una vez concretado el tema "*Avances en el desarrollo y aplicaciones de hierros CADI*" se planteó el objetivo de investigación.

La identificación de los conceptos clave a definir dio paso a la investigación bibliográfica en diversas fuentes: Biblioteca Digital UNAM, bases de datos, editoriales de artículos científicos (Elsevier, Springer), Google Scholar, páginas web, informes globales, libros físicos y digitales, etc.

Las palabras clave que permitieron realizar una búsqueda bibliográfica fueron: "austemper ductile iron", "carbodic austemper ductile iron", "hierro nodular", "austemperizado", "nodular iron", "heat treatment ductile iron" y por las siglas "ADI" y "CADI". Una vez realizada la búsqueda de estas palabras en las fuentes anteriormente mencionadas, los artículos científicos se leyeron comenzando por el título y el resumen, si ambos eran de interés el artículo o la publicación científica se leía por completo, de otro modo, se continuaba con la búsqueda de información. Dentro de los criterios de selección se optaba por adquirir referencias lo más reciente posible.

Al recopilar cierto número de artículos y/o publicaciones científicas útiles para la investigación, estos se leyeron y se realizó un resumen de un párrafo de cada uno, colocando los hallazgos principales de la investigación de cada autor, al mismo tiempo se realizaba un documento por separado en donde se colocaban las frases o palabras de importancia de cada artículo con su respectiva referencia.

Cada que se finalizaba con la lectura y el resumen, se buscaba información ahora en las referencias que contenían estos. La revisión de las referencias de los artículos era similar a la revisión en las bases de datos, comenzando por el título del artículo y posteriormente por el resumen o "abstract" que contenía.

Una vez recopilada la bibliografía y la información se realizó un tratamiento de datos de los 17 artículos científicos seleccionados de acuerdo a las variables como *Temperatura y tiempo de austenización, Temperatura y tiempo de austemperizado, Fracción de carburos, Propiedades mecánicas de resistencia al desgaste, resistencia a la abrasión, resistencia al impacto y dureza*, siendo de interés para complementar la teoría y los conceptos clave, el procesamiento de los datos permitió la síntesis de acuerdo a las variables antes mencionadas y se anexó al apartado de resultados, en forma de imágenes, *Tablas* y esquemas. Adicionalmente en esta misma sección se realizó el análisis de resultados en donde se efectuó un contraste entre las investigaciones de diversos autores y la interpretación de los datos.

Finalmente se redactó la última sección del proceso de investigación, en la conclusión se redactó un resumen de cada apartado de la tesina con la información más importante y relevante de cada uno con relación a los objetivos planteados.

Capítulo 3: Marco teórico

3.1 Introducción

Los hierros fundidos son aleaciones ferrosas, que contienen usualmente entre 2 a 4% de carbono y silicio entre 1 a 3%, junto con Mn, S, P y otros elementos de aleación para modificar o controlar las propiedades mecánicas como desgaste, abrasión y resistencia a la corrosión. Como su nombre lo indica, su forma final la obtiene directamente por colada, lo cual ahorra costos al reducir varios procesos de mecanizado. Sus aplicaciones son variadas en la industria debido a su costo relativamente bajo, sin embargo, los límites se encuentran al tener baja resistencia al impacto y ductilidad (5).

El hierro nodular o dúctil convencional (sin tratamiento térmico) se obtiene directamente por colada, a partir del cual se obtienen dos variantes: ADI y CADI, mediante tratamiento térmico de austemperizado.

Cicero et al. (2004) (6) refieren que el hierro ADI (por sus siglas en inglés "austempered ductile iron") es un hierro dúctil con un tratamiento térmico de austemperado o "austempering", el cual le confiere al material buenas propiedades mecánicas, por ejemplo, de resistencia, ductilidad y resistencia al desgaste, todo ello debido a que mediante el tratamiento térmico mencionado, crea una microestructura que consiste en una matriz de austenita saturada con alto contenido de carbono (térmicamente estabilizada) junto con ferrita acicular, ambas fases crean una microestructura llamada ausferrita. Estas propiedades mecánicas obtenidas por esa microestructura, permiten que este tipo de hierro tenga un gran potencial en distintas aplicaciones para la industria, principalmente en el sector minero y automovilístico.

Por otro lado, los hierros CADI (por sus siglas en inglés "carbide austempered ductile iron") son hierros nodulares que adicionalmente a la matriz de ausferrita,

contienen carburos. La adición de carburos dentro de la matriz es con el fin de mejorar su resistencia al desgaste, resistencia a la abrasión y tener mayor dureza. Para la fabricación de un CADI primero se crea un hierro nodular con carburos, al que posteriormente se le aplica un tratamiento térmico que consiste en dos etapas, la primera que se conoce como austenización y la segunda como austemperizado; la fracción de carburos puede controlarse por medio del primero y con la adición de elementos aleantes formadores de carburos, mientras que con el segundo se consigue una matriz ausferrítica, que es una mezcla de las dos fases mencionadas en el párrafo anterior (7).

Esta matriz de ausferrita le proporciona al material alta resistencia, resistencia al desgaste y resistencia a la abrasión. Estas propiedades permiten aplicaciones en la fabricación de piezas automotrices, equipos pesados y para la explotación de minas; rivalizando con hierros blancos, aceros convencionales, aceros forjados y aceros de alta resistencia. En la microestructura también pueden estar presentes distintas fases como bainita, austenita enriquecida en carbono, nódulos de grafito, martensita, carburos de hierro y carburos aleados (8).

Las etapas del proceso de tratamiento térmico son austenización y tratamiento de austemperado o isotérmico, en el primero la muestra se lleva a una temperatura por encima de la temperatura crítica superior por cierto tiempo, posteriormente se temple en un baño de sales a una temperatura en el rango de 275 – 400°C durante un lapso de 1 a 2 h, tiempo que permite la transformación y la obtención de ausferrita que ocurre por la nucleación de ferrita en los nódulos de grafito o próximos, lo cual brinda resistencia y ductilidad; la cinética de transformación ausferrítica es determinada por la diferencia en el contenido de carbono, sin embargo, debido a la segregación de elementos aleantes da lugar a una menor diferencia que da lugar a la formación de martensita, reduciendo estas propiedades (6; 9).

Los carburos son los compuestos conocidos que conceden resistencia al desgaste y que se pueden producir fácilmente. La disponibilidad de carburos en la matriz de

ausferrita puede reducir la resistencia del hierro fundido, pero el aumento de los carburos puede mejorar en gran medida la resistencia al desgaste (10; 11).

Wang et al. (2019) (12) plantean que para obtener el equilibrio entre las propiedades mecánicas de resistencia al desgaste y resistencia, la clave está en la cantidad de carburos que posee en la matriz el hierro fabricado, es decir, durante la fabricación del hierro nodular con carburos, se debe reducir el número de elementos grafitizantes (en especial el Si) con el fin de provocar la precipitación de carburos durante la solidificación; también hacer uso de enfriadores para promover un alto subenfriamiento provocará la formación de carburos, principalmente de hierro; y adicionalmente, utilizar con elementos estabilizadores de carburo durante la fabricación del hierro, como lo son el Cromo (Cr), Molibdeno (Mo) y el Vanadio (V).

La aplicación de CADI en la industria que utiliza herramientas y piezas con un gran consumo de desgaste aumenta día a día, de acuerdo a Zhao et al. (2020) (11) tan sólo los materiales metálicos resistentes al desgaste como bolas de molienda, revestimientos, dientes de excavadoras, cucharones, etcétera. se consumen a una tasa de más de 4.05 millones de toneladas cada año en China, entre las cuales las bolas de molienda son la mayor parte, representando el 43% del total de materiales resistentes al desgaste. Debido a este creciente mercado es de gran importancia predecir la composición química y las etapas del proceso de tratamiento térmico para cumplir con los requisitos que demandan las piezas CADI.

3.2 Industria de la fundición en México

México posee una de las industrias de la fundición más grandes a nivel mundial, posicionándose entre los diez primeros países en el ranking internacional de producción del sector. De acuerdo con los datos publicados en la revista Modern Casting (13), la clasificación se encuentra liderada por China con una producción

cercana a los 52 millones de toneladas métricas, seguida por India con 11 millones de toneladas métricas y Estados Unidos con aproximadamente 9 millones de toneladas métricas, México ocupa el 7mo lugar con 2.85 millones de toneladas métricas, tal como se presenta en el Top de la *Figura 1*.

Top 10 Productores de Fundiciones (14)

1	<u>China</u>	51,950,000	toneladas métricas	<i>variación porcentual</i>	6.0%
2	<u>India</u>	11,314,360	toneladas métricas	<i>variación porcentual</i>	-1.5%
3	<u>Estados Unidos</u>	9,748,811	toneladas métricas	<i>variación porcentual</i>	-13.7%
4	<u>Rusia</u>	4,200,000	toneladas métricas	<i>variación porcentual</i>	No hay nuevos datos
5	<u>Alemania</u>	3,482,883	toneladas métricas	<i>variación porcentual</i>	-29.6%
6	<u>Japón</u>	3,446,903	toneladas métricas	<i>variación porcentual</i>	-34.7%
7	<u>México</u>	2,855,650	toneladas métricas	<i>variación porcentual</i>	No hay nuevos datos
8	<u>Corea</u>	2,380,200	toneladas métricas	<i>variación porcentual</i>	0.0%
9	<u>Turquía</u>	2,170,759	toneladas métricas	<i>variación porcentual</i>	-6.0%
10	<u>Brasil</u>	2,073,173	toneladas métricas	<i>variación porcentual</i>	-9.4%

Figura 1. Clasificación mundial de la industria de la fundición en 2021. Fuente: adaptado de (14).

También, de acuerdo con el informe de la Industria de la Fundición en México de la WFO (World Foundry Organization), México con una producción aproximada a los 3 millones de toneladas métricas, el 18% de la producción total fue de hierro nodular superada por la producción de hierro gris y aluminio, como se ilustra en la *Figura 2*; con ello se generó más de 50,000 empleos directos y 100,000 empleos

indirectos, los cuales permitieron la fabricación de productos ferrosos y no ferrosos para los principales sectores, como se ilustra en la *Figura 3*, en donde el sector automovilístico, ocupa el primer lugar, seguido del sector de la construcción, agroalimentario, ferroviario, máquina-herramienta, minería, aeroespacial y fabricación (15).

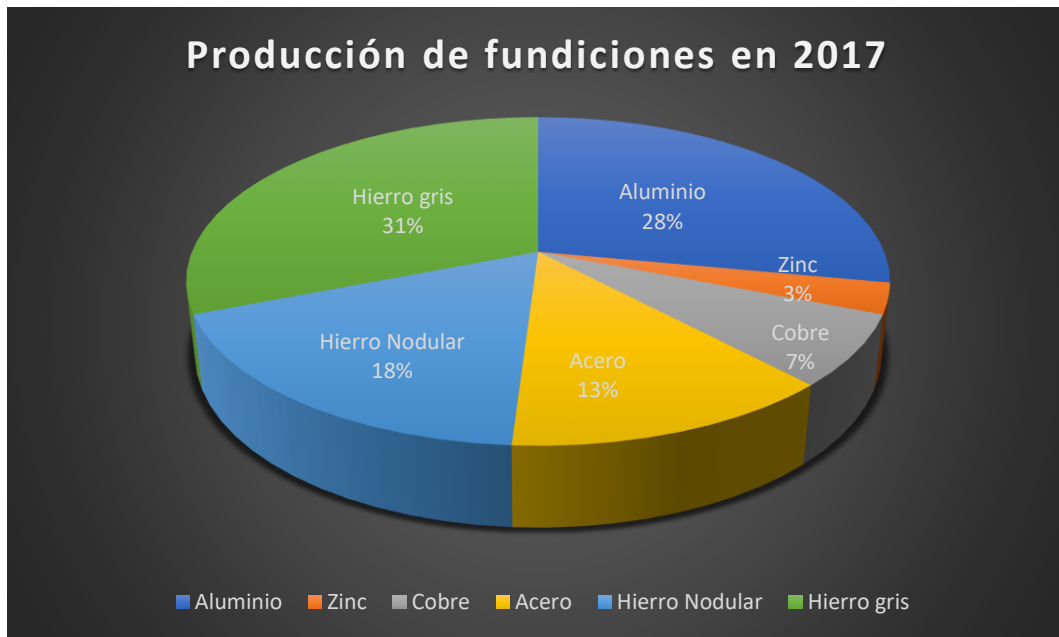


Figura 2. Porcentaje de producción de fundición ferrosa y no ferrosa en México, 2017. Fuente: adaptado de (15).

En la última década, México ha creado nuevas instalaciones de fundición y ensambladoras de fabricantes de autos y camiones, debido a que el 72.2% de la producción de fundición total está asociada al sector automotriz, en donde el 42.5% se destina al consumo nacional mientras que el resto se exporta a países como Estados Unidos, Japón, Alemania, Corea y Centroamérica (15).



Figura 3. Porcentaje de consumo de piezas fundidas producidas en México en los principales sectores clientes. Fuente: adaptado de (15).

Con los datos anteriormente mencionados, la Industria de la Fundición en México es de gran relevancia para el país, su valor en el mercado nacional y mundial representa una oportunidad de crecimiento dada la importancia de la misma, sin embargo, aún se deben de considerar una serie de problemáticas para su completo desarrollo, es por ello que obtener una buena calidad metalúrgica en el producto final es de gran relevancia, por lo que el estudio de los procesos y avances son fundamentales y de suma importancia para el país.

3.3 Hierros fundidos

3.3.1 Clasificación de los hierros fundidos

Los hierros fundidos o fundiciones son una familia de aleaciones ferrosas, su clasificación básica se divide en fundición gris, dúctil (conocida también como

nodular o esferoidal), blanca, maleable y grafito compacto o vermicular. En la *Tabla 1* se describen algunas de sus características generales y aplicaciones típicas.

Una de las clasificaciones del hierro gris es de acuerdo a su matriz, se divide en ferrítico, perlítico y martensítico. Posee una gran capacidad de amortiguamiento debido a la presencia de hojuelas de grafito en su microestructura, lo cual lo ha convertido en un material común para bancadas de máquinas de herramienta (16).


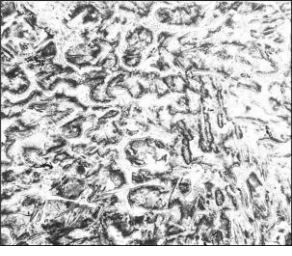
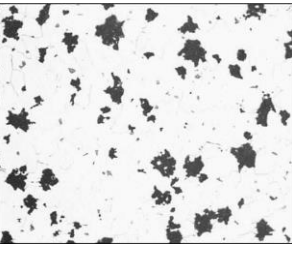
El hierro blanco posee una alta dureza y resistencia al desgaste, lo cual lo convierte en un material para procesar materiales abrasivos, ya que su microestructura contiene grandes cantidades de carburos. El nombre de este hierro se debe a que su fractura es de un color blanco brillante (5; 16).

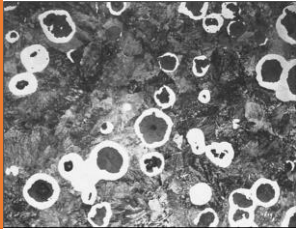
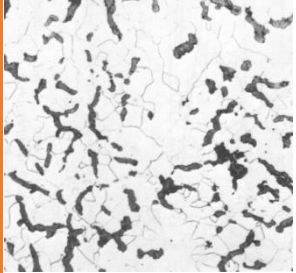
Para obtener el hierro maleable primero se fabrica un hierro blanco que se procesa térmicamente mediante dos etapas: grafitización, en la cual el hierro blanco se calienta por arriba de la temperatura eutéctica (~ 940°C) durante un lapso de 3 a 20 h (dependiendo de la composición, dimensiones de la pieza y microestructura); la segunda etapa es el enfriamiento el cual depende de la microestructura que se desea obtener (ferrita, perlita o martensita) (5).

El hierro de grafito compactado tiene propiedades intermedias de los hierros grises y nodulares al poseer buen amortiguamiento, resistencia y conductividad térmica, pero baja ductilidad. Por ello, sus aplicaciones más comunes son los monobloques de motores automovilísticos y cabezas de cilindros (16).

El hierro dúctil (nodular) se designa de acuerdo con sus propiedades mecánicas: resistencia a la tensión, resistencia a la fluencia y elongación. Posee propiedades similares a las de los aceros como alta resistencia, resistencia, ductilidad y se puede trabajar en caliente. Su matriz se conforma de nódulos de grafito en matrices ferríticas o perlíticas (16; 5).

Tabla 1. Rangos de composición química, aplicaciones típicas y microestructura de hierros fundidos. Fuente (5; 14; 15).

Hierro fundido	Composiciones químicas (%)					Aplicaciones típicas	Microestructura	
	C	Si	Mn	S	P			
Hierro gris	2.5-4.0	1.0-3.0	0.25-1.0	0.02-0.25	0.05-1.0	Bloques de cilindros, cabezas de cilindro, placas de embrague, cajas de cambio, forja de motores Diesel.		<i>La estructura consiste en láminas de grafito tipo A en una matriz 80perlítica-20ferrítica.</i>
Hierro blanco	1.8-3.6	0.5-1.9	0.25-0.80	0.06-0.20	0.06-0.18	Equipo ferroviario, engranes, bielas. Partes resistentes al desgaste, rodillos para laminado, boquillas para granallado.		<i>El componente blanco es carburo de hierro, las áreas grises son de perlita.</i>
Hierro maleable	2.00-2.60	1.10-1.60	0.20-1.00	0.04-0.18	0.18 máx	Bielas, horquillas de juntas universales, maquinaria agrícola, material rodante para ferrocarriles.		<i>Nódulos de grafito (carbón revenido) en una matriz ferrítica.</i>

Hierro dúctil	3.00-4.00	1.8-2.8	0.10-1.00	0.03 máx	0.10 máx	Cuerpos de válvulas y bombas, cigüeñales, engranajes, rodillos, piñones, tapas corredizas.		<i>Nódulos de grafito en envolturas de ferrita libre (ojo de buey) en una matriz de perlita.</i>
Hierro vermicular	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1	Placas de la bancada de grandes motores Diesel, cárter de caja de velocidades y turbocompresores.		<i>Típica microestructura de hierro vermicular o hierro de grafito compacto.</i>

Al igual que el hierro maleable que es obtenido al tratar térmicamente a un hierro blanco, existen otros tipos de hierros, los cuales son resultado de un tratamiento térmico de un hierro de colada, como es el caso de ADI y CADI, producto de un ciclo de dos etapas de un tratamiento térmico aplicado a un hierro nodular. En la *Figura 4* se ilustra un esquema de los hierros obtenidos directamente de colada y los hierros obtenidos por tratamiento térmico.

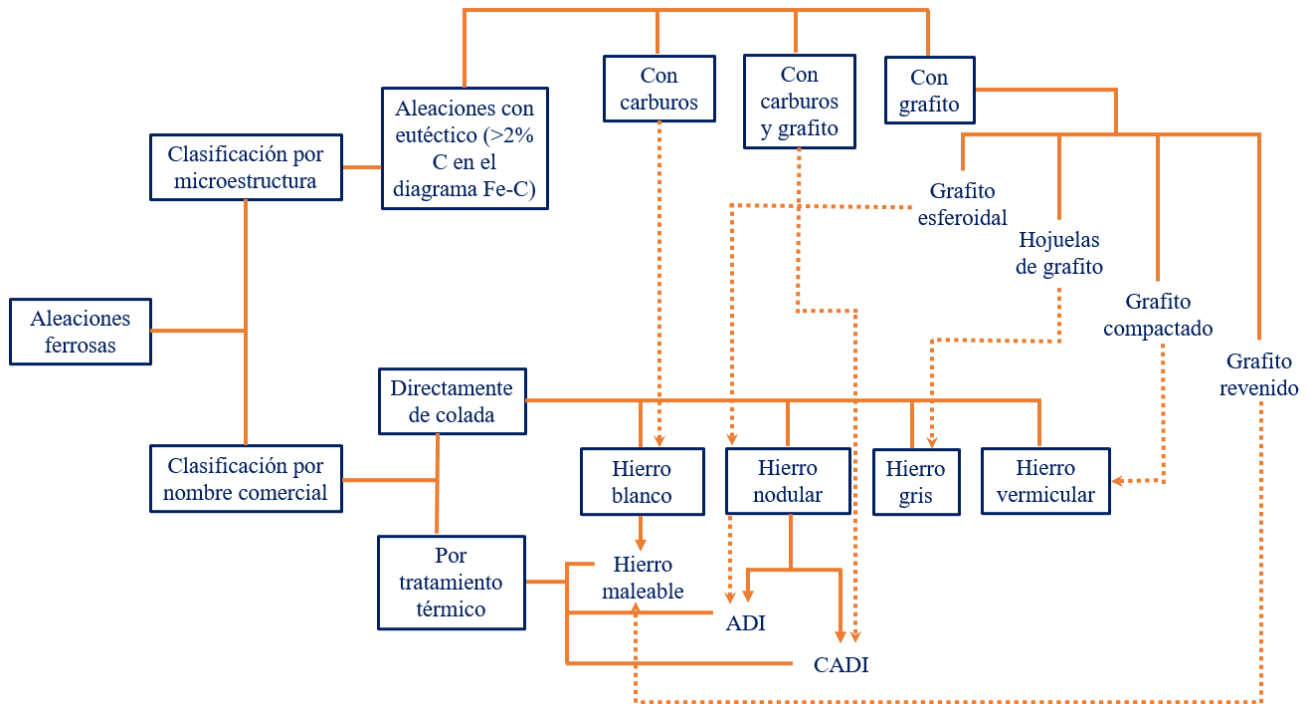


Figura 4. Representación esquemática de la clasificación de los hierros fundidos. Fuente: adaptado de (17).

Como se mencionó en el párrafo anterior, los hierros dúctiles o hierros nodulares son tratados térmicamente con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas al modificar su microestructura, de este modo se obtiene el hierro ADI y su variante el hierro CADI, por medio de un tratamiento térmico de dos etapas: austenización y austemperizado, en donde el segundo tiene como objetivo de obtener una microestructura de alta dureza, ductilidad y buena resistencia al desgaste (17).

3.3.2 Diagrama Fe - C - Si

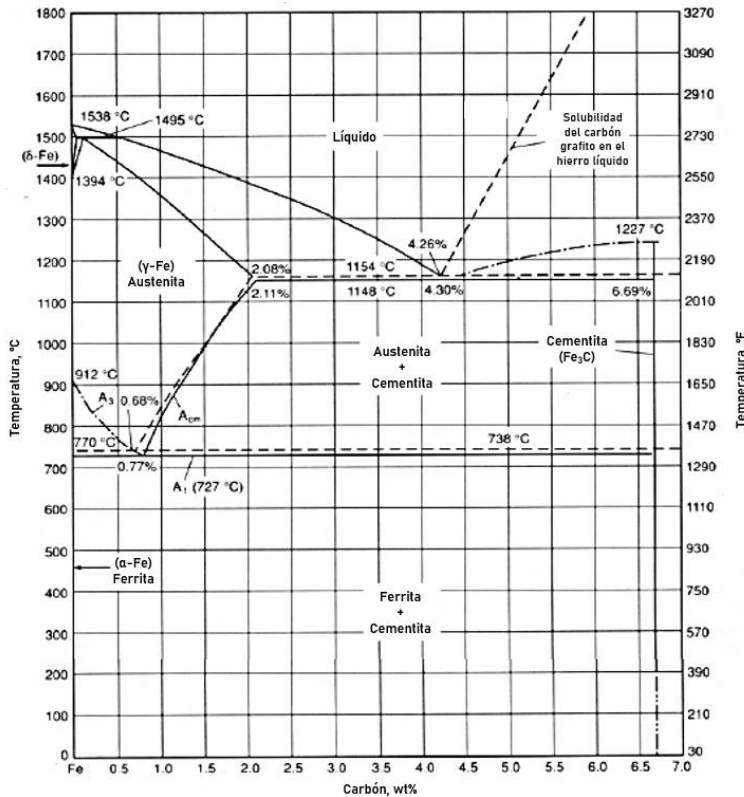


Figura 5. Diagrama Fe - C, las líneas continuas describen el sistema metaestable Fe - Fe₃C y las líneas punteadas representan el sistema estable Fe - C. Fuente: (12).

Debido a que los hierros colados contienen una considerable cantidad de Si no se pueden considerar como aleaciones binarias sistema Fe - C, ya que la adición de Si modifica el diagrama de Fe - C, por lo cual se considera aleación de un sistema ternario Fe - C - Si. Las principales diferencias características entre el sistema binario y el sistema ternario son: las temperaturas eutecticas y eutectoides cambian de valores únicos en el sistema binario a rangos de temperatura en el sistema ternario; además de que los puntos eutecticos y eutectoides se desplazan a contenidos menores de carbono.

Sin embargo, para el uso del diagrama ternario se debe considerar un contenido de Si del 2%, pero este valor no siempre está presente lo cual provoca inexactitud al mismo sistema, de modo que el diagrama hierro-carbono (Figura 5) es utilizado para predecir las microestructuras cercanas al equilibrio. El diagrama metaestable es utilizado para predecir las microestructuras de los hierros blancos, mientras que el diagrama estable permite conocer las microestructuras de los hierros grises, nodulares y vermiculares (17).

La relación del contenido de silicio con el carbono en diferentes hierros fundidos se muestra en la *Figura 6*, se aprecia que estos elementos son inversamente proporcionales, al aumentar el contenido de Si el contenido de C en el eutéctico disminuye, esta relación está dada por la *ecuación 1*. Los efectos del Si y el C se pueden establecer, entonces con un factor denominado Carbono Equivalente (C_{eq}), esta relación se establece en la *ecuación 2*, en donde también se añade un término adicional, el contenido de P en los casos en que se presentan una considerable cantidad en los hierros. Cuando el C_{eq} tiene un valor de 4.26 (~4.3) se trata de una aleación eutéctica, si se presenta un valor por debajo del eutéctico la aleación es hipoeutéctica, así mismo, si se presenta un valor mayor al eutéctico se trata de una aleación hipereutéctica. Los contenidos de estos elementos que representan el C_{eq} de los hierros, el cual no sólo establece el rango de temperaturas, también permite conocer algunas de las propiedades de la fundición (17).

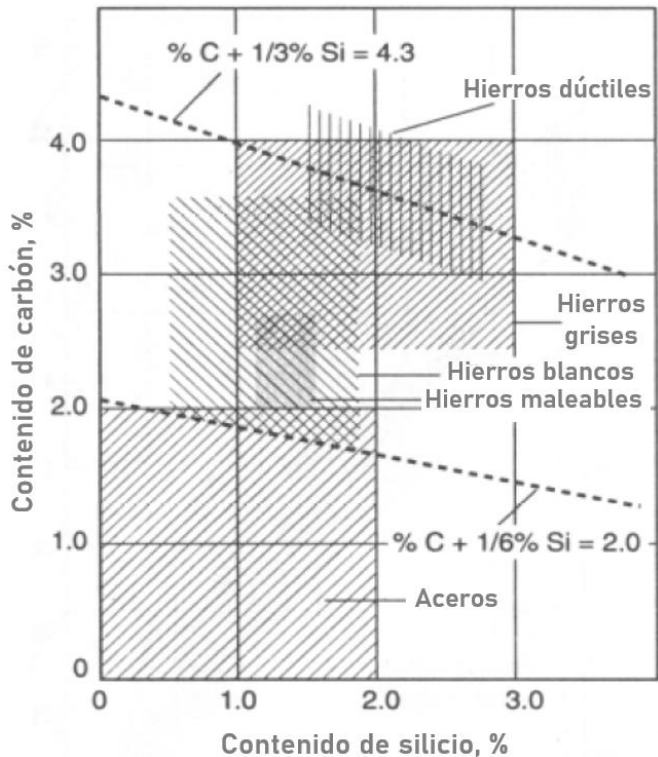


Figura 6. Rangos aproximados del contenido (%) de C y Si para algunos hierros colados y aceros. Fuente: (12).

$$\%C + \frac{\%Si}{3} = 4.3 \quad \text{ecuación 1}$$

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad \text{ecuación 2}$$

3.3.3 Tratamientos térmicos de los hierros fundidos

Los hierros fundidos tienen una amplia gama de aplicaciones en muchos sectores como automovilístico, de herramientas, de construcción (15), etc., lo cual propicia la extensión de los mismos, sin embargo, no siempre las fundiciones directamente de colada cumplen con las características y propiedades que demanda el componente, por lo cual, de manera semejante a los aceros, se aplican tratamientos térmicos, cuyo objetivo es extender las aplicaciones de los hierros al modificarlos con distintos propósitos.

Dichos propósitos al aplicar un tratamiento térmico a un hierro pueden permitir incrementar la resistencia, ductilidad, resistencia a la tensión, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, mejorar la maquinabilidad y la consistencia de sus propiedades, todo ello al modificarse su microestructura (17).

Algunos tratamientos térmicos de los hierros fundidos son el recocido, normalizado, alivio de tensiones, temple y revenido, austemperizado, algunos de ellos se ilustran en el esquema de la *Figura 7*. Ciertos tratamientos térmicos requieren un calentamiento por encima de la temperatura crítica descrita como A_1 , temperatura a la cual la austenita es estable.

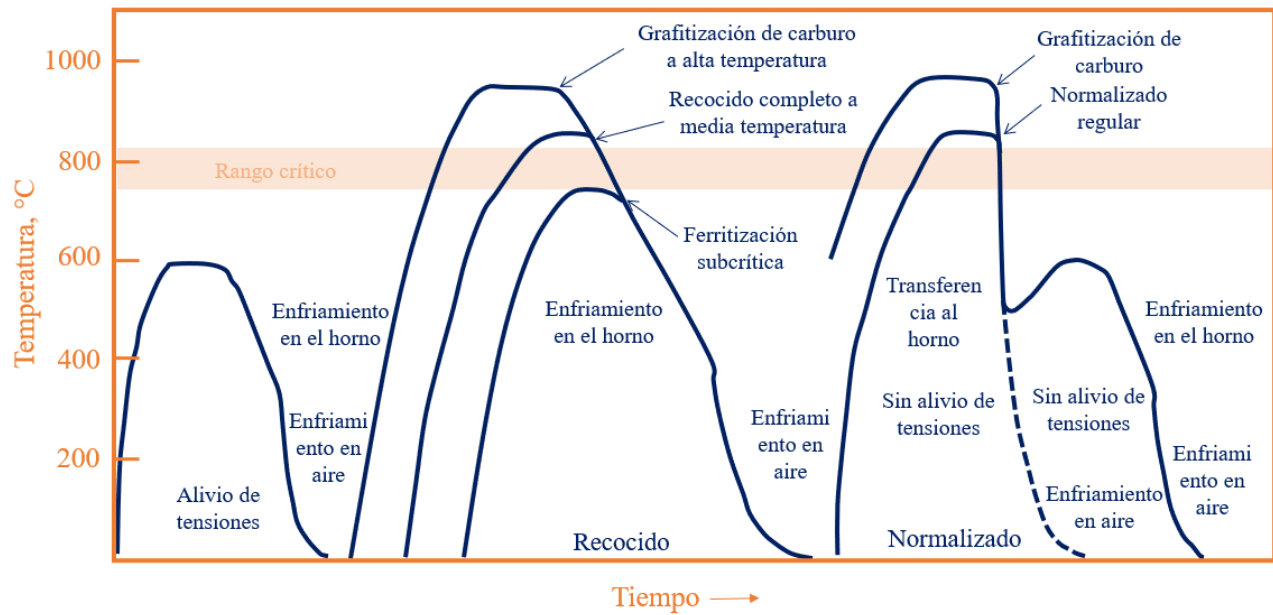


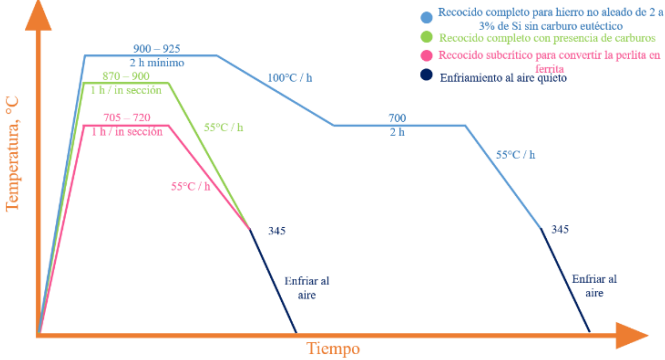
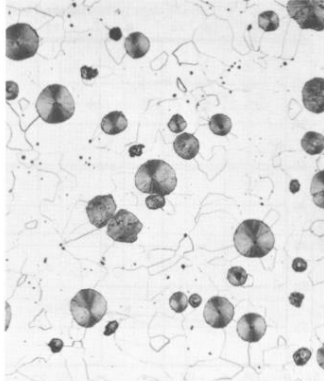
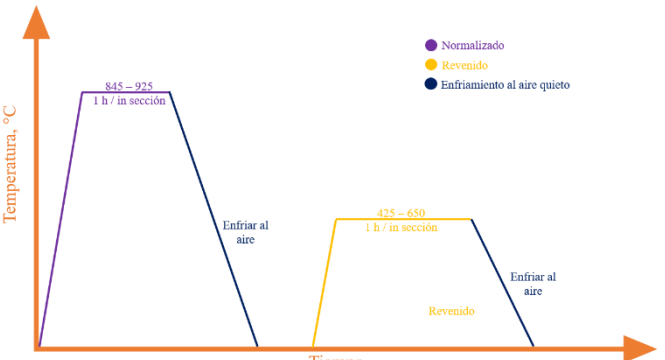
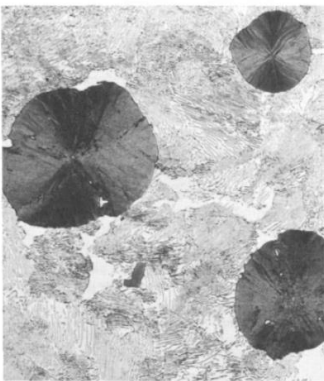
Figura 7. Representación esquemática de los distintos ciclos de calentamiento y enfriamiento para fundiciones: alivio de tensiones, recocido y normalizado. Fuente: adaptado de (17).

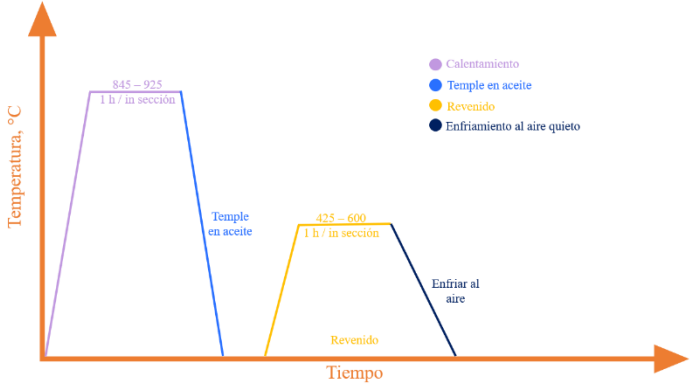
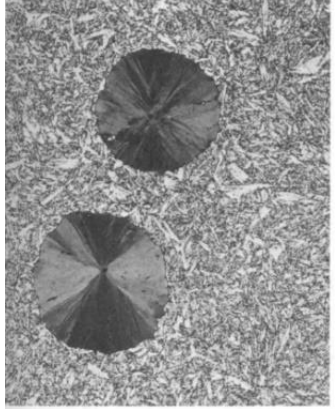
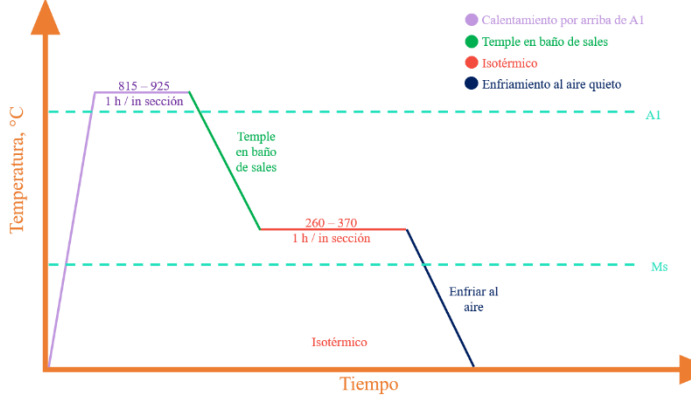
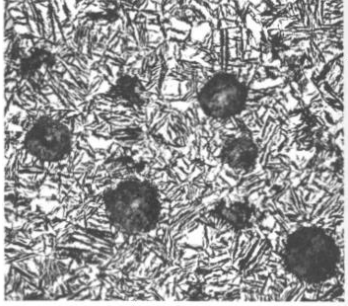
En la sección anterior se hizo énfasis en que los hierros colados son aleaciones ternarias, esto implica que la temperatura crítica A_1 dependa del contenido de Si, ya que este elemento eleva el rango de las temperaturas de transformación, para conocer la temperatura inferior del rango crítico se puede conocer a través de la ecuación 3:

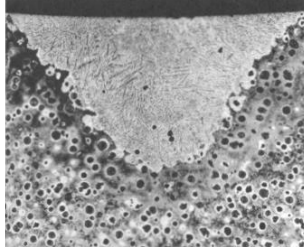
$$\text{Temperatura crítica, } ^\circ\text{C} = 730 + 28(\%Si) - 25(\%Mn) \quad \text{ecuación 3}$$

Para el presente trabajo, la investigación se centrará en los principales tratamientos térmicos aplicados a los hierros nodulares. En la *Tabla 2* se muestra el objetivo de su aplicación, las características generales de cada uno y la microestructura final posterior al tratamiento.

Tabla 2. Principales tratamientos térmicos aplicados a los hierros nodulares. Fuente: (17).

Tratamiento o térmico	Características generales	Microestructura final
<p>Recocido</p> <p><i>Objetivo:</i></p> <p>Incrementar la resistencia y ductilidad</p>	 <p>Los hierros nodulares se someten a un recocido de ferritización con sus tres variantes de acuerdo con las condiciones directas de colada. La microestructura que se obtiene es ferrita en donde el carbono en exceso se dirige a los nódulos presentes.</p>	 <p>Microestructura de un hierro nodular recocido, presenta una matriz totalmente ferrítica. Atacado con picral, a 100 X.</p>
<p>Normalizado</p> <p><i>Objetivo:</i></p>	 <p>normalizado permite obtener una microestructura perlítica. El ciclo inicia por encima de la temperatura de austenización, posteriormente se enfría en aire, pero en algunas ocasiones el normalizado se</p>	 <p>Microestructura de un hierro nodular normalizado, presenta una matriz perlítica con nódulos</p>

<p>Incrementar la resistencia</p>	<p>acompaña de un ciclo de revenido con el fin de incrementar la resistencia y resistencia al impacto.</p>	<p>de grafito. Atacado con picral, a 500 X.</p>
<p>Temple y revenido</p> <p><i>Objetivo:</i></p> <p>Incrementar la dureza o resistencia</p>	 <p>Se recomienda el aceite como medio de enfriamiento para minimizar las tensiones y el agrietamiento, también se puede utilizar salmuera o agua. El revenido posterior alivia las tensiones ocasionadas por el temple.</p>	 <p>Microestructura de un hierro nodular que presenta martensita templada. Atacado con picral, a 500 X.</p>
<p>Austemplado o austemperizado</p>	 <p>El tratamiento consiste en calentar la pieza por arriba de A1 para saturar de carbono la austenita, después se temple en un baño</p>	 <p>Hierro nodular austemplado (ADI) a 370°C, presenta una estructura acicular</p>

<p><i>Objetivo:</i></p> <p>Incrementar la resistencia con cierta ductilidad y obtener resistencia al desgaste</p>	<p>de sales por encima de Ms evitando la formación de perlita. Posteriormente se mantiene a cierta temperatura de transformación para producir ferrita acicular, una temperatura alta produce una estructura más gruesa y una temperatura más baja produce una estructura fina.</p>	<p>gruesa. Atacado con nital 3%, a 300 X.</p>
<p>Endurecimiento superficial por inducción</p> <p><i>Objetivo:</i></p> <p>Incrementar la resistencia al desgaste localmente</p>	<p>Una microestructura perlítica obtenida por un normalizado es recomendable para obtener una buena respuesta al endurecimiento superficial. El control de la temperatura debe ser entre 845 y 900°C.</p>	 <p>Hierro nodular perlítico que muestra: refusión - zonas endurecidas y de transición después del tratamiento con un rayo láser de 1.36 kW, 1.5 mm de diámetro a 4.56 mm/s. Atacado con picral, a 50 X.</p>

3.4 Hierro ADI (Austempered Ductile Iron)

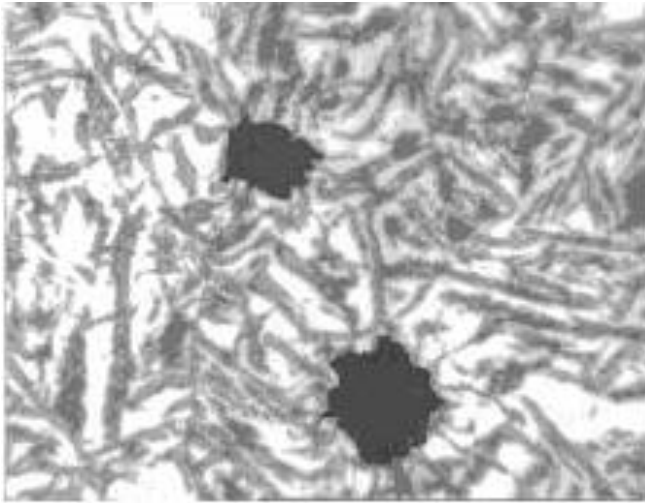
En el año 1950 se desarrolló un nuevo proceso de tratamiento térmico para las recién inventadas dos años antes, fundiciones nodulares, el proceso denominado "austempering" o austemplado, pero fue hasta el año de 1970 que el proceso dio un gran paso y los métodos de este tratamiento se utilizaron industrialmente para fabricar los hierro ADI (18).

El hierro dúctil austemperizado conocido como ADI, es un hierro colado con un tratamiento térmico controlado que exhibe propiedades únicas relacionadas con su microestructura, la cual es obtenida a través de dos etapas conocidas como austenización y austemperizado (18). En la *Figura 8* se muestra una representación de estas dos etapas, la primera fase inicia con la austenización en un rango de 850 – 950°C por arriba de la temperatura A_1 (A-B-C) para disolver el carbono en austenita para la máxima solubilidad, posterior a esto se enfría en un baño de sales (D), por debajo de la temperatura B_s para evitar la transformación de austenita a perlita y por arriba de la temperatura M_s , en la trayectoria D-E comienzan a nuclear placas de ferrita bainítica en las proximidades de los nódulos de grafito, desarrollándose hacia las zonas intercelulares, con mayor tiempo hasta finalizar la transformación bainítica (E-F) y enriquecer la austenita con carbono, mediante el mecanismo de difusión logrando tener niveles de 1.8 – 2% C, finalmente en F-G se completa la transformación de la ausferrita . Una vez concluida esta etapa inicia el austemperizado o también conocido como isotérmico el cual brindará una microestructura única (19).

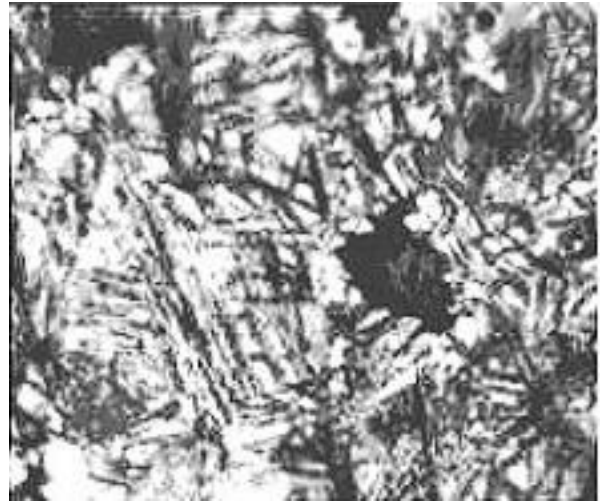
Tabla 3. Propiedades mecánicas de un hierro ADI tratado a diferentes temperaturas de austemperizado. Fuente: (15).

Temperatura de austemperizado (°C)	Estructura	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Elongación (%)	Impacto (J)	HB
260	Acicular fina	1585	1380	3	54	475
370	Acicular gruesa	1035	825	11	130	321

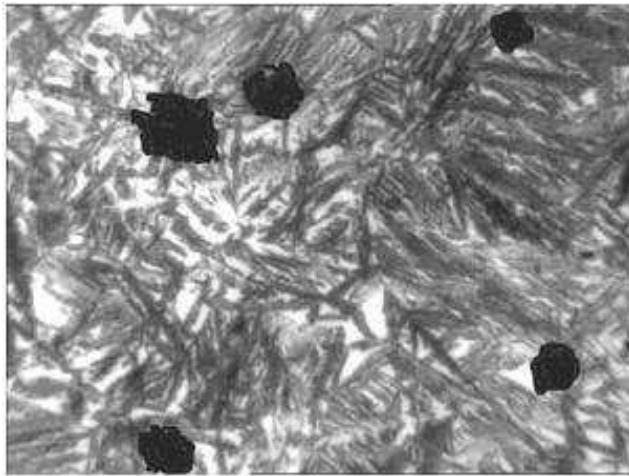
La microestructura final, la cual se muestra en la *Figura 9*, consiste en ferrita bainítica y austenita estable, la combinación de ambas se conoce como ausferrita junto con los nódulos de grafito, brindan al material una combinación de buena maquinabilidad, resistencia, resistencia al desgaste y abrasión, así como una buena relación de peso con bajo costo (18).



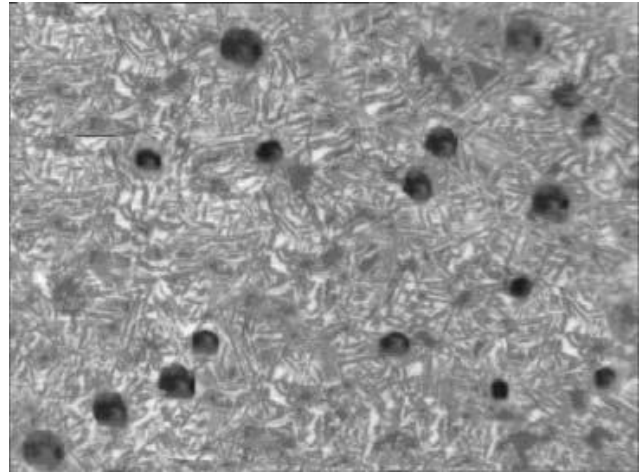
a)



b)



c)



d)

Figura 9. Microestructuras de ADI que muestran la ausferrita: a) muestra austenizada a 925°C con temple isotérmico a 370°C durante 30 min; b) muestra austenizada a 925°C con un temple isotérmico a 310°C durante 30 min; c) muestra austenizada a 850°C con temple isotérmico a 370°C durante 30 min; atacadas con Nital, a 400X. d) muestra austenizada a 925°C con temple isotérmico a 310°C durante 1 h, a 100X. Fuente: (6; 8).

3.4.1 Propiedades mecánicas

En la *Figura 10* se compara la última resistencia a la tensión en función de la elongación de distintas microestructuras de los hierros nodulares. Los grados ADI 1 a 4 superan los valores de ferrita, perlita, ferrita más perlita y martensita

revenida, donde el grado 1 ADI se puede comparar con la martensita revenida en resistencia a la tensión, pero el ADI ofrece una mayor elongación.

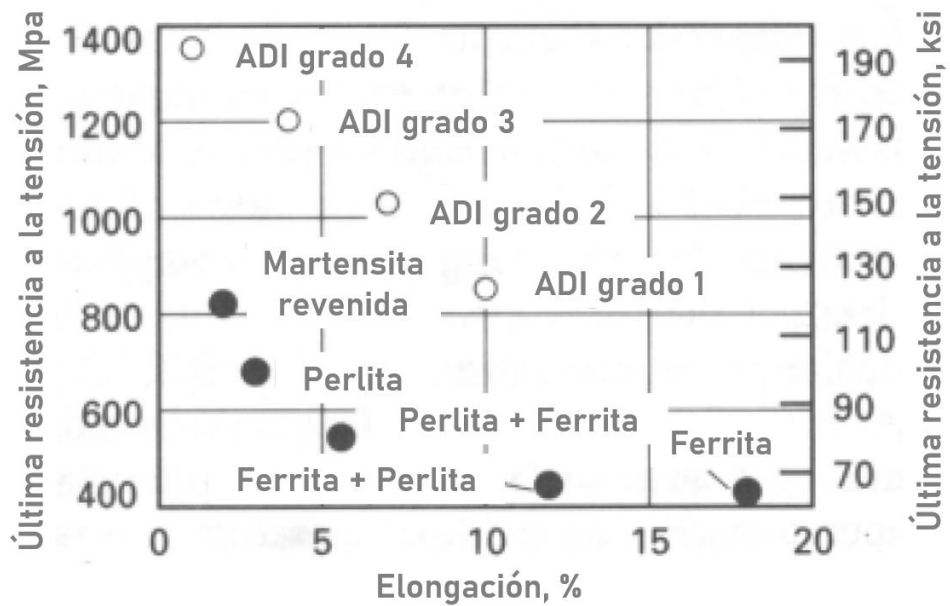


Figura 10. Valores mínimos de resistencia a la tensión en función de la elongación de ADI para los grados 1 a 4 (ASTM A897). Fuente: (15).

Mientras que en la *Figura 11* se muestra que los hierros fundidos con el tratamiento térmico de austemperizado exhiben mejores propiedades mecánicas: mayor resistencia a la tensión a comparación del normalizado, temple y revenido, recocido y nodular ferrítico "bull's eye"; y una elongación mayor a normalizado, temple y revenido pero menor al recocido.

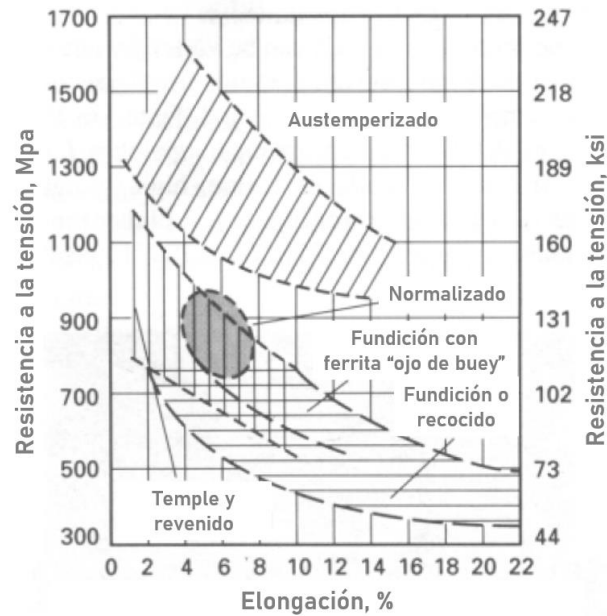


Figura 11. Resistencia a la tensión en función de la elongación de hierros con distintos tratamientos térmicos. Fuente: (15).

También los hierros ADI poseen excelentes propiedades en resistencia al desgaste y abrasión, como se ilustra en la *Figura 12* y *13* la resistencia al desgaste y a la abrasión en función de la dureza, puede compararse con aceros austemperados o templados y revenidos, siendo superado en resistencia al desgaste por los hierros *Ni-Hard* y los ADI carbídicos, que se verán con mejor detalle en la sección 3.5. Sin embargo, un material muy duro, como el caso de los hierros blancos, también es muy frágil, por lo cual los ADI tienen la ventaja sobre estos hierros. Las propiedades mostradas en las *Figuras 10* a *13*, permitirán seleccionar la combinación apropiada para que la pieza final muestre el mejor desempeño en su aplicación.

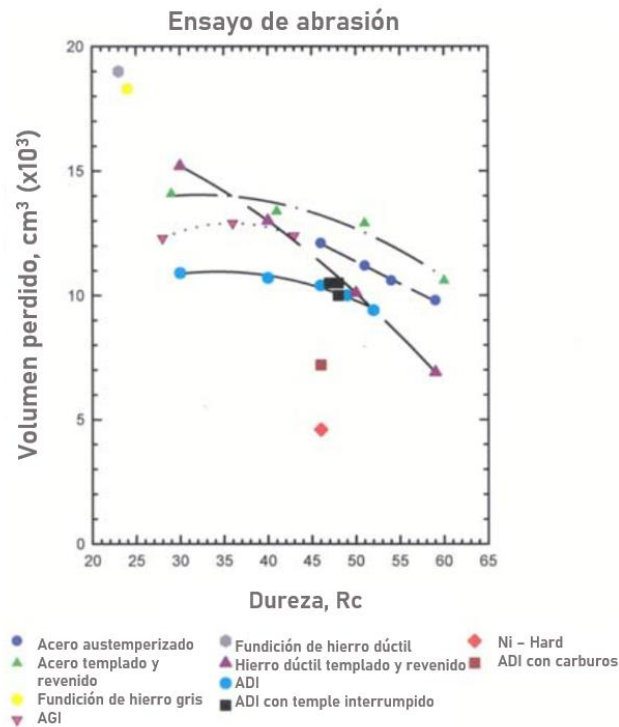


Figura 12. Resistencia al desgaste en función de la dureza HRC para distintos hierros y aceros. Fuente: (18).

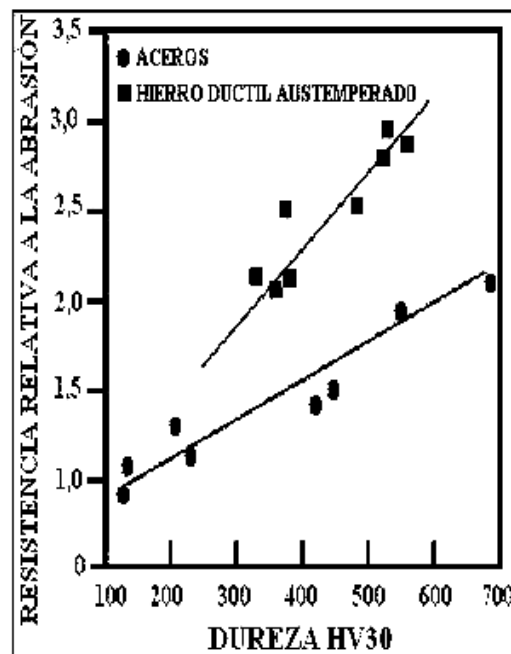


Figura 13. Resistencia relativa a la abrasión en función de la dureza HV para el hierro ADI y aceros resistentes a la abrasión. Fuente: (9).

En la *Tabla 4* se muestran los valores de los cinco grados ADI dados por la norma ASTM A 897 para la resistencia a la tensión, resistencia a la cedencia, elongación, impacto y típica dureza Brinell. Para el grado 5 se observa que es el material que presenta la mayor dureza que los demás grados, pero no tiene elongación ni resistencia al impacto.

Tabla 4. Propiedades mecánicas para los grados de hierro ADI grados especificados en ASTM A 897 y A 897M (métrica). Fuente: (15).

Grado		Resistencia a la tensión mínima		Resistencia a la cedencia mínima		Elongación mínima (%)	Energía de impacto Charpy sin muescas		HB
		Mpa	ksi	Mpa	ksi		J	ft lbf	
125/80/10	Grado 1	850	125	550	80	10	100	75	269-321
150/100/7	Grado 2	1050	150	700	100	7	80	60	302-363
175/125/4	Grado 3	1200	175	850	125	4	60	45	341-444
200/155/1	Grado 4	1400	200	1100	155	1	35	25	388-477
230/185/-	Grado 5	1600	230	1300	185	444-555

3.4.2 Aplicaciones ADI

Las buenas propiedades que tiene el ADI permite su amplia aplicación en el sector automotriz, como cigüeñales, árboles de levas. Su versatilidad permite compararse con hierros convencionales, aluminio y aceros forjados (18). En la *Tabla 5* se muestran algunas aplicaciones de ADI en el sector automotriz.

Tabla 5. Aplicaciones de ADI en la industria automotriz. Fuente: (18; 19; 20; 38).



Asiento de ballesta

Engrane

Árbol de levas

		
<i>Conector</i>	<i>Suspensión de balance</i>	<i>Cigüeñales</i>

3.5 Hierro CADI (Carbide Austempered Ductile Iron)

En la sección anterior se mencionan las características microestructurales de los hierros ADI, la excepcional ausferrita permite brindar al material propiedades relevantes para el uso industrial, compitiendo e incluso sustituyendo diversos materiales, pero ¿qué sucedería si a esta microestructura se le añadieran carburos?

Originalmente en los hierros nodulares convencionales la presencia de carburos en la matriz es un efecto negativo sobre las propiedades del material además de presentar dificultades al maquinar la pieza final. Sin embargo, en los hierros CADI la presencia de carburos en la matriz es esencial para obtener alta resistencia al desgaste (20).

El hierro CADI pertenece a la familia de los hierros nodulares al igual que ADI, bajo tratamiento térmico. Para fabricar un CADI primero se debe seguir una serie de pasos como se ilustran en la *Figura 14*, el primer paso es fabricar un hierro nodular con un moderado control en la composición química, como la adición de los elementos aleantes y el control de elementos grafitizantes, como el Si, posteriormente el hierro nodular fundido pasará a ser tratado térmicamente aplicando un tratamiento térmico de austemperizado, controlando el tiempo y la



Figura 14. Representación esquemática del proceso de fabricación de un hierro CADI. Fuente: imágenes adaptadas de (35).

temperatura de las etapas de austenización y austemperizado, una vez concluido este proceso se obtiene un hierro nodular austemperizado con carburos.

A pesar de la simplicidad en la secuencia, la obtención de CADI sigue siendo tema de investigación por diversos autores, su comportamiento varía de acuerdo con los tiempos, las temperaturas y los elementos aleantes que lo componen, aún no existen normas que regulen su fabricación, es por ello por lo que en esta sección se describirá a grandes rasgos las variables en la fabricación de los hierros CADI.

Los hierros ADI poseen muy buenas propiedades de resistencia al desgaste (Figura 12 y 13), materiales similares poseen durezas elevadas que los hacen muy frágiles, por ejemplo, los hierros blancos, entonces encontrar el equilibrio en obtener buena resistencia al desgaste sin que el material pueda presentar una fragilidad no deseada y ese el caso en que los CADI pueden ofrecer a la industria.

3.5.1 Efecto elementos aleantes

En la sección 3.3.2 se mencionó el efecto del Si al modificar las líneas y puntos críticos del diagrama Fe - C, en la Figura 15 se muestra los efectos de los principales elementos de aleación. En la fabricación de un hierro nodular con

carburos se debe de tener un control en los elementos grafitizantes, principalmente el Si, ya que altos niveles de este disminuyen la formación de carburos.

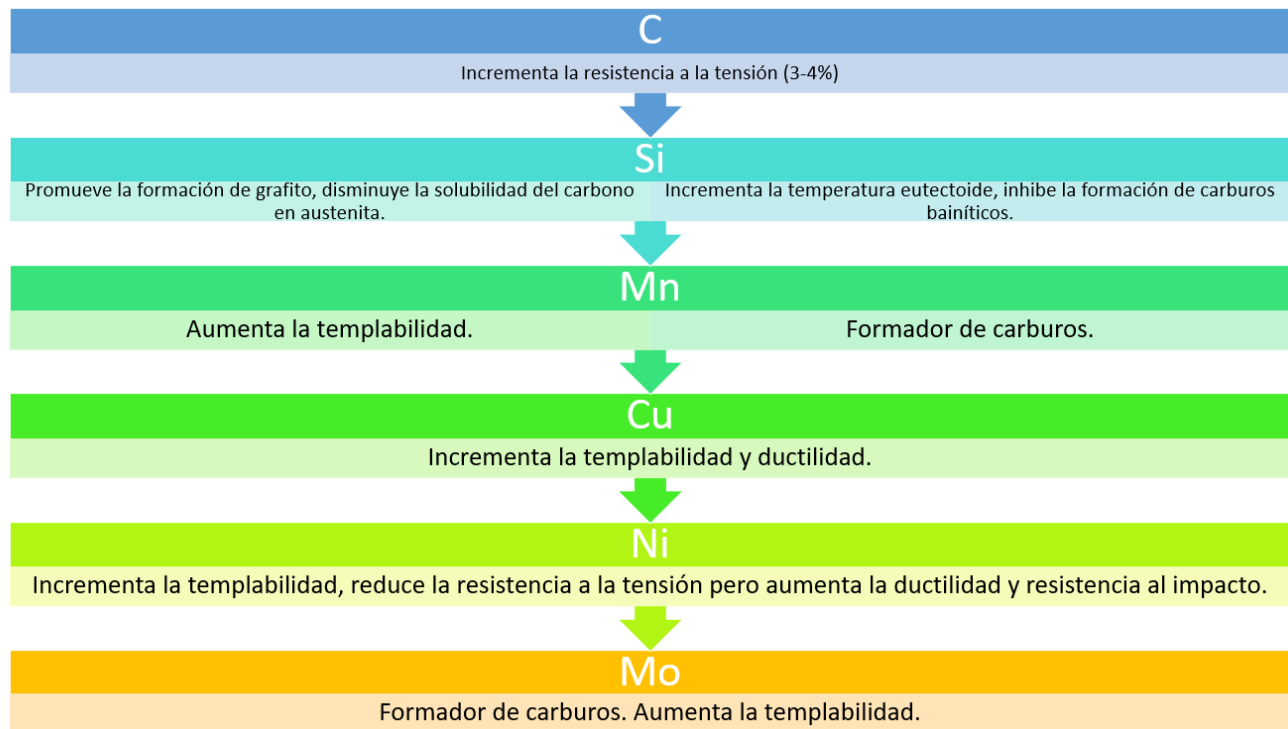


Figura 15. Efectos de los principales elementos de aleación en la etapa de austemperizado. Fuente: (17).

En el hierro nodular los carburos pueden producirse por distintos métodos, algunos de ellos son: elevada tasa de solidificación, y con la adición de elementos formadores de carburos llamados elementos blanqueadores, que se muestran en la Figura 16.

El método de tener un control en la composición química del hierro consiste en mantener un bajo contenido de los elementos C y Si, ya que es benéfico en la producción de CADi debido a que disminuyen la formación de nódulos de grafito y reducen el potencial de grafitización. Mientras que en el caso de la adición de elementos de aleación los elementos V, Cr, Mo y Mn (Figura 16) contribuyen en la formación de carburos VC, Cr₃C₂, MoC (21).

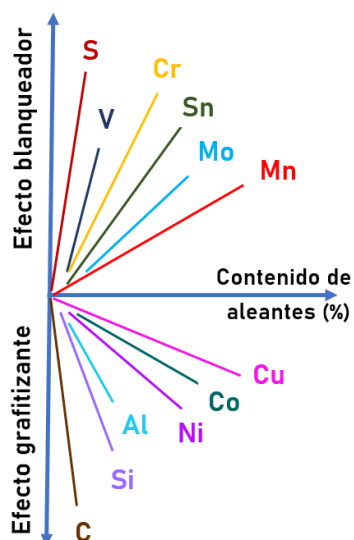


Figura 16. Elementos aleantes: efecto blanqueador y grafitizante. Fuente: (22).

El uso de elementos aleantes blanqueadores tiene la desventaja de que estos elementos poseen un elevado índice de segregación, como se muestra en la *Tabla 6*, lo cual provoca que la últimas zonas en solidificar presenten carburos más gruesos y con grandes concentraciones de los aleantes durante la etapa de solidificación, como consecuencia de ello se produce una distribución heterogénea de carburos en la microestructura, de modo que los carburos centrales son más estables en la austenización mientras que los carburos de la paredes y extremos son más finos pero con menor concentración de aleantes y a su vez menos estables (20; 23).

Tabla 6. Factor de segregación de algunos elementos en los hierros colados. Fuente: adaptado de (18; 21).

Elemento	Mo	Ti	V	Cr	Mn	Si
Factor de segregación	25.3	25.0	13.2	11.6	1.7 - 3.5	0.7

3.5.2 Métodos de introducción de carburos

La producción de CADI se puede realizar a través de dos etapas, en la primera se requiere la fabricación de un hierro nodular con carburos y la segunda etapa consiste en aplicar un tratamiento térmico de austemperizado con un estricto control de la fracción de carburos en la matriz de ausferrita obtenida después del tratamiento.

En la *Tabla 7* se muestran tres métodos de introducción de carburos. En la primera sección de "as-cast" o de colada, el método de enfriamiento interno consiste en que al metal fundido se le adicionan elementos formadores de carburos, como se muestra en la *Figura 16* su clasificación; los principales elementos estabilizadores de carburos son el cromo, molibdeno, titanio, vanadio, entre otros (24). Esto se realiza con el fin de que la menor cantidad posible de carburos se disuelvan durante el proceso de austenización. El segundo método, consiste en enfriamiento superficial colocando dentro del molde un material o "enfriador" con alta conductividad térmica, generalmente se utilizan enfriadores de Cu (*Figura 17*), con el fin de modificar la velocidad de solidificación creando carburos perpendiculares a esa superficie extendiéndose hacia el cuerpo de la pieza. Generalmente estos carburos son disueltos con mayor facilidad durante la austenización que los carburos aleados.

Tabla 7. Métodos de introducción de carburos. Fuente: (24).

As-cast	Carburos introducidos mecánicamente	Soldadura
<ul style="list-style-type: none"> • Enfriamiento interno • Enfriamiento superficial 	<ul style="list-style-type: none"> • Carburos $MxCy$ (Cast-in, crushed $MxCy$ carbides) • Carburos de ingeniería (Cast-in, engineered carbides (shapes)) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hardface weldment • Weldment with $MxCy$ grains

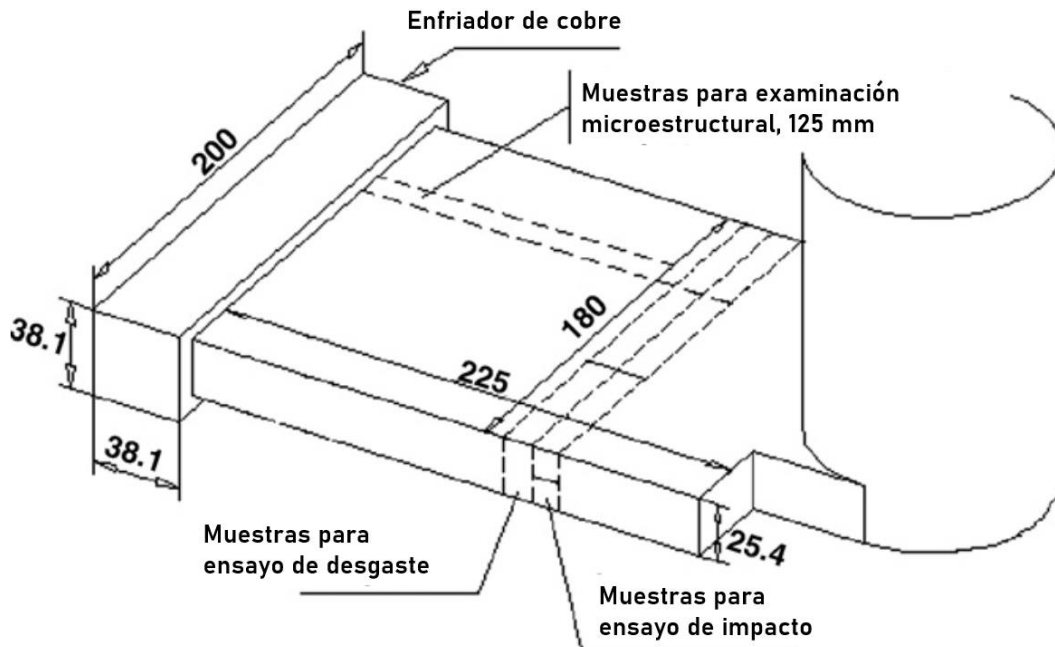


Figura 17. Modelo de placa con un enfriador de cobre en un extremo que muestra el lugar donde se obtuvieron las muestras para distintos ensayos mecánicos. Fuente: (25).

Los carburos presentes en la matriz de un CADI pueden ser ledeburíticos o aleados, se demostró (21) que los carburos aleados, en este caso de Cr, son más estables que los carburos ledeburíticos, además de producir mayor cantidad de carburos que sin el uso de un elemento blanqueador, mostrando así el impacto de los

elementos formadores de carburos y su importancia en la fabricación de hierros CADI. Los carburos también son conocidos como los compuestos de mayor resistencia al desgaste, y se pueden producir relativamente fácil por diversos métodos. La cantidad presente en la matriz de ausferrita es la que brinda al material la mayor o menor resistencia del hierro (10).

3.5.3 Aplicaciones CADI

Las aplicaciones de CADI son variadas, desde equipos para manejo de materiales abrasivos (*Figura 18*), placas de protección de la cuchara excavadora, en la industria agrícola como arados, para el sector ferroviario: suspensión de contacto, placas de desgaste de vagones y tolvas; dientes de excavadoras y escarificadores, piezas de desgaste de transportadores, industria de la construcción e industria minera, todo ello en bajo costo de producción y excelente rendimiento asociado a sus propiedades mecánicas, en particular la elevada resistencia al desgaste (26).

El hierro CADI presenta una gran versatilidad en la fabricación de productos, en la *Figura 19* se pueden observar algunos ejemplos de aplicación de hierros CADI en distintitos sectores industriales. Algunas de sus aplicaciones en el sector automotriz se encuentran los árboles de levas, camisa de cilindro, eje de leva del motor IC (27; 4). En el sector agrícola se pueden incluir desgarradores, dientes, puntas de arado, placas de desgaste y componentes de cosechadoras, recolectores y empacadoras. Mientras que en el sector ferroviario incluyen componentes de suspensión de contacto y placas de desgaste de vagones de ferrocarril/coches. Finalmente, en el sector minero las aplicaciones son dientes de excavadoras y escarificadores, cortadoras, martillos de molino, mayales, protectores, cubiertas, tolvas, placas, carcasas, tubos y codos de transporte, rodillos y rodillos de trituradoras (24).

Es importante mencionar que a diferencia de los hierros ADI que se rigen por normas ASTM, británicas o ISO, los hierros CADI aun no tienen normas en los que

se especifiquen sus propiedades debido a que son hierros colados aún en continuo desarrollo.

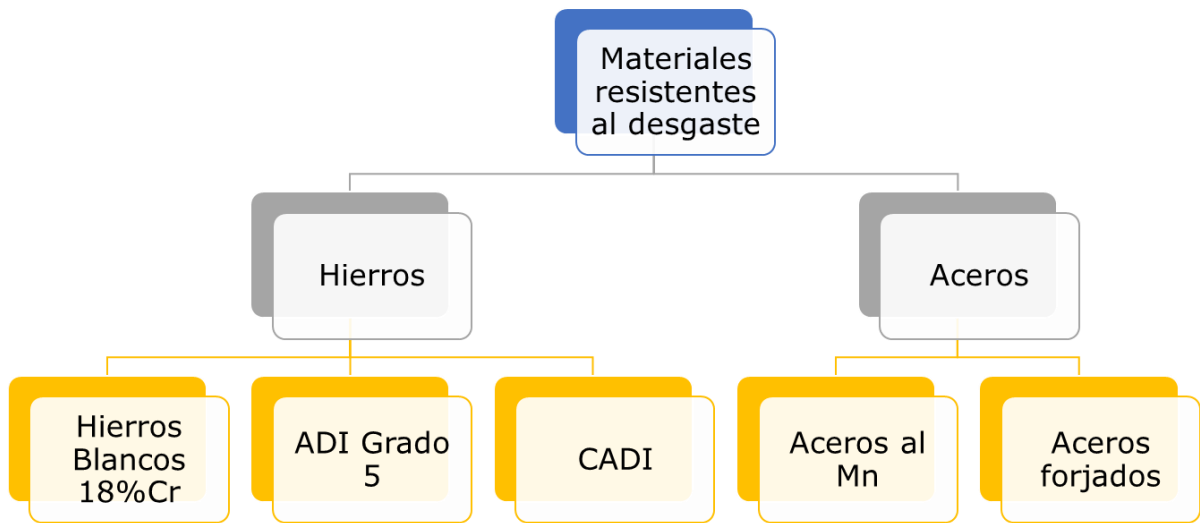
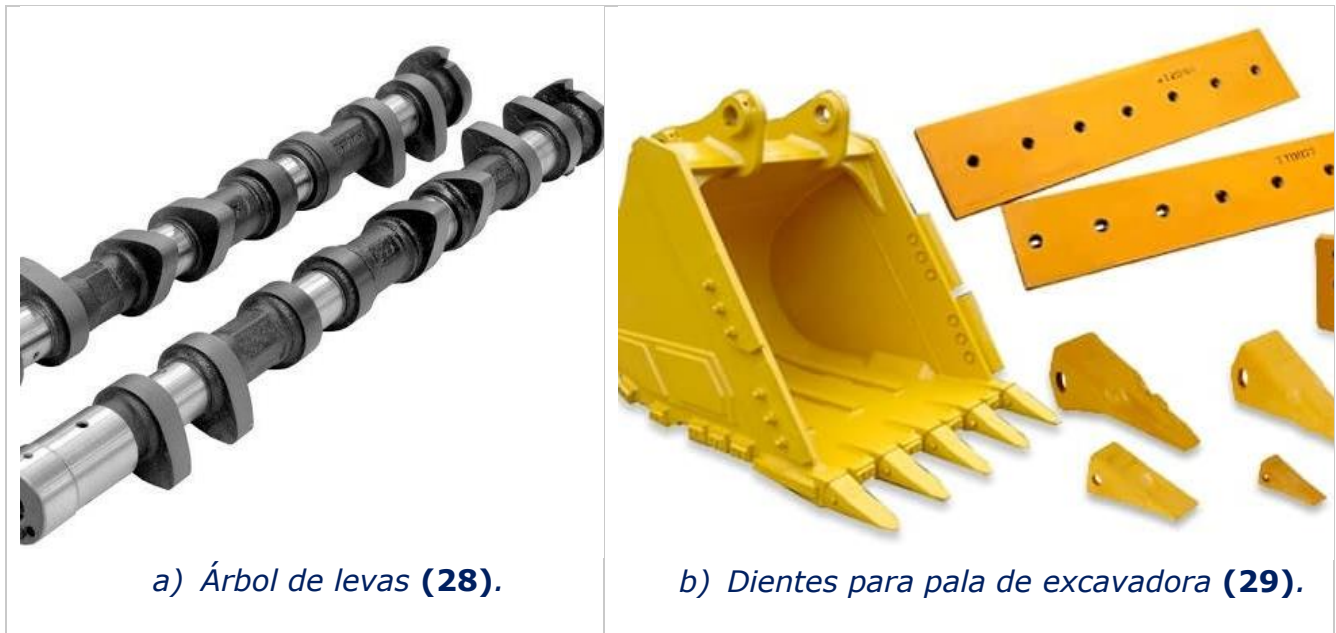


Figura 18. Materiales resistentes al desgaste utilizados en la industria. Fuente: (10; 18).





c) *Palas de arado, sector agrícola (30).*



d) *Suspensión de contacto de ferrocarriles (31).*



e) *Bolas para molienda de minerales (32).*



f) *Cosechadora rotativa de alto rendimiento de John Deere utiliza CADI en sus elementos críticos de trilla (33).*

Figura 19. Ejemplos de aplicaciones recientes de los hierros nodulares austemperizados con carburos, CADI.

En la *Figura 18* se muestra que existen distintos materiales que pueden utilizarse para aplicaciones en donde se requiera resistencia al desgaste, tanto hierros como aceros, en donde los hierros CADI pueden competir ampliamente con estos materiales y en algunos casos obtener cierta ventaja, pero también desventajas las cuales se enuncian en la *Tabla 8*.

Una de las ventajas del CADI frente a los hierros resistentes a la abrasión son los costos de producción, ya que elementos aleantes en hierros blancos y aleados, como el Ni y el Cr que se utilizan en grandes cantidades para su fabricación suelen ser aleantes de alto costo, mientras que, en la producción de CADI debido al tratamiento térmico, los costes totales son menores a los hierros aleados.

Tabla 8. Ventajas y desventajas del uso de hierros CADI. Fuente: (18).

Ventajas	Desventajas
Mayor resistencia al desgaste que el ADI grado 5 con aceptable resistencia.	Limitada maquinabilidad
Más barato y resistente que el hierro blanco con 18% Cr.	Costes por operaciones adicionales en la adición de carburos.
No se requiere inversión extra para su fabricación.	Material nuevo aún en vías de desarrollo.
Puede remplazar al acero al Mn a igual o menor precio.	No poseen normatividad sobre su fabricación.
Crea un nuevo nicho de mercado para los hierros nodulares.	Desarrollos y avances limitados.

Capítulo 4: Resultados y discusión

Como resultado de la investigación de los hierros CADI, a partir de las revisiones mencionadas (1-4, 18-33) con un total de 17 publicaciones y artículos científicos se obtuvo una serie de información, datos, imágenes y tablas, que a continuación se presentaran en el capítulo 4, ya que representan un sobresaliente campo de investigación comparable.

4.1 Revisiones de la literatura

La comercialización de los hierros ADI, y los recientes desarrollos de los hierros CADI ha promovido nuevas investigaciones sobre sus aplicaciones y sobre los procedimientos para producir estos hierros.

Un CADI es una variante de un hierro dúctil austemperado el cual contiene carburos libres, lo que permite tener una combinación de resistencia a la abrasión y al impacto. De acuerdo con los autores (Laino et al., 2009 (1)), su trabajo permitió el estudio de estas propiedades al tener como variables la composición química y el efecto de un enfriador de cobre. Para ello se fabricaron dos variantes de CADI, en un horno de inducción de 3 kHz con una capacidad de 55 kg, utilizando chatarra de acero y retornos de fundición. Las muestras se designaron CADI 1 ($C_{eq} = 3.85$, 0.43%Cr, *Figura 22*) y CADI 2 ($C_{eq} = 4.4$, 2.04%Cr, *Figura 23*) aleadas con Cu y Ni para proporcionar austemperabilidad, junto con Cr, para estabilizar los carburos. Mientras que a CADI 1, CADI 2 y ADI les aplicó tratamiento térmico de austenización a $T_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$ en una mufla durante $t_{\gamma} = 1$ h, seguida de un austemperizado en un baño de sal a $T_a = 320^{\circ}\text{C}$ durante $t_a = 2$ h; también se utilizaron muestras de colada C1 y C2. Se realizaron los ensayos de dureza Brinell y Vickers, resistencia al desgaste por abrasión (ASTM G 65 procedimiento A) y resistencia al impacto (ASTM E 23). En los resultados se observó pequeños nódulos de 10 a 15 μm de diámetro y de acuerdo con la *Figura 20* un alto contenido de

carburos cerca del enfriador, en donde el contenido de la muestra C1 fue mayor que en C2, demostrando el efecto del nivel más bajo de Si, parámetro que controla la formación de carburo. Además, se demostró que mayor cantidad de carburos se disolvieron en la etapa de austenización en la muestra C1 debido a un menor contenido de Cr. La dureza de los microconstituyentes fue 442 HV₂₀₀ para la matriz ausferrítica y 1100 HV₂₀₀ para los carburos. El valor más grande ($E = 3.11$) de resistencia relativa al desgaste fue en CADI 2 (ver *Figura 21*). Para ambas variantes de CADI, los valores de resistencia al impacto fueron de aproximadamente 6 J en $d = 0$ mm (distancia al enfriador de cobre), siendo mayor que la de los hierros blancos. La dureza y la resistencia a la abrasión fueron directamente proporcional al contenido de carburo e inversamente proporcional a la distancia al enfriador, debido a la rapidez de enfriamiento.

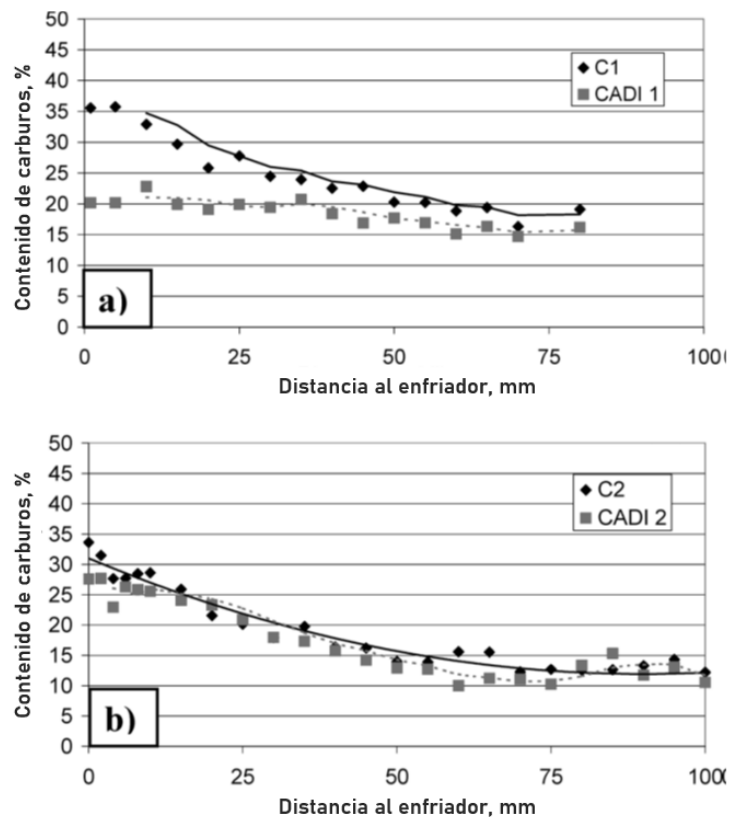


Figura 20. Contenido de carburos en función de la distancia al enfriador para muestras de colada (C1 y C2) y para CADI 1 y 2.

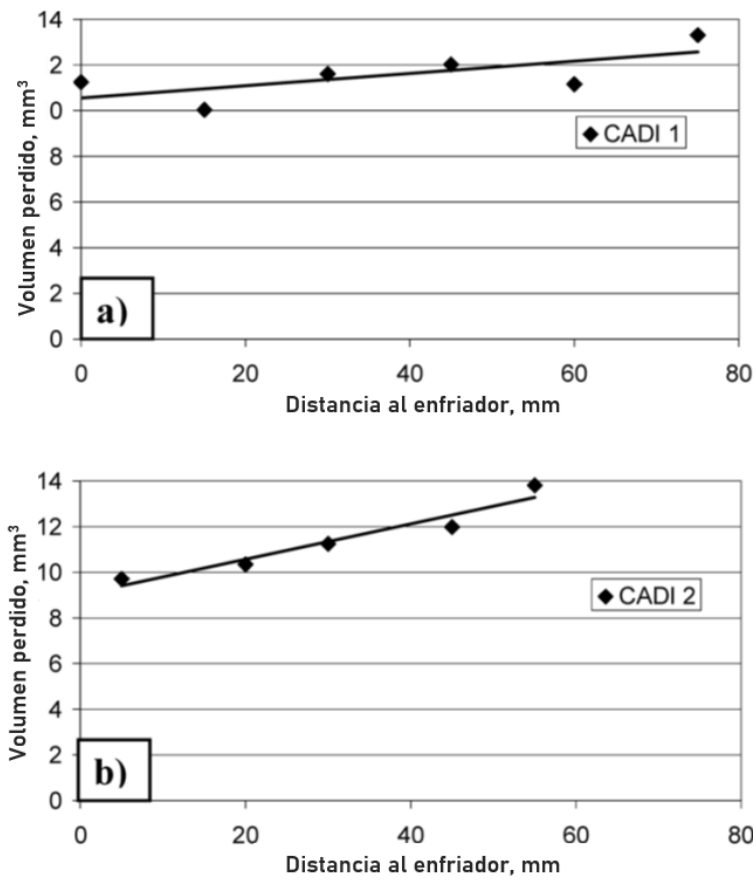


Figura 21. Valores de pérdida de volumen en función de la distancia al enfriador para CADI 1 y 2. (se utilizó ADI $T_a = 320^\circ\text{C}$ como material de referencia).

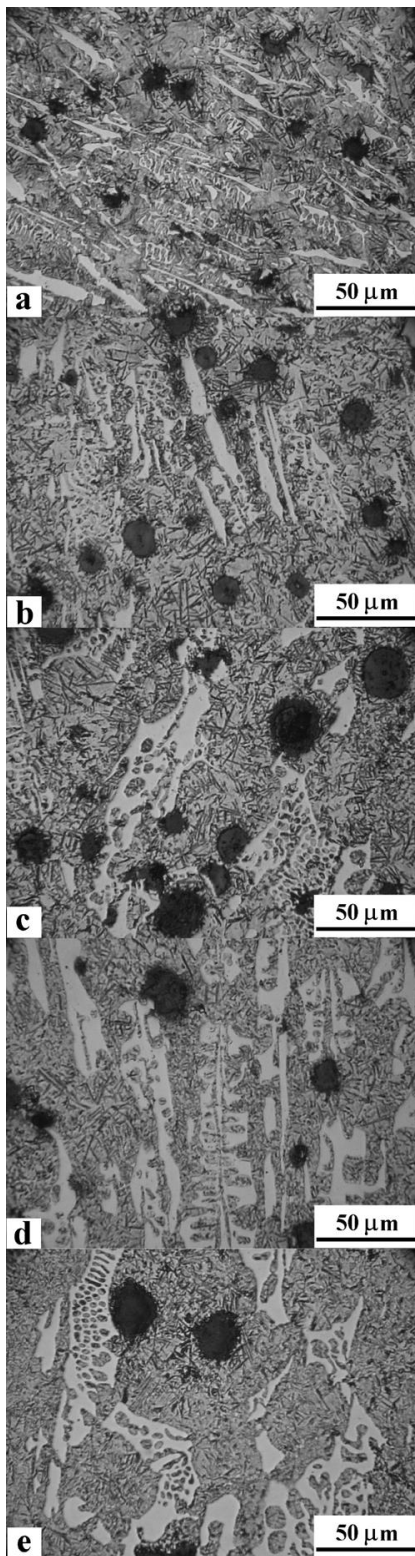


Figura 22. Microestructuras de CADI 1 ($T_a = 320^\circ\text{C}$) a diferentes distancias del enfriador (mm): (a) 0, (b) 10, (c) 20, (d) 40 y (e) 60.

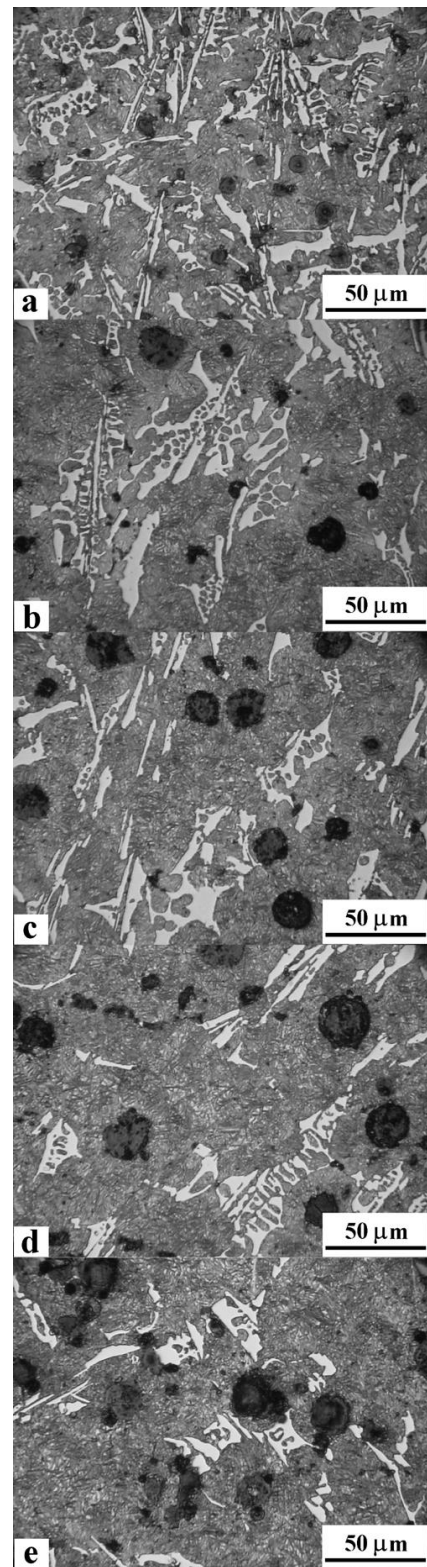


Figura 23. Microestructuras de CADI 2 ($T_a = 320^\circ\text{C}$) a diferentes distancias del enfriador (mm): (a) 0, (b) 10, (c) 20, (d) 40 y (e) 60.

El ADI se usa ampliamente en diferentes campos, sin embargo, la resistencia al desgaste bajo cargas elevadas no es ideal, para mejorar esta propiedad. Penghui et al. (2020) (2) abordaron un proceso innovador de tratamiento térmico con el objetivo de refinar los carburos eutécticos y matriz de ausferrita. El procedimiento que se llevó a cabo fue la producción de hierro en un horno de inducción de 50 kg, con 0.15% de Al, fundido entre 1480 – 1500°C, utilizando inoculante y nodulizantes convencionales, se vertió en moldes de arena en forma de bloques Y (ASTM A781/A781 – M95). El procedimiento para los tratamientos térmicos se representa en la *Figura 24*, en donde se llevó a cabo un austemperizado tradicional ($T_{\gamma} = 880^{\circ}\text{C}$, $t_{\gamma} = 120$ min y $T_a = 300^{\circ}\text{C}$, $t_a = 120$ min), tratamiento de temperatura súper alta (T_{γ} S&A = 1100°C , t_{γ} S&A = 10 min, $T_{\gamma}/t_{\gamma} = 880^{\circ}\text{C}/120$ min, temple en agua y $T_a/t_a = 300^{\circ}\text{C}/120$ min) denominado S&A, el cual comprende un pretratamiento a temperatura súper alta y un tratamiento austemperado (T_{γ} S&A/ t_{γ} S&A = $1100^{\circ}\text{C}/10$ min, $T_{\gamma}/t_{\gamma} = 720, 760, 800, 840$ y $880^{\circ}\text{C}/120$ min y $T_a/t_a = 300^{\circ}\text{C}/120$ min), el baño de sal consistió en 50% KNO_3 – 50% NaNO_3 . Las muestras se analizaron bajo microscopía óptica, SEM, TEM, XRD, EDX, EPMA y WDS. Se aplicaron ensayos de dureza HR 150A, impacto (ASTM E384 – 1999) y desgaste. La composición química obtenida fue de 3.72 %C, 2.77 %Si, 0.51 %Mn y 0,99 %Cr en peso. En la *Figura 25* se muestran que en el austemperizado normal se encuentra una matriz de ausferrita de aproximadamente 5 a $8\mu\text{m}$, nódulos de grafito con 92.3% de nodularidad y 13.4% de carburos eutécticos; para la prueba de contraste fue de 2% de carburos eutécticos; y para el tratamiento S&A fue de 2.1% de carburos eutécticos, ausferrita de 1 - $3\mu\text{m}$, ferrita bainítica de aproximadamente 50 nm, y la presencia de partículas precipitadas (Fe_3C) de 200 nm de diámetro. Los resultados en la *Figura 26* indican que la dureza del CADI convencional fue similar al tratamiento S&A, pero fue menor en la prueba de dureza. La resistencia de CADI ordinario fue de 9.2 J/cm^2 mientras S&A de 19.5 J/cm^2 (incremento del 120%). Finalmente, en la prueba de desgaste mostrada en la *Figura 27* se demostró que el tratamiento S&A exhibe una excelente resistencia al desgaste bajo cargas elevadas (300 – 600 N), mejor que el CADI convencional.

El tratamiento S&A mejoró la resistencia al desgaste bajo cargas altas sin sacrificar la dureza y la resistencia al impacto.

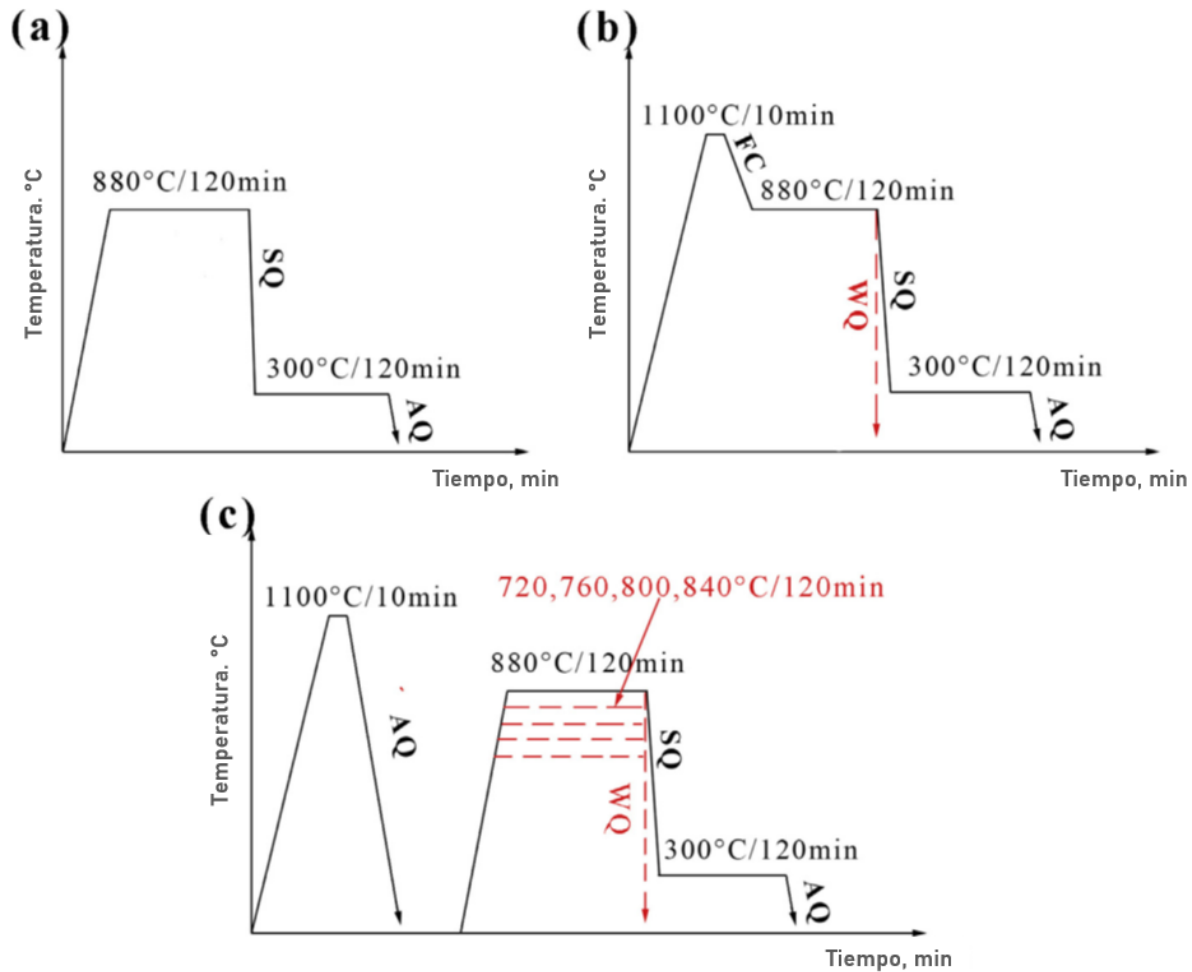


Figura 24. Representación esquemática de los tratamientos térmicos aplicados: (a) austemperizado ordinario, b) prueba de contraste y (c) tratamiento S&A. Nomenclatura: SQ: temple en sales, AQ: temple en aire, FC: enfriamiento en el horno, WQ: temple en agua.

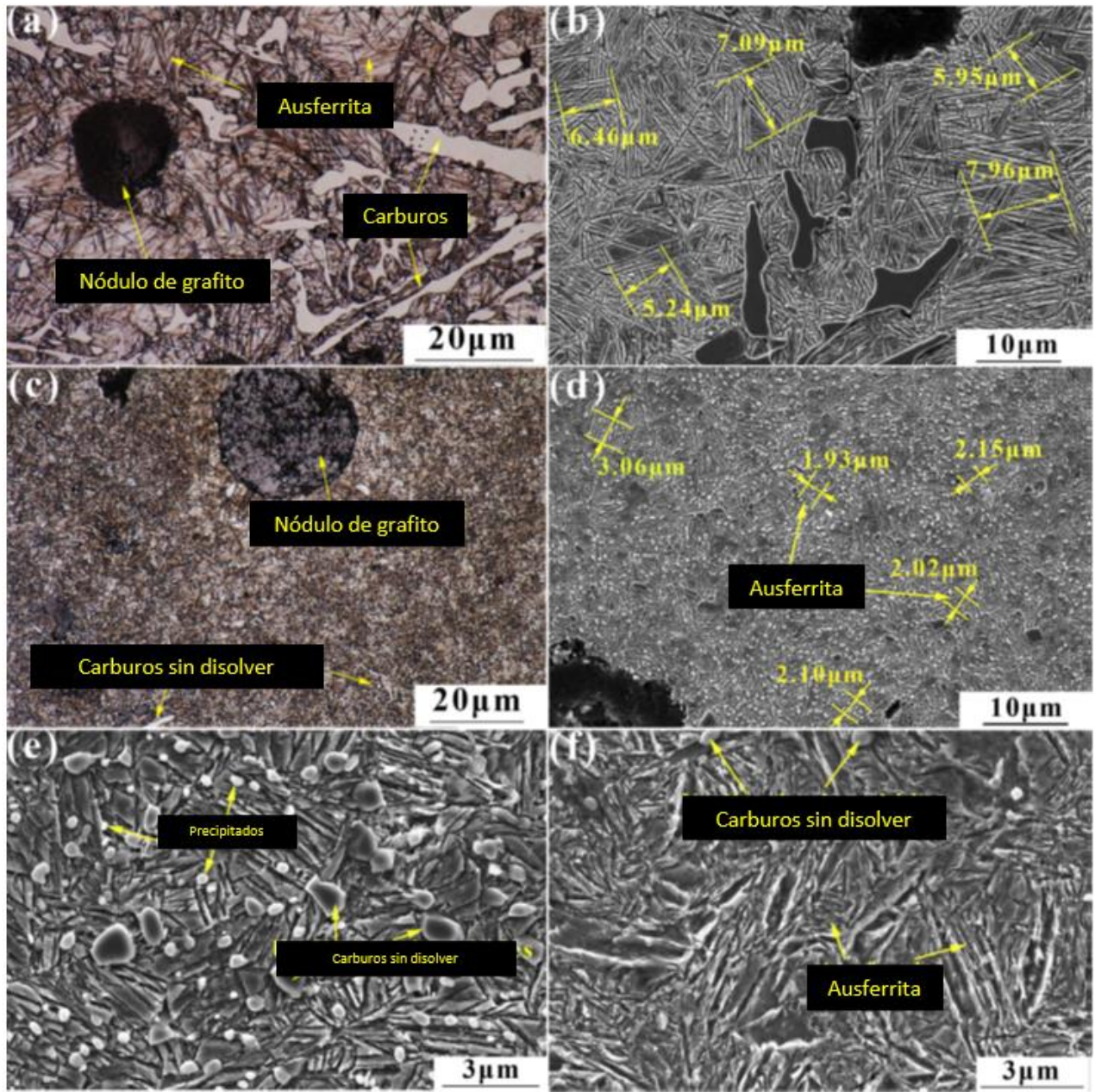


Figura 25. Microestructura de distintos CADI: (a) microscopía óptica de CADI después del tratamiento ordinario de austemperización, (b) imagen SEM de CADI después del tratamiento ordinario de austemperización, (c) microscopía óptica de CADI después del tratamiento S&A, (d) imagen SEM de CADI después del tratamiento S&A, (e) imagen SEM a gran aumento de CADI después del tratamiento S&A, (f) imagen SEM a gran aumento de CADI después de la prueba de contraste. Todas las muestras fueron atacadas con Nital al 4%.

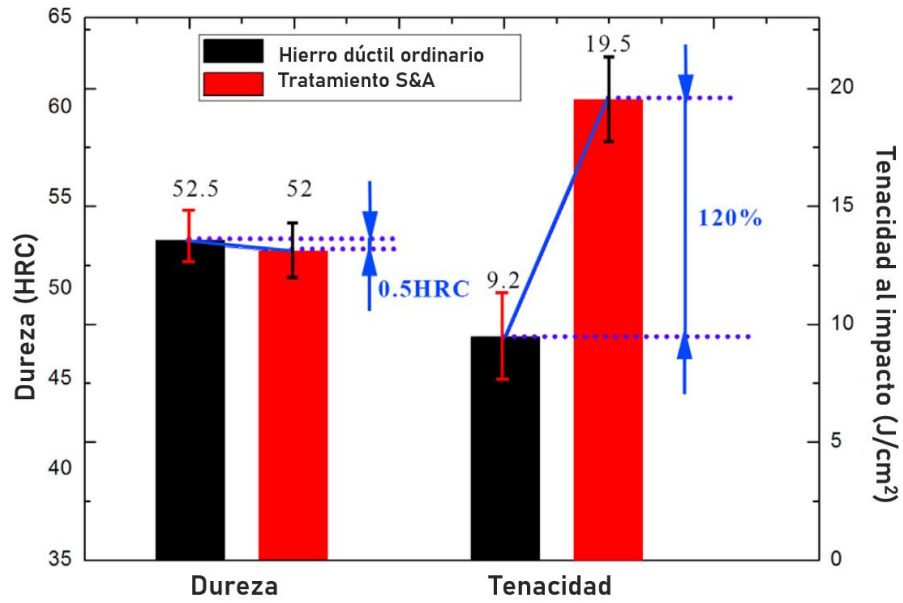


Figura 26. Comparación de distintas propiedades mecánicas del tratamiento S&A con el austemperizado ordinario.

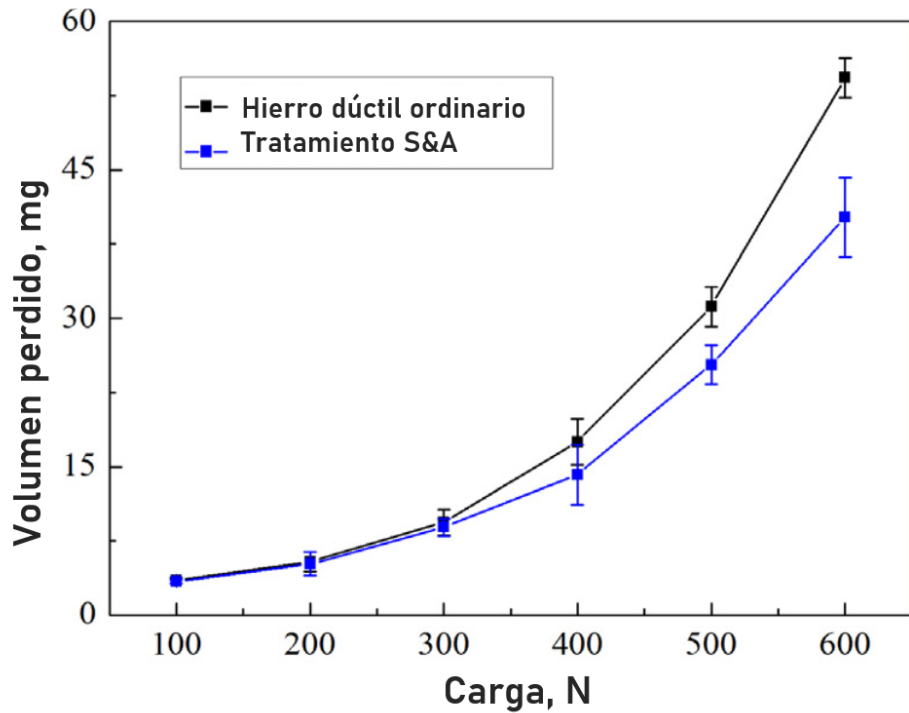


Figura 27. Comparación de pérdida por desgaste a diferentes cargas del tratamiento S&A con el austemperizado ordinario.

Para obtener una mejora en las propiedades de desgaste e impacto, Aly et al. (2020) (3) realizaron un trabajo con el propósito de mejorar dichas propiedades mecánicas mediante la producción de carburos más finos y globulares. El procedimiento experimental fue la producción de hierro en un horno de inducción, las muestras se denominaron CDI (Carbídico Ductile Iron) numeradas del 1 al 4 con diferente composición química y adiciones de Nb, se vertieron en un molde estático y en uno dinámico. Posteriormente se austenizaron a 900°C durante 1 h y se austemperizaron a 275 y 375°C durante 1.5 h, las muestras se examinaron bajo microscopía óptica, SEM (Microscopía electrónica de barrido) y XRD (difracción de rayos X). Se aplicaron los ensayos de impacto, dureza y resistencia al desgaste. En la microestructura se encontró carburos de menor tamaño en la solidificación dinámica que en la estática, los carburos presentes fueron de Cr y de Nb (aleados), también el volumen de estos fue mayor en la solidificación dinámica que en la estática. La adición de Cr y Nb aumentó la dureza como se ilustra en la *Figura 28*, de manera contraria en la *Figura 29* la resistencia al impacto se incrementó con 1 %Cr – 1 %Nb a 275°C. Mientras que la resistencia al desgaste fue mayor, ver *Figura 30*, con 1.5%Cr – 1 %Nb a 275°C, la microestructura de este se muestra en la *Figura 31*. Se demostró que el efecto del Nb aumenta la resistencia al desgaste, aunque el Cr disminuyó la resistencia al impacto y se obtuvo que los carburos finos se producen debido a la solidificación dinámica.

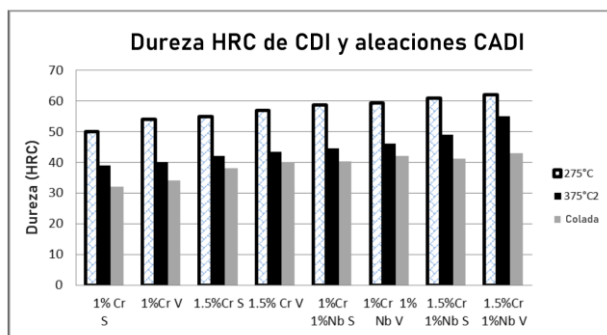


Figura 28. Dureza HRC de CDI y CADI estáticos y dinámicos.

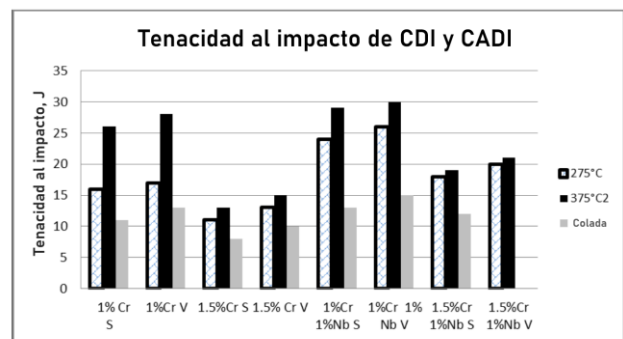


Figura 29. Resistencia al impacto de CADI a 275 °C y 375 °C de T_a.

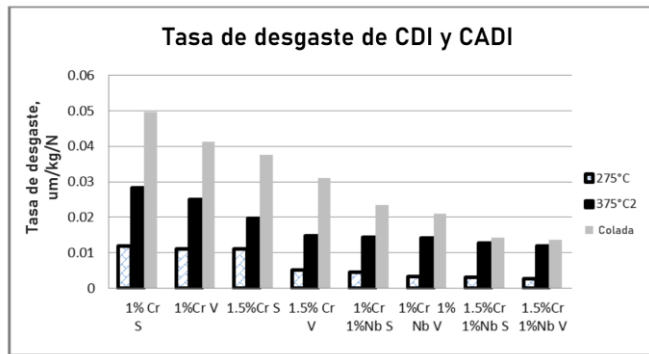


Figura 30. Tasa de desgaste del CADI a 275°C y 375°C de T_a .

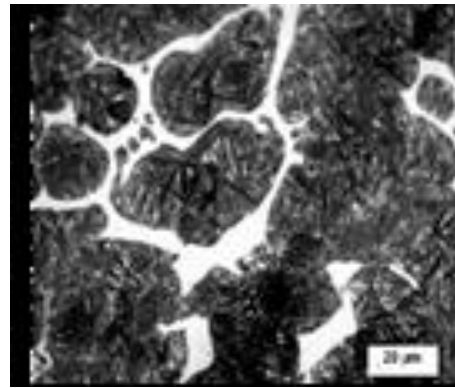
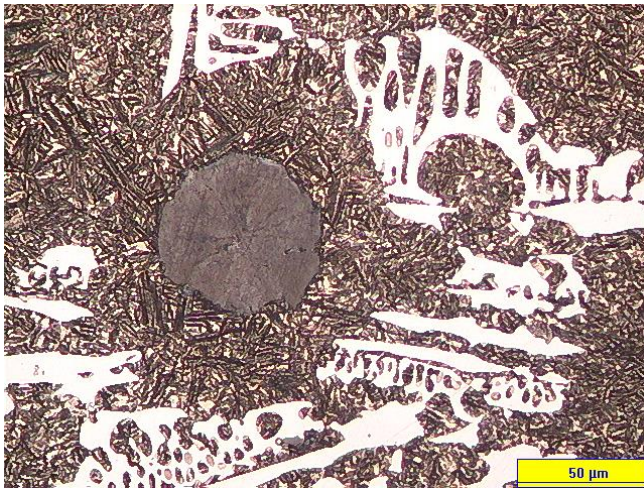
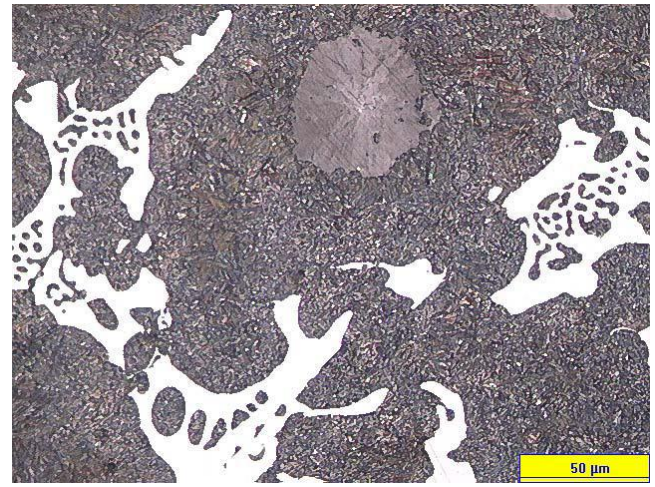


Figura 31. Microestructura de CADI austemperado a 275°C con 1.5 %Cr y 1 %Nb con solidificación dinámica.

La fundición dúctil austemperizada con carburos (CADI) es una familia de fundiciones dúctiles, con cantidades de carburos que se austemperizan con el fin de mostrar una resistencia adecuada y una excelente resistencia al desgaste, según Hayrynen et al. (2003) (4), la resistencia a la abrasión de este nuevo material es mejor que la del ADI, compitiendo con hierros resistentes a la abrasión con alto contenido de Cr, pero con mayor resistencia. Para su trabajo, se produjeron CADI con Mo y Cr (0.5 y 1%). El proceso de tratamiento térmico fue austenización a 899°C y austemperizado a 371, 316 y 260°C. Se realizaron pruebas de abrasión bajo las normas ASTM G132-96 y ASTM G105-89, de alta y baja tensión respectivamente. La microestructura de los CADI se puede ver en la *Figura 32*, se nota una matriz de ausferrita con carburos (color blanco) y nódulos de grafito. En la *Figura 33* y *34*, la prueba de resistencia a la abrasión el hierro con mayor contenido de Cr tiende a presentar menor pérdida de volumen, con niveles de dureza HRC 50, el CADI puede competir contra otros hierros resistentes a la abrasión como se muestra en la *Figura 35*, pero no con todos en un ambiente de alta tensión, aunque tiene la ventaja de ofrecer resistencia. El nivel de resistencia a la abrasión aumenta con el contenido de carburo. Durante las pruebas en alta tensión puede ocurrir la transformación de austenita a martensita en la superficie de desgaste debido a la transformación inducida por esfuerzo.



a)



b)

Figura 32. CADI austemperado a: (a) 371°C (b) 260°C. Las muestras fueron atacadas con Nital al 8%.

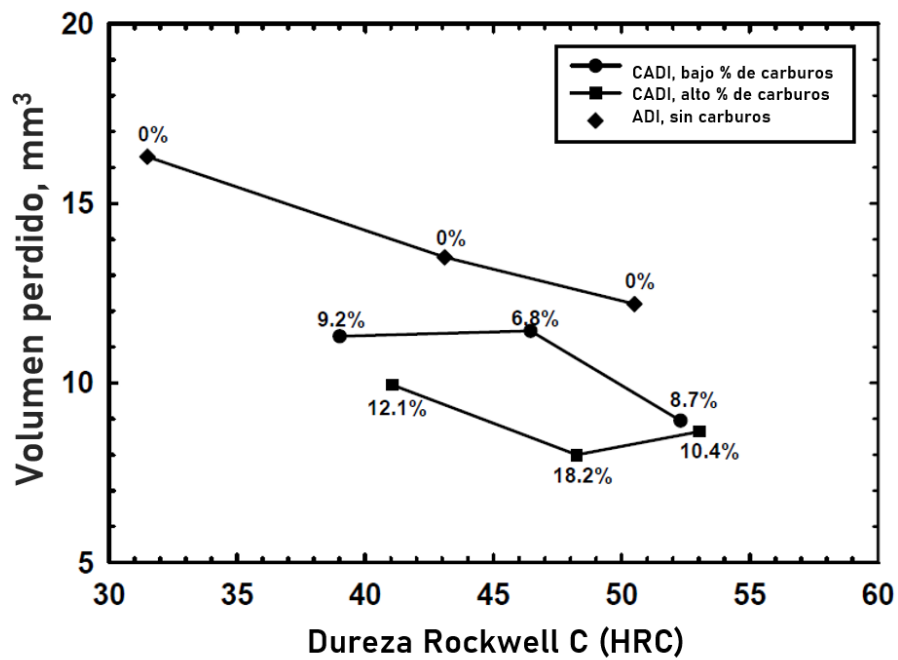


Figura 33. Resultados de la prueba de abrasión para ADI y ADI con carburos. Los niveles de carburo se indican junto a cada punto. Los puntos representan un promedio de 2 especímenes de prueba.

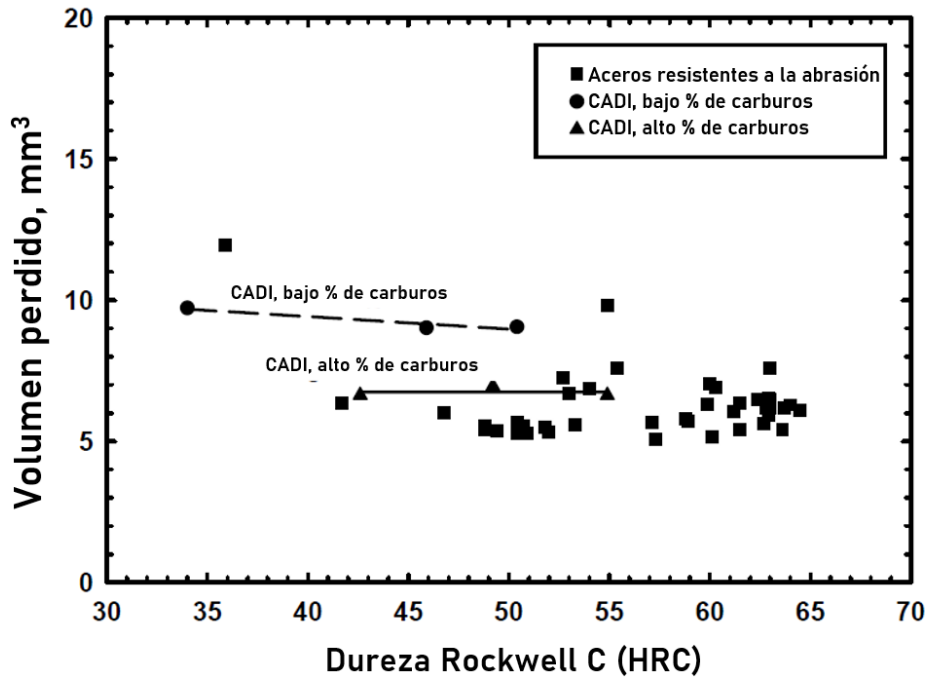


Figura 34. Resultados de la prueba de abrasión para CADI de alto y bajo contenido de carburo junto con los resultados de los hierros resistentes a la abrasión de alto cromo.

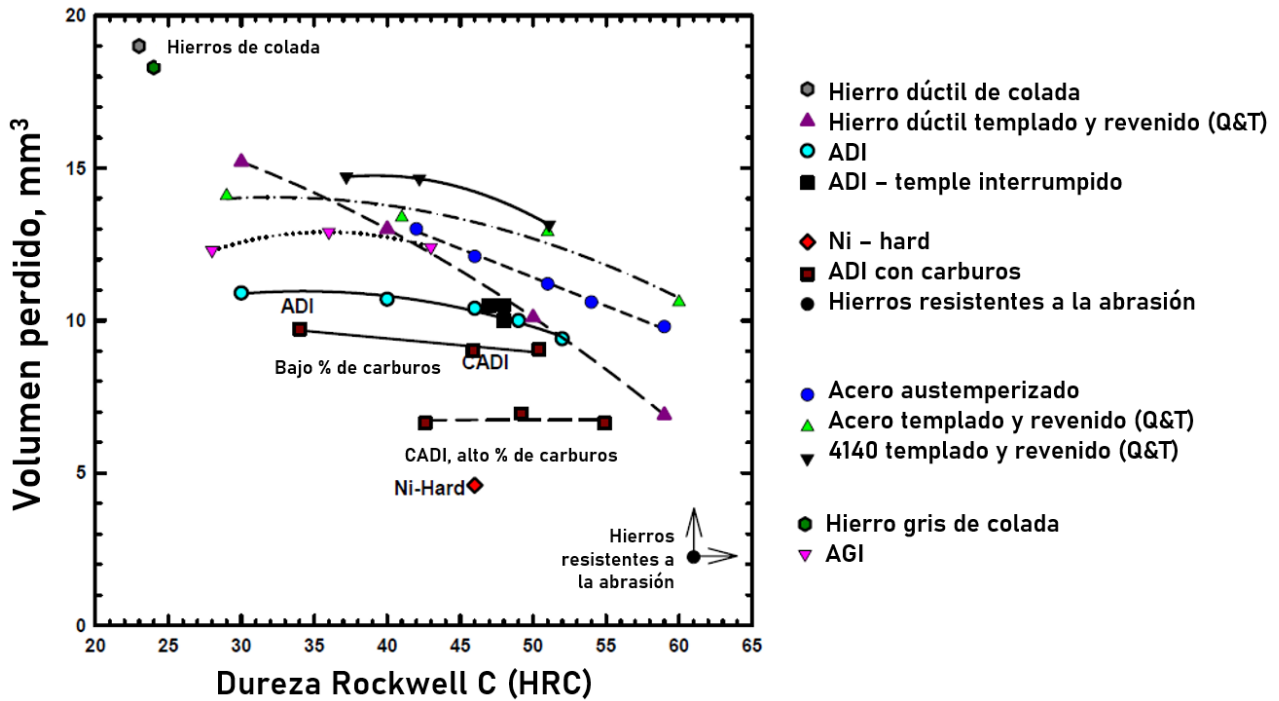


Figura 35. Resultados de la prueba de abrasión para varios hierros fundidos y aceros competitivos. El punto con flechas representa una prueba para un hierro con 27% de Cr.

La fabricación de hierros CADI consta de dos etapas, en la primera se requiere producir un hierro nodular con carburos finos, estables y distribuidos de forma homogénea en la matriz, la segunda etapa consta del tratamiento térmico de austemperizado aplicado a la materia prima obtenida en la primera etapa. Dos formas comunes de fabricar un hierro nodular con carburos es sobre el control de la velocidad de enfriamiento y la adición de elementos aleantes considerados como blanqueadores; en la primera forma los carburos se forman en las zonas más delgadas de la pieza debida a grandes sobreenfriamientos, para la segunda forma se añaden elementos como V, Cr, Mn y Mo, sin embargo la desventaja del uso de estos elementos blanqueadores radica en que pueden tener como consecuencia una distribución no homogénea de los carburos en la matriz debido a la segregación durante la solidificación. Para conocer mejor el efecto que conlleva el uso de elementos blanqueadores como Cr y Mo, García et al. (20) manifiestan en su trabajo el uso de estos dos elementos para conocer la cantidad de carburos obtenidos por estos elementos blanqueadores, así como su distribución. La metodología empleada en la fabricación del hierro nodular con carburos fue la siguiente: en un horno de inducción de capacidad de 100 kg se fabricaron el hierro nodular con Cr y el hierro nodular con Cr/Mo, utilizando como carga chatarra de acero bajo carbono y chatarra de hierro colado, el ajuste de la composición química se realizó con FeSi70, FeMn60, como agente recarburante grafito, Cr puro y FeMo70. Obteniendo piezas en bloque "Y" en moldes de arena en verde. La pieza final se dividió en tres distintas zonas denominadas zona superior, media en inferior, a su vez, en cada zona se examinaron los segmentos del centro, intermedio y pared, con el objetivo de evaluar la fracción de carburos promedio. El primer hierro nodular presentó un $C_{eq} = 4.50$ con una relación Cr/Mo de 2/0, el segundo presentó un $C_{eq} = 4.35$ con la relación Cr/Mo = 1/0.5. En la evaluación microestructural se observaron carburos ledeburíticos y continuos, como se muestra en la *Figura 36*. El análisis puntual EDS muestra que los carburos localizados en las últimas zonas en solidificar, media y superior no presentar altas concentraciones de los elementos blanqueadores Cr y Mo, por lo cual no hay

macrosegregación. Por otro lado, en la *Tabla 9* se muestra la evaluación de la nodularidad de ambos hierros, presentando gran similitud en los valores de nodularidad, tamaño y conteo. Mientras que la evaluación de fracción de carburos indica que existen mayores porcentajes de contenido de carburos con el uso único de Cr que con el uso combinado de Cr/Mo, ya que se presentan menos carburos y su distribución es heterogénea.

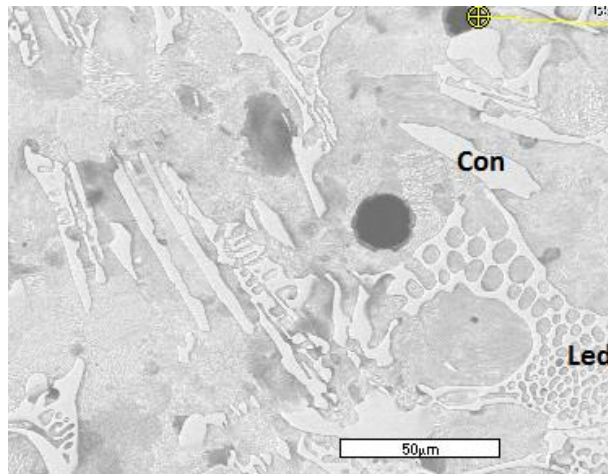


Figura 36. Carburos identificados en los hierros nodulares bajo estudio (a) Ledeburíticos y (b) Continuos.

Tabla 9. Valores obtenidos de nodularidad y carburos en la caracterización microestructural para los dos hierros nodulares experimentales.

Hierro con relación Cr/Mo	Nodularidad (%)	Tamaño de nódulos	Conteo (nódulos/mm ²)
1/0.5	95 - 100	7 - 7.5	200 - 250
2/0	90 - 95	7 a 8	200 - 250

La estabilidad de los carburos durante la etapa de austenización es importante en la fabricación de un CADI, siendo este una variante de ADI, en donde la diferencia radica en el contenido de carburos presentes en la matriz de ausferrita. Para producir carburos en un hierro nodular existen dos métodos, el primero consiste en producir altas tasas de enfriamiento con la ayuda de enfriadores, el segundo método consiste en adicionar al hierro fundido elementos blanqueadores como el

Cr, el cual reduce el intervalo de solidificación de la temperatura eutéctica en los diagramas estable y metaestable. Aranda et al. (21) documentan un modesto estudio de la estabilidad de los carburos en la fabricación de un hierro nodular con carburos no aleados y aleados con Cr, con altas velocidades de enfriamiento. Para ello, el hierro nodular aleado y no aleado se fabricaron en un horno de inducción de capacidad de 100 kg, utilizando como carga chatarra de acero y de fundiciones, utilizando como nodulizante FeSiMg y como inoculante FeSi. Para el caso del hierro aleado se adicionó Cr puro. Se colaron en un molde de arena, para el hierro no aleado se realizó un arreglo con enfriadores, mientras que para el hierro aleado se fabricó una pieza bloque "Y". La caracterización microestructural se evaluó de acuerdo a la norma ASTM A247, se realizó antes de la austenización, los resultados de la evaluación se muestran en la *Tabla 10*, en donde de acuerdo a los análisis SEM-EDS y a la literatura los carburos presentes en la microestructura del hierro aleado eran carburos intercelulares Cr_3C . Las microestructuras de ambos hierros se ilustran en la *Figuras 37 y 38*, que corresponden al hierro aleado y no aleado en condiciones de colada, respectivamente. Posteriormente ambas aleaciones se austenizaron a tres diferentes temperaturas: $T_\gamma 1 = 875^\circ C$, $T_\gamma 2 = 900^\circ C$ y $T_\gamma 3 = 950^\circ C$ durante 60, 90, 120 y 180 min. La evaluación de los porcentajes de carburos iniciales, finales y disueltos se muestran en las *Tablas 11 y 12*, en el caso del hierro no aleado se observa que conforme aumenta la T_γ , la fracción disuelta de carburos también incrementa, de manera similar, al aumentar el tiempo de austenización (t_γ) la fracción de carburos disuelta incrementa. Para el caso del hierro nodular aleado al incrementar la temperatura de austenización la fracción disuelta de carburos incrementa, para el caso de t_γ sólo en $T_\gamma = 875^\circ C$ aumentar el tiempo incrementa CD%, pero para las temperaturas de 900 y 950°C la fracción CD% disminuye al aumentar el tiempo. Esto muestra que los carburos aleados tienen mayor estabilidad que los carburos no aleados, incluso a altas temperaturas y tiempos largos los carburos ledeburíticos se disuelven por completo. Se concluye que los carburos aleados son menos sensibles y más estables que los ledeburíticos a la temperatura y tiempo de austenización.

Tabla 10. Valores obtenidos de nodularidad y carburos en la caracterización microestructural.

Hierro	Nodularidad (%)	Tamaño de nódulos	Conteo (nódulos/mm ²)	Microestructura de colada	Fracción de carburos precipitados (%)
Aleado (Cr)	85-90	6	100	Perlita + carburos de cromo	25-40
No aleado	90	6 a 7	100-120	Perlita + carburos ledeburíticos	3.5-7.03

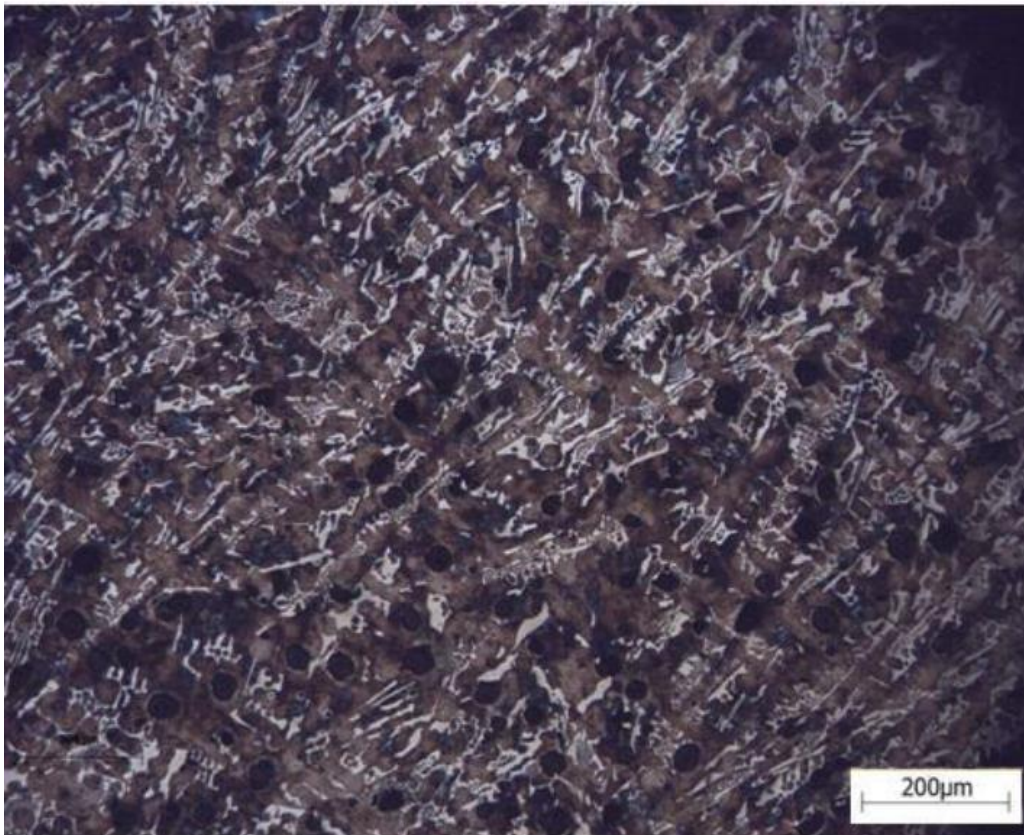


Figura 37. Microestructura del hierro nodular aleado con Cr. Las zonas blancas ilustran a los carburos aleados.

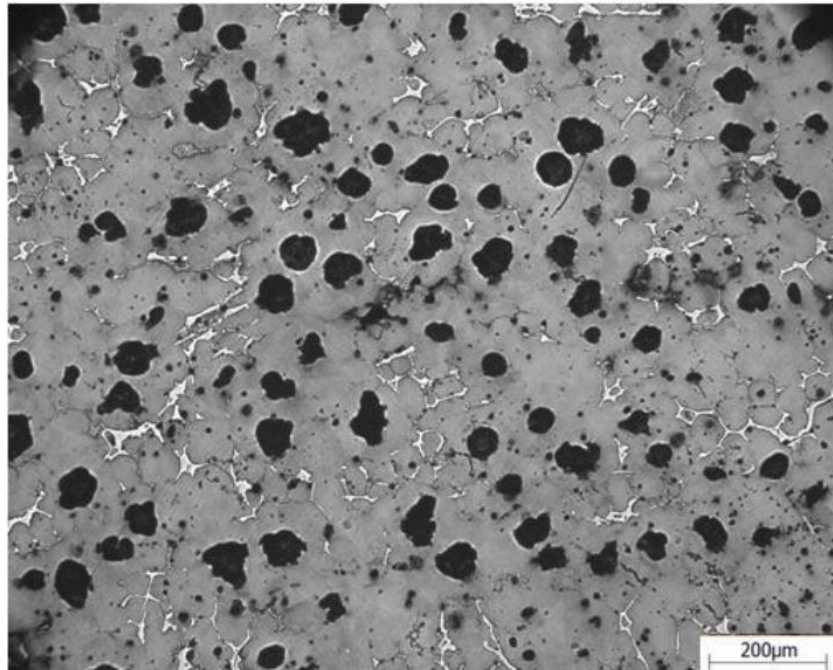


Figura 38. Microestructura del hierro nodular no aleado. Las zonas blancas ilustran a los carburos ledeburíticos.

Tabla 11. Carburos disueltos (CD%) en un hierro nodular no aleado.

Tiempo de austenización (min)	Austenización a 875°C			Austenización a 900°C			Austenización a 950°C		
	% carburos iniciales (IC%)	% carburos finales (EC%)	% carburos disueltos (CD%)	% carburos iniciales (IC%)	% carburos finales (EC%)	% carburos disueltos (CD%)	% carburos iniciales (IC%)	% carburos finales (EC%)	% carburos disueltos (CD%)
60	3.5	2.32	33.31	3.82	1.67	56.3	5.03	1.4	72.25
90	3.58	2.18	39	4.02	1.69	59.3	5.04	0.81	83.96
120	3.6	1.43	60.2	4.26	1.14	73.32	5.18	0	100
180	3.77	1.3	65.67	4.52	0.97	78.6	5.48	0	100

Tabla 12. Carburos disueltos (CD%) en un hierro nodular aleado con Cr.

Tiempo de austenización (min)	Austenización a 875°C			Austenización a 900°C			Austenización a 950°C		
	% carburos iniciales (IC%)	% carburos finales (EC%)	% carburos disueltos (CD%)	% carburos iniciales (IC%)	% carburos finales (EC%)	% carburos disueltos (CD%)	% carburos iniciales (IC%)	% carburos finales (EC%)	% carburos disueltos (CD%)
60	25	18.72	25.12	24.3	13.34	45.1	33.12	13.78	58.8
90	27.01	19.41	28.1	26.5	14.68	44.6	36.53	14.94	59
120	26.12	18.28	30.01	28.87	16.14	44.1	39.51	15.83	59.95
180	23.2	16.08	30.68	24.9	16.14	33.97	39.82	20.07	47.6

Dentro de la familia de hierros fundidos dúctiles recientemente se ha introducido al mercado el hierro dúctil austemperado con carburos, producido primero un hierro nodular con carburos y posteriormente austemperizarlo para obtener una elevada resistencia al desgaste. Yun – Cheng et al. (2012) (26) analizaron el efecto de la velocidad de enfriamiento desde la temperatura de homogeneización hasta el isotérmico, a través de cuatro muestras fabricadas en un horno de inducción de 30 kg, utilizando chatarra de acero y ferroaleaciones, fundida hasta los 1550°C, y colado en bloques Y de 50 mm, se austenizaron a 900°C durante 60 minutos en un horno tubular y se transfirieron a un baño de sal (45% NaNO₂ + 55% KNO₃) más la adición de un contenido de 0, 1, 2 y 3% agua, para conocer las diferentes velocidades de enfriamiento con un termopar tipo K; el austemperizado se llevó a cabo a 260°C durante 90 minutos seguido de un enfriamiento en aire a temperatura ambiente. Las muestras se analizaron bajo microscopía óptica, SEM y XRD, además de la aplicación de los ensayos de impacto y dureza HR 150A. La composición química del hierro fue de 3.86 %C, 2.6 %Si, 0.68 %Mn, 0.75 %Cr, P <0.03%, S <0.04% y Mg <0.05%. En la *Figura 39* se muestra la microestructura que fue de nódulos de grafito y carburos en una matriz de ausferrita con una dureza de 936 HV, presentando un conteo de 220 nódulos/mm², 91% esferoidización y 17% de carburo. Se observó que la ferrita acicular disminuyó a medida que aumentaba el contenido de agua en el baño de sal. El contenido de austenita retenida disminuyó cuando aumentó el contenido de agua. La dureza fue directamente proporcional al contenido de agua e inversamente proporcional a la resistencia al impacto conforme a la *Tabla 13*. La presencia de martensita trasformada por velocidades de enfriamiento altas disminuyó la resistencia al impacto y aumentó la dureza.

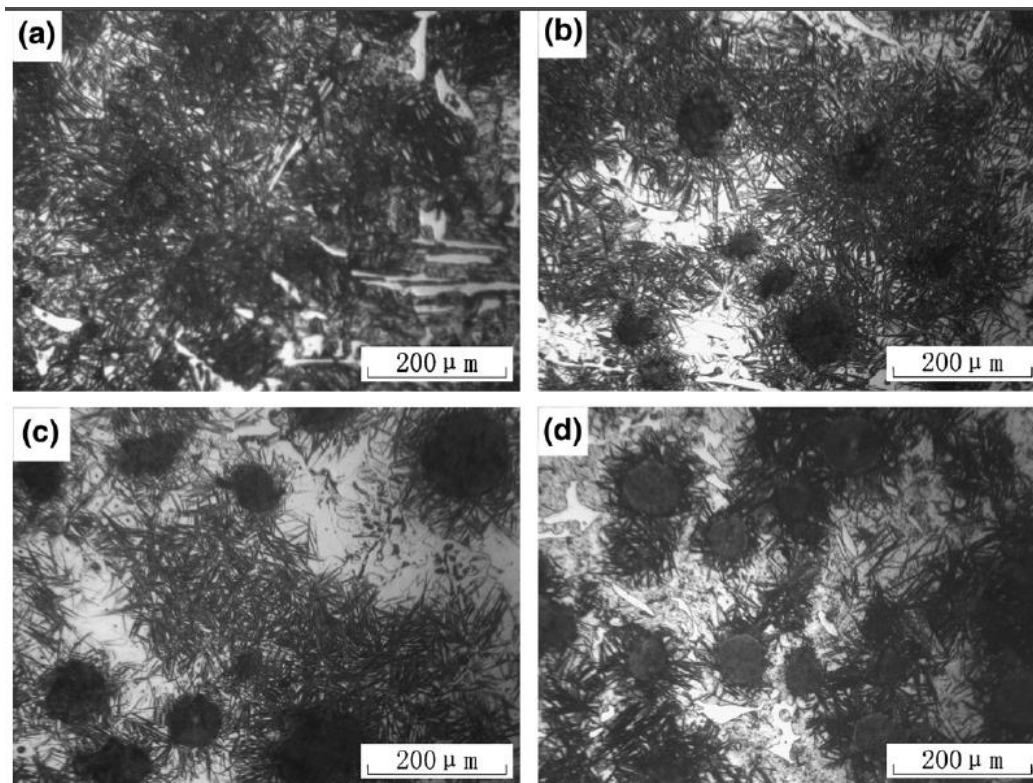


Figura 39. Microestructuras de CADI con distintos contenidos de agua (%): (a) 0, (b) 1, (c) 2 y (d) 3. A 200X.

Tabla 13. Resistencia al impacto y dureza en función del contenido de agua para las muestras de CADI.

Adición de agua (%)	HRC	Energía de impacto promedio (J)
0	56.4	14
1	58.5	12.5
2	60.1	10.5
3	61.5	10

En los trabajos reportados en la literatura reciente, Laino et al. (2008) (25) reportaron una metodología de fabricación de CADI, con el propósito de obtener una precipitación controlada de carburos en la matriz, así obtener con alta resistencia al desgaste y resistencia al impacto. Para ello se fabricaron diez muestras austenizadas 1 h a 900°C en una mufla seguida de un austemperizado en un baño de sal durante 2 h, a dos temperaturas diferentes, 280 y 360°C, y cinco

muestras de referencia, conocido como ADI, con la adición de cromo de 0 (ADI) a 2.5%. Se agregaron Cu y Ni en pequeñas cantidades para aumentar la austemperabilidad. La metodología que se utilizó para obtener una microestructura con carburos fue el uso de enfriadores de cobre a diferentes distancias y el uso de Cr como elemento estabilizador de carburos. Se realizaron ensayos de impacto bajo la norma ASTM E 23, de resistencia al desgaste por abrasión bajo la norma ASTM G 65, ensayo de dureza Brinell y micro Vickers. Los resultados obtenidos fueron una menor precipitación de carburo, menor tamaño y conteo a medida que disminuye el contenido de cromo y a una menor rapidez de enfriamiento; la dureza aumentó directamente proporcional al contenido de cromo y de carburos; la resistencia relativa al desgaste fue mayor con mayor contenido de cromo y a una temperatura de austemperizado de 360°C como se muestra en la *Tabla 14*; la densidad del material aumento conforme aumentó el contenido de cromo; los valores de pérdida de volumen fueron menores al tener mayor contenido de cromo y de carburos; la resistencia al impacto disminuyó a medida que aumentaba el contenido de Cr o de carburo, donde las aleaciones A3-280 (*Figura 40*) y A3-360 con 1.5%Cr, A2-360 con 2%Cr y A4-280 con 1%Cr (*Figura 41*) obtuvieron un buen equilibrio entre resistencia al desgaste y resistencia al impacto bajo las condiciones experimentales.

Tabla 14. Valores obtenidos de los ensayos de resistencia al desgaste e impacto para las muestras de CADI.

Muestra	% Cr	E	Vol. Perdido (mm ³)	Impacto (J)
A3-280	1.5	1.45	27.86	9.8
A3-260	1.5	1.6	33.14	12.2
A2-360	2	1.76	30.14	11.3
A4-280	1	1.23	32.71	25

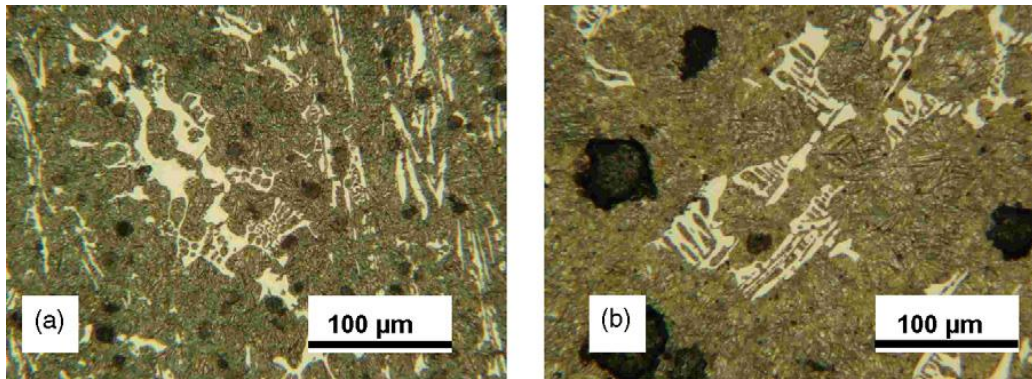


Figura 40. Microestructuras de la muestra A3-280 a: (a) 2 mm y (b) 100 mm del enfriador.

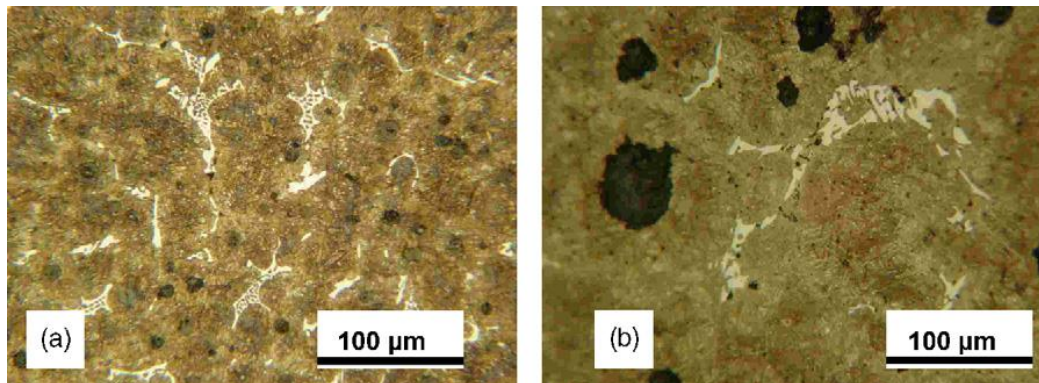


Figura 41. Microestructuras de la muestra A4-280 a: (a) 2 mm y (b) 100 mm del enfriador.

Una nueva variante de hierro dúctil denominada carbídrica (CADI) la cual consiste en carburos dentro de una matriz de ausferrita en presencia de nódulos de grafito, la cual pretende llenar el espacio entre los ADI y los hierros blancos al poseer mayor resistencia a la abrasión sin sacrificar la resistencia al impacto. En este trabajo Basso et al. (2013) (34), se centraron en el estudio del efecto del espesor de la pieza y el tipo de matriz que posee. Para ello se utilizó un horno de inducción de 100 kg de capacidad, donde se fabricaron muestras de bloque Y de 12.5, 25, 50 y 75 mm de espesor de acuerdo con la norma ASTM A395 coladas en molde de arena. La composición química fue única para todas las muestras ($C_{eq} = 4.1$), se añadieron Cu y Ni para asegurar la austemperabilidad y Cr para promover la precipitación de carburos. Las muestras se identificaron según su tipo de matriz, con los siguientes

tratamientos térmicos: *PDI* por as cast (de colada), *MDI* por temple y revenido ($T_\gamma = 910^\circ\text{C}$, $t_\gamma = 3600\text{s}$, templado en agua, $T_{rev} = 250^\circ\text{C}$ y $t_{rev} = 3600\text{s}$), *CADI-360* y *CADI-280* por austenización y austempering ($T_\gamma = 910^\circ\text{C}$, $t_\gamma = 3600\text{s}$, a $T_a = 360^\circ\text{C}$ y 280°C , $t_a = 5400\text{s}$). Los ensayos mecánicos aplicados fueron dureza Brinell (ASTM E10), prueba de impacto Charpy (ASTM E23) y resistencia al desgaste por abrasión método A (ASTM G65). En los resultados se muestran las microestructuras obtenidas en la *Figura 42*, también se encontró que a medida que aumentaba el espesor del bloque Y los carburos se agrandaban, el contenido se reducía debido a una menor rapidez de solidificación y la presencia de microsegregación, lo que promueve carburos aleados de mayor estabilidad, en este caso de Cr. En la *Figura 43* se muestra que la dureza disminuyó a medida que disminuyó el contenido de carburos. Una mayor dureza da como resultado una mayor resistencia al desgaste. La resistencia al desgaste se observa en la *Figura 45* y puede mejorarse mediante la adición de carburos, sin embargo, la presencia de carburos condujo a una gran disminución en la resistencia al impacto, como se muestra en la *Figura 44*. También se observó la transformación de austenita en martensita, debido a su transformación asistida o inducida por deformaciones en condiciones de desgaste abrasivo, en donde el porcentaje de transformación de austenita aumentó a medida que aumentaba el espesor de la pieza. Finalmente se encontró que las muestras *MDI* y *CADI-280* obtuvieron mayor dureza, mayor resistencia relativa al desgaste, la dureza de los carburos fue de casi 1100 HV, y *CADI-360* produjo los valores más altos de resistencia al impacto.

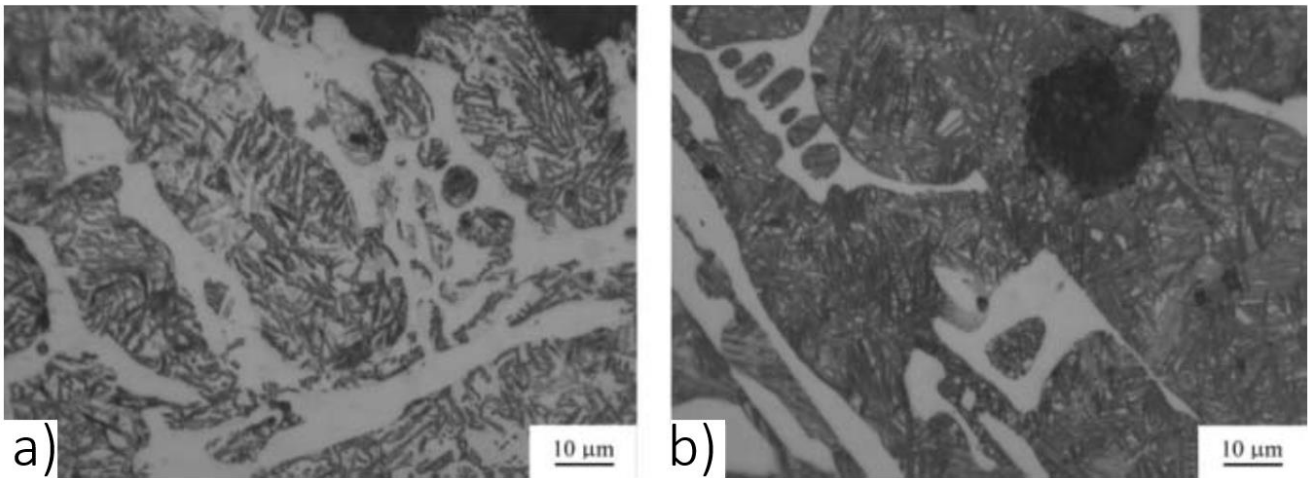


Figura 42. Microestructuras obtenidas: (a) ausferrítica CADI-280 y (b) ausferrítica CADI-360.

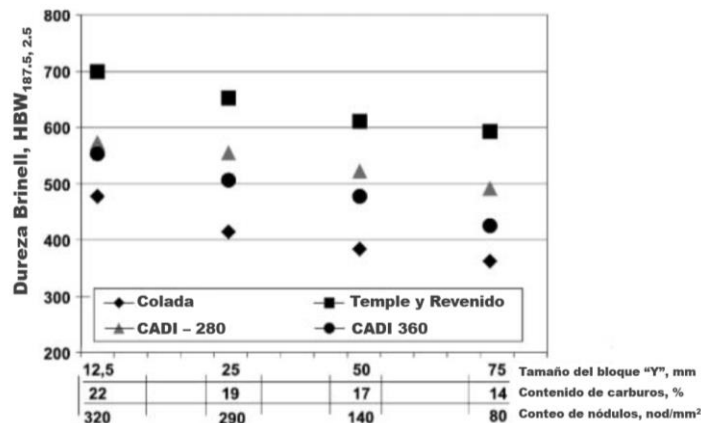


Figura 43. Valores de dureza HB a distintas distancias, contenido de carbono y nódulos de cada tratamiento térmico aplicado.

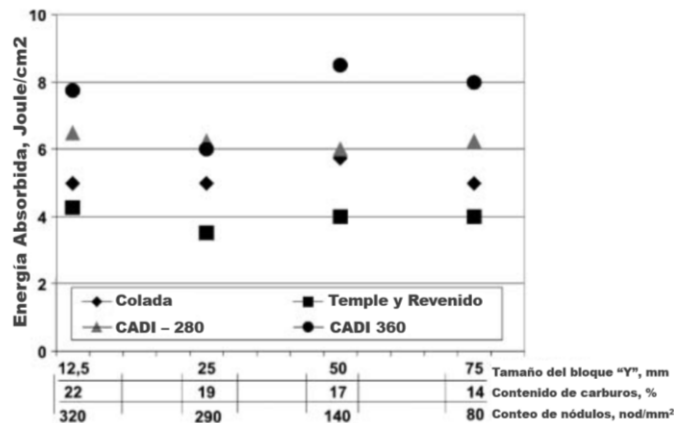


Figura 44. Valores de resistencia al impacto a distintas distancias, contenido de carbono y nódulos de cada tratamiento térmico aplicado.

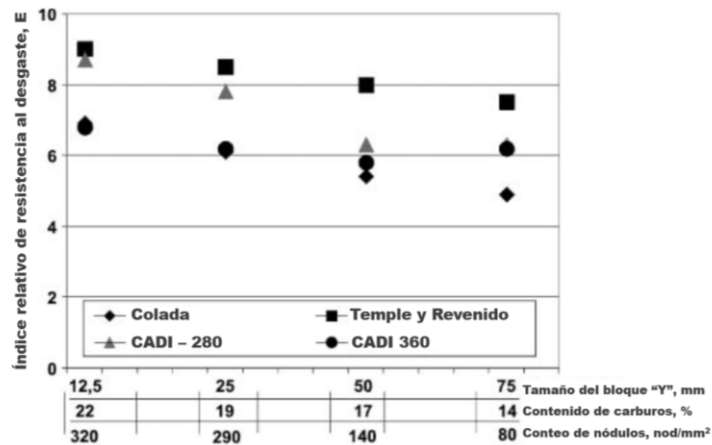


Figura 45. Resistencia al desgaste de distintas distancias, contenido de carbono y nódulos de cada tratamiento térmico aplicado.

Haigiang et al. (2018) (35) postulan reportan en su trabajo que con el aumento de la temperatura de austenización aumenta la cantidad de austenita rica en carbono, la ferrita acicular se vuelve más grande en un CADI, la resistencia a la abrasión aumenta hasta cierto punto y disminuye la posibilidad de transformación de la austenita a martensita. Esto se concluyó al realizar siete pruebas con distintas temperaturas y tiempos de austenización. El hierro se fabricó en un horno de inducción, con chatarra de arrabio y acero, adicionando ferroaleaciones de Cr, Si y Mn, se colaron en probetas de bloque Y. En la *Tabla 15* se enumeran las muestras que se austenizaron a distintos tiempos y temperaturas en una mufla y se austemperizaron en un baño de sal (50% en peso de KNO_3 + 50% en peso de $NaNO_3$) a $300\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ min}$. Se aplicó ensayo de dureza Rockwell HR 150A, prueba de impacto (ASTM E 23-16b), análisis metalográfico, resistencia a la abrasión y al desgaste. En la microestructura de la *Figura 49* se observó que a temperaturas de $850\text{ }^\circ\text{C}$ hay presencia de ferrita proeutectoide (no se austenizó completamente), mientras que en temperaturas superiores no hay presencia de esta, pero los carburos se disuelven en la matriz cuando se superan los $950\text{ }^\circ\text{C}$; en este caso, no hubo grandes efectos del tiempo de austenización. Los resultados de los ensayos indican que en $900\text{ }^\circ\text{C}$ se encuentra el pico del valor más alto de dureza como se ilustra en la *Figura 46*; conforme aumenta la temperatura de austenización

aumenta la resistencia al impacto como se observa en la *Figura 40*. La resistencia a la abrasión en la *Figura 48* indica que primero aumenta y luego disminuye gradualmente mientras que la resistencia al desgaste aumenta hasta cierto punto y luego recae cuando aumenta la temperatura de austenización. Finalmente, en la *Figura 49* se ilustra la evolución de la microestructura del hierro en cada uno de los siete procesos de austenización enunciados por la *Tabla 15*.

Tabla 15. Temperatura y tiempo del proceso de austenización.

Número		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Proceso de austenización	Temperatura (°C)	850	900	900	900	900	950	1000
	Tiempo (min)	100	50	100	150	200	100	100

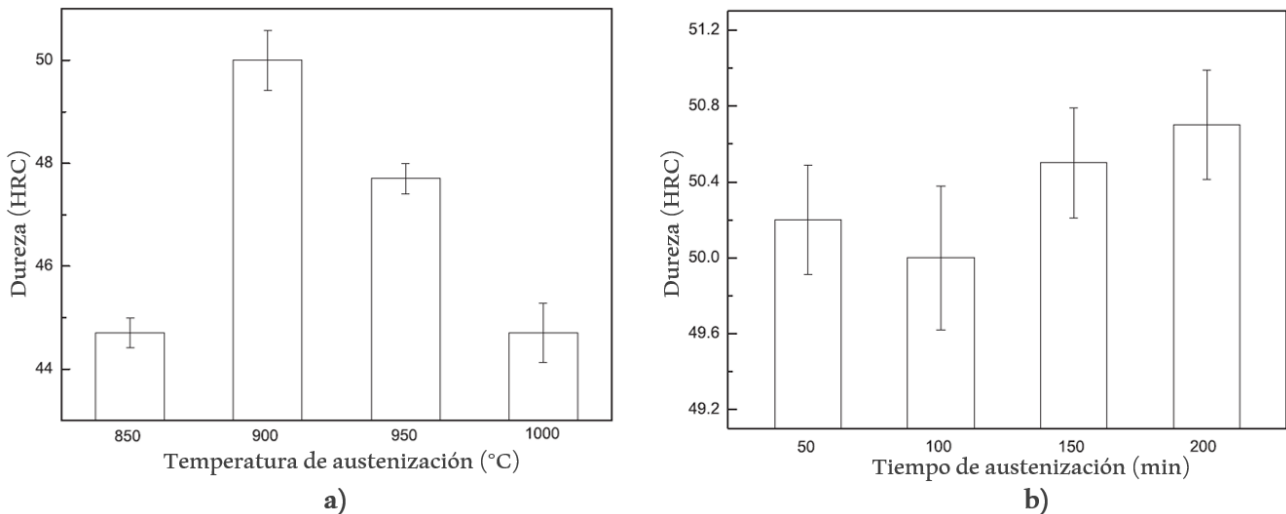
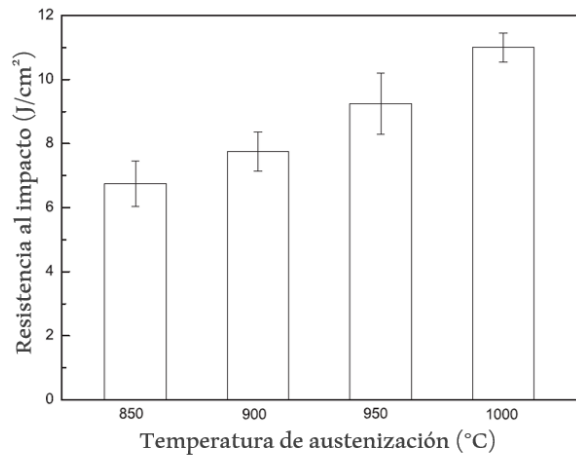
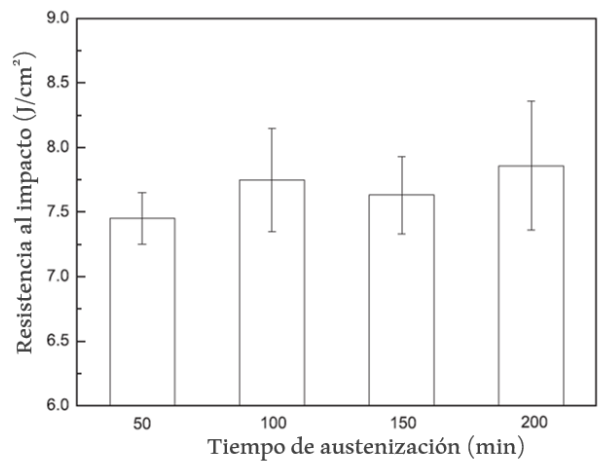


Figura 46. Influencia de la etapa de austenización en la dureza: (a) Temperatura de austenización y (b) tiempo de austenización.

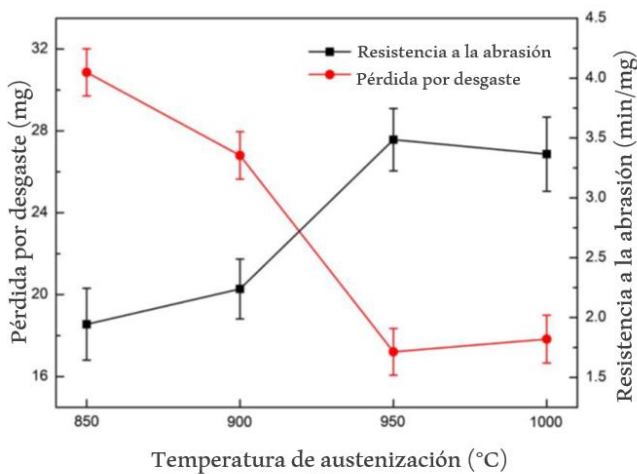


a)

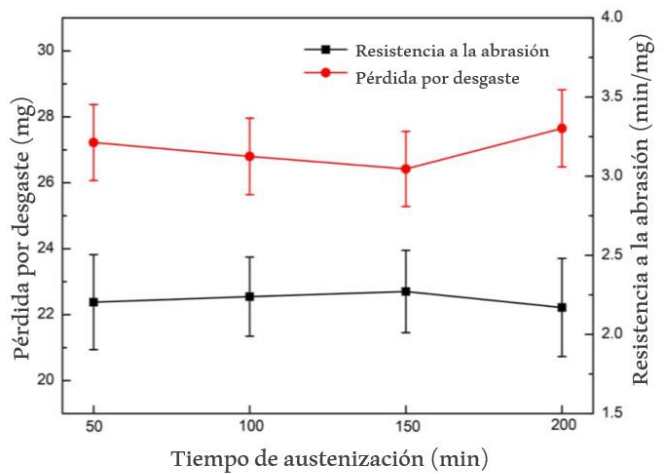


b)

Figura 47. Influencia de la etapa de austenización en la resistencia al impacto: (a) Temperatura de austenización y (b) tiempo de austenización.



(a)



(b)

Figura 48. Influencia de la etapa de austenización en la pérdida por desgaste y en la resistencia a la abrasión: (a) Temperatura de austenización y (b) tiempo de austenización.

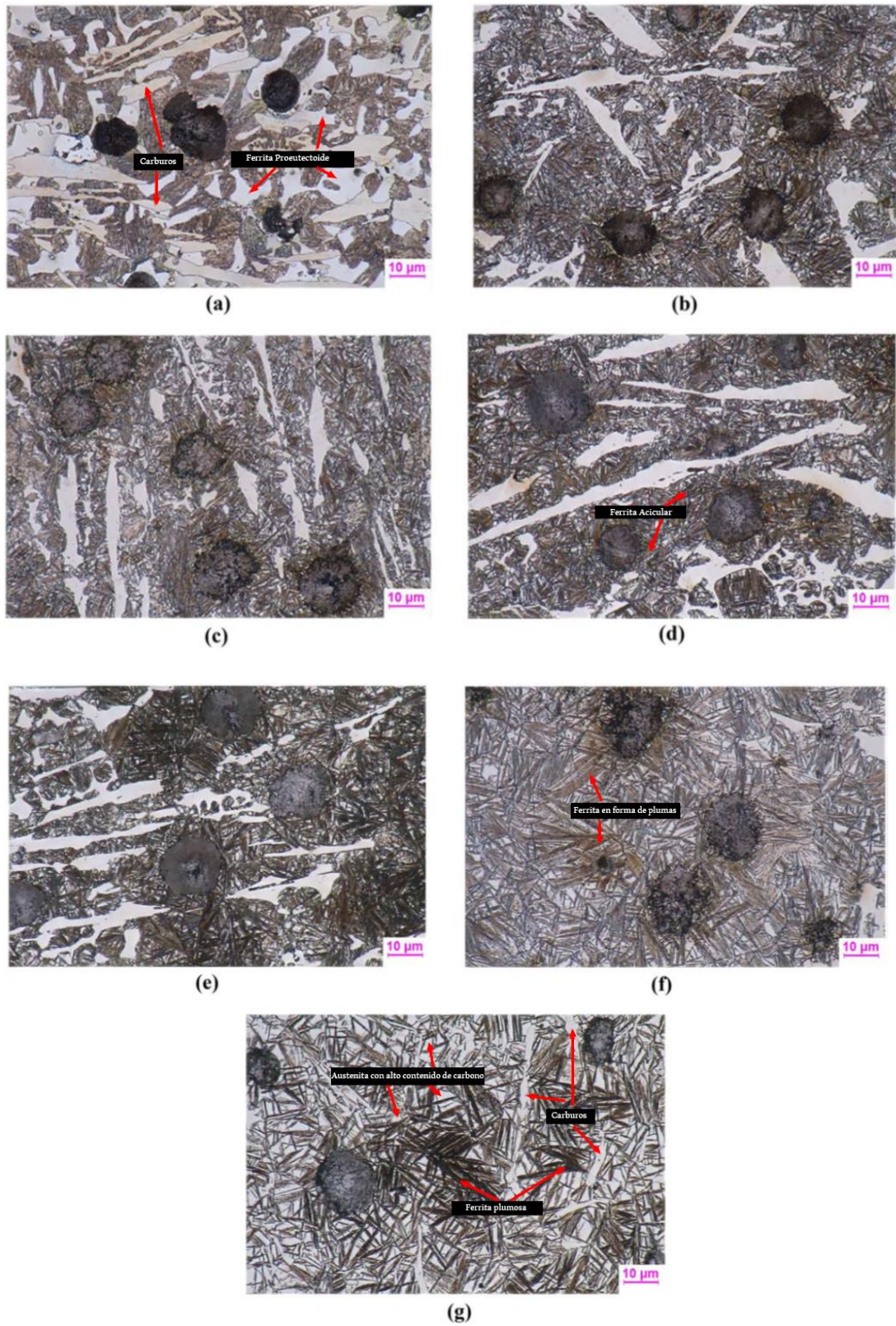


Figura 49. Microestructuras después del tratamiento térmico: (a) #1; (b) #2; (c) #3; (d) #4; (e) #5; (f) #6; (g) #7.

Yang et al. (2019) (36) mencionan que el CADI tiene algunas aplicaciones como los dientes de excavadoras, bolas de molinos de bolas, placas de mandíbulas trituradoras, palas de arado y revestimientos de los molinos de bolas. En su trabajo proponen un modelo matemático basado en la segunda ley de Fick en una dimensión para calcular el contenido de distintas fases con el fin de proporcionar una guía para la optimización del tiempo y temperatura de austenización. El CADI fabricado tenía una composición química de 3.72 %C, 2.77 %Si, 0.51 %Mn, 0.037 %P, 0.99 %Cr, 0.008 %S y 0.046%Mg, fabricado en bloques tipo Y. Posteriormente las piezas se austenizaron durante un tiempo de 7200 s a 1073, 1123, 1173, 1223 y 1273 K para estudiar el efecto de la T_γ , mientras que para el estudio de t_γ se austenizaron las piezas a 1123 K durante 60, 1800, 3600, 7200 y 10800 s, templando en salmuera al 10%. Los resultados del modelo calculados con MATLAB fueron comparados con los análisis cuantitativos de EPMA (Microanalizador de sonda electrónica). Encontraron que el proceso de disolución de los carburos fue controlado por el elemento C, los carburos no son estables a altas temperaturas de austenización, en la *Figura 50* se observa que a 1273 K los carburos se han disuelto por completo, debido a la diferencia de concentración entre los carburos y la matriz, y dependiendo de la difusión del carbono. El área de carburos se puede determinar utilizando la correlación $\ln\left(1 - \frac{S}{S_0}\right) = 14.2438 - \frac{18267.3365}{T}$ de la *Figura 51* para un tiempo de 7200 s, donde S es el área de carburos, S_0 el área final de carburos y T la temperatura de austenización. En la *Figura 52* se muestran las microestructuras a una $T_\gamma = 1123$ K a diferentes tiempos de permanencia en la austenización, nuevamente se muestra la microestructura conformada por nódulos de grafito, carburos y matriz, a tiempos muy cortos por debajo de 1800 s aún se encuentran presentes carburos pero a tiempos mayores 3600 s el área de carburos comienza a disminuir, esta relación entre el área de carburos y el tiempo está dada por la ecuación $\frac{S}{S_0} = 1 - 0.14921\sqrt{t}$ de la *Figura 53* para una temperatura de austenización de 1123 K. Finalmente se concluyó que el área de carburos disminuye con un mayor tiempo y temperatura de austenización.

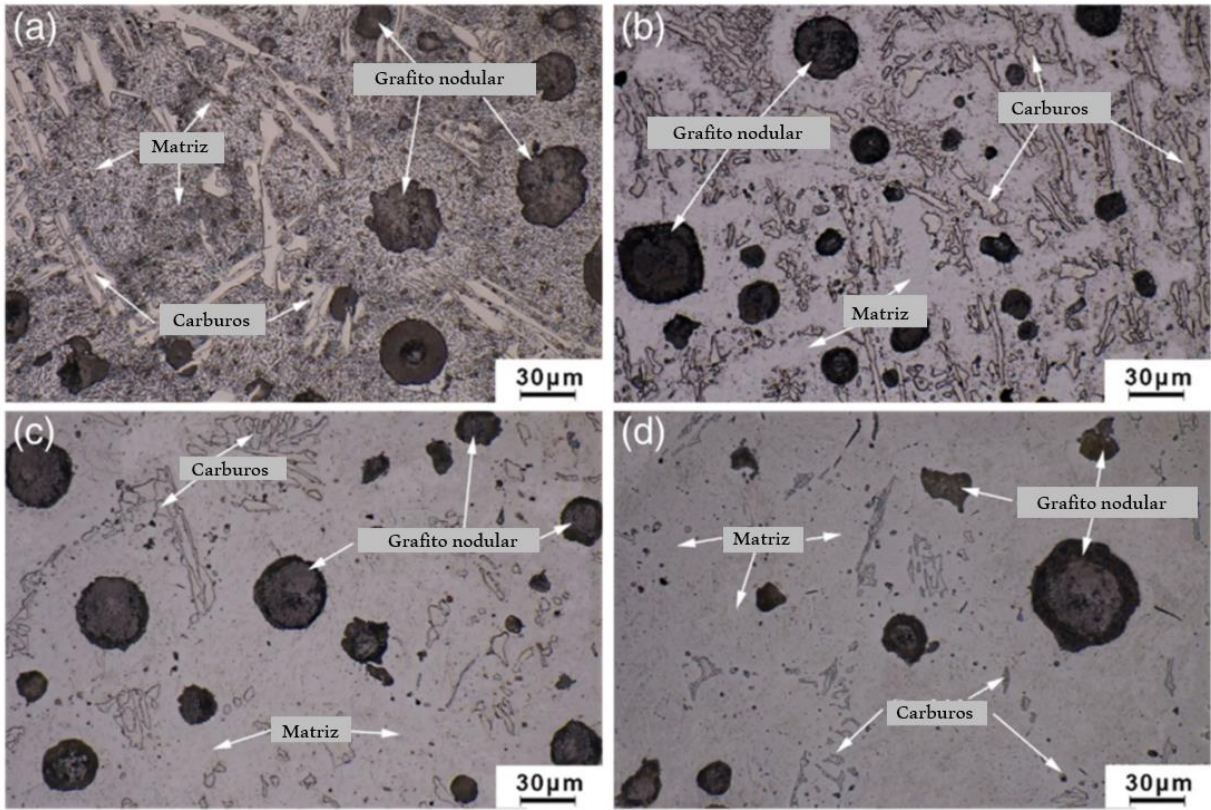


Figura 50. Microestructuras a diferentes temperaturas de austenización (tiempo de permanencia de 7200 s): a) 1073 K, b) 1173 K, c) 1223 K, and d) 1273 K.

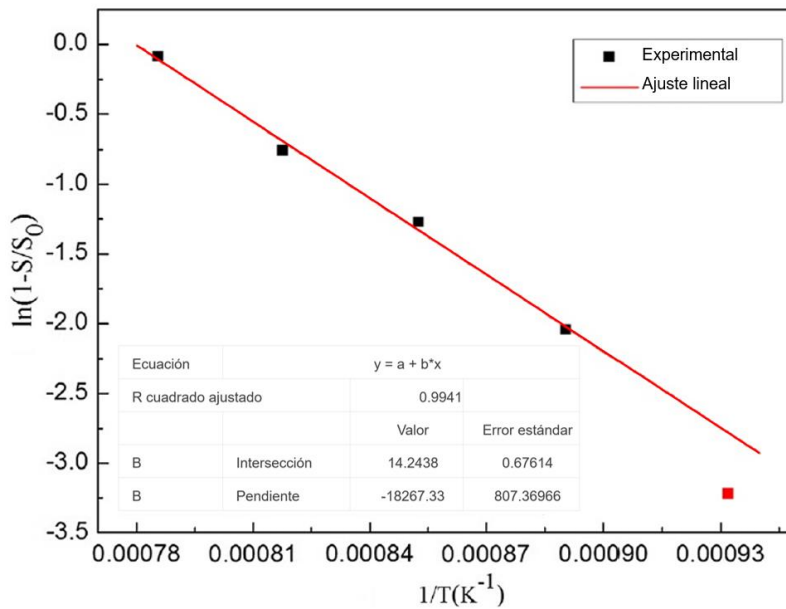


Figura 51. Gráfico del ajuste lineal de $\ln(1-S/S_0)$ frente a $1/T$ (tiempo de permanencia de 7200 s).

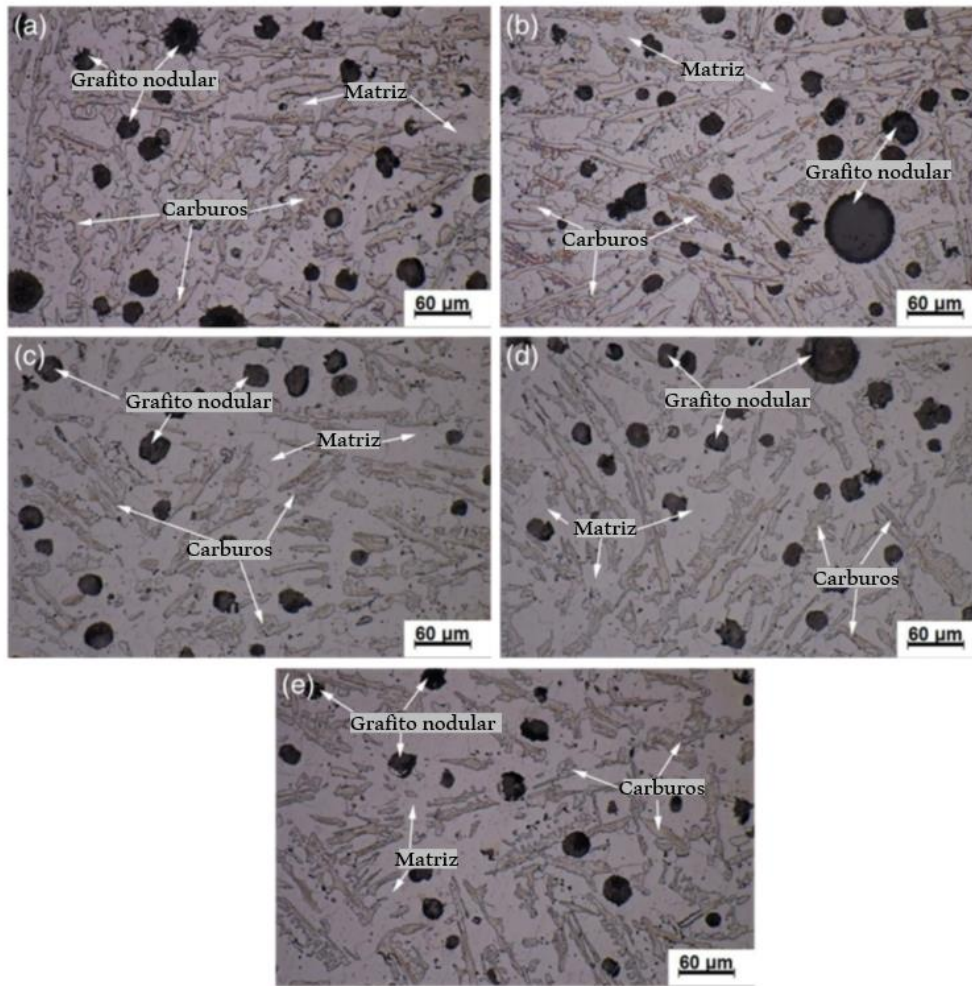


Figura 52. Microestructuras a diferentes tiempos de austenización (temperatura de austenización 1123 K): a) 60 s, b) 1800 s, c) 3600 s, d) 7200 s, y e) 10 800 s.

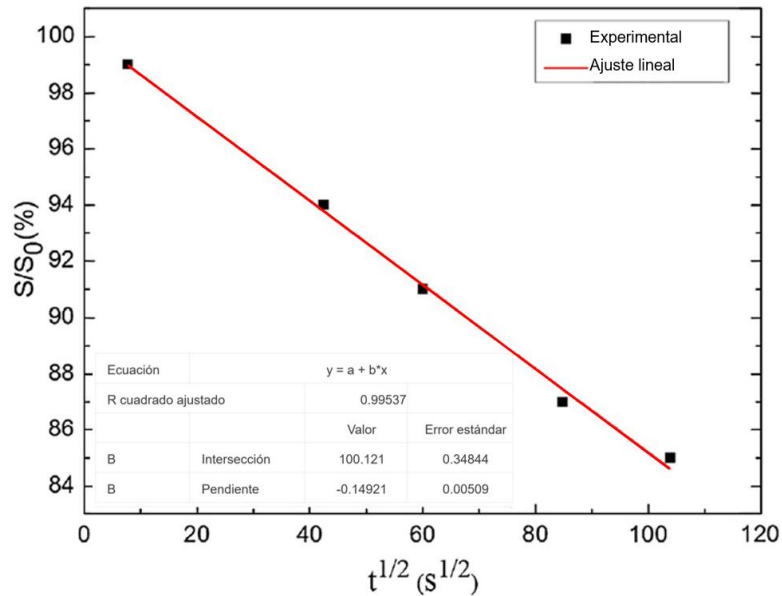


Figura 53. Gráfico del ajuste lineal de S/S_0 versus \sqrt{t} (a 1123 K).

En las investigaciones de Patil et al. (2014) (37), se desarrollaron hierros dúctiles que contiene carburos en una matriz ausferrítica, este material contiene carburos y posteriormente son austemperizados, la presencia de carburos aumenta la resistencia al desgaste por abrasión. Para obtener estos carburos existen tres caminos en la fabricación: reducir la cantidad de elementos grafitizantes (principalmente el Si); añadir elementos estabilizadores de carburos (como el Cr, Mo, Ti) y tener una mayor velocidad de enfriamiento. En su trabajo presentaron la fabricación de tres muestras C1, C2 y C3, siendo muestra de referencia, otra hipoeutéctica y eutéctica respectivamente. Se utilizó un horno de inducción y 100 kg de capacidad, usando chatarra de acero y retornos de fundición, junto con la adición de Cr y FeSiMg, Cu y Ni. Se austenizaron a 900°C en una mufla durante 1 h, posteriormente se aplicó un isotérmico en un baño de sal a 250, 325 y 400°C durante 1, 2 y 3h, respectivamente. Se llevó a cabo un ensayo de dureza Rockwell, micro Vickers y prueba de abrasión. La presencia de carburos que muestra la *Tabla 16* en la microestructura aumenta la resistencia al desgaste. En el comportamiento de resistencia al desgaste de la *Figura 54* se observó que la máxima resistencia al desgaste está en C3 - 325°C - 3 h y C2 - 325°C -1 h. Los resultados del análisis metalográfico se muestran en la *Figura 55* y *56* muestran mayor contenido de carburos en C3 (austemperizado a 325°C – 3 h, $C_{eq} = 4.2\%$, 2.26% Cr) que en C2 (austemperizado a 325°C – 1 h, $C_{eq} = 3.34\%$, 2.3% Cr). La dureza aumentó con el contenido de Cr, y varía con las tres temperaturas de austemperado; la microdureza del carburo fue 700HV₂₀₀ a 985HV₂₀₀ y para la ausferrita de 350HV₂₀₀ a 550HV₂₀₀.

Tabla 16. Fracción de volumen de carburos en la microestructura de CADI.

Muestra	Volumen de carburos (%)
C2	37.7
C3	50.8

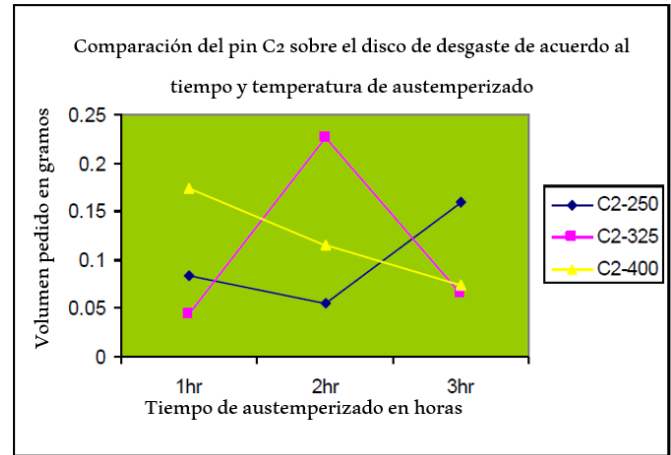
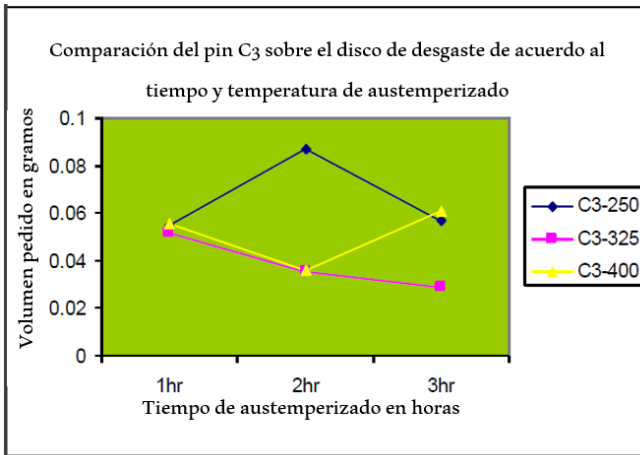


Figura 54. Pérdida de peso en función de diferentes tiempos de austemperizado. Para las muestras C 2 y 3 a distintas temperaturas de austemperizado.

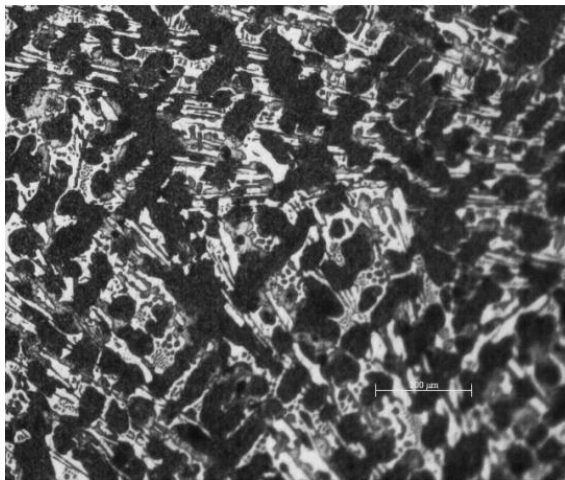


Figura 55. Microestructura de la muestra C2-250°C-1 h, los carburos se presentan como las zonas en color blanco. Atacada con Nital al 2%, a 200X.

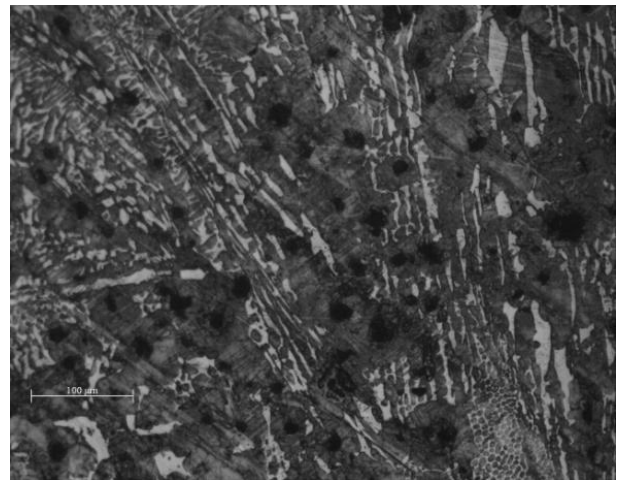


Figura 56. Microestructura de la muestra C3-250°C-1 h, los carburos se presentan como las zonas en color blanco. Atacada con Nital al 2%, a 200X.

Pawar et al. (2015) (27) indican, que la fundición dúctil austemperizada bajo la norma ASTM A 834 95 ha sido reconocida por su alta resistencia a la tracción, sustituyendo a los aceros forjados en varias aplicaciones, también, posee capacidades buenas frente al desgaste y la abrasión, de manera similar se ha desarrollado un nuevo tipo de hierro dúctil con carburos (CADI) que muestra aplicaciones en respuesta al desgaste abrasivo. En su trabajo, estudiaron dos

variantes de CADI con el fin de evaluar su resistencia a la abrasión. La preparación de las muestras consistió en una etapa de austenización a 900°C y 975°C en una mufla durante 1 h, seguida de un austemperado en un baño de sal a 400°C de 1 a 4 h. Se realizaron ensayos de dureza Rockwell C, microindentación Vickers y prueba de abrasión (ASTM G99). Los resultados de microdureza fueron: los carburos obtuvieron 608HV₂₀₀ a 622HV₂₀₀, mientras que la ausferrita de 453HV₂₀₀ a 589HV₂₀₀. En la *Tabla 17* se observan los valores de la pérdida de peso a distintas condiciones de tratamiento térmico, en donde la máxima resistencia al desgaste se obtiene en la muestra C1 900°C – 1h y 400°C – 2 y 3h, ya que su pérdida de peso es mínima. La microestructura de la muestra con mayor resistencia al desgaste se ilustra en las *Figuras 57 y 58*.

Tabla 17. Valores obtenidos del ensayo de desgaste para CADI bajo distintas condiciones de austemperizado.

Muestra	T _γ (°C)	t _γ (h)	T _a (°C)	t _a (h)	Pérdida de peso (g)
C1	900	1	400	1	0.266
C1	900	1	400	2	0.0853
C1	900	1	400	3	0.0856
C1	975	1	400	2	0.135
C1	975	1	400	3	0.174
C1	975	1	400	4	0.107

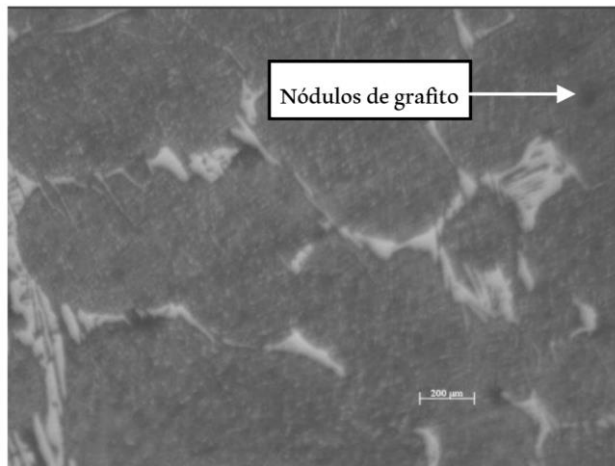


Figura 57. Microestructura de la muestra C1 900°C-1h 400°C-2h. A 500X.

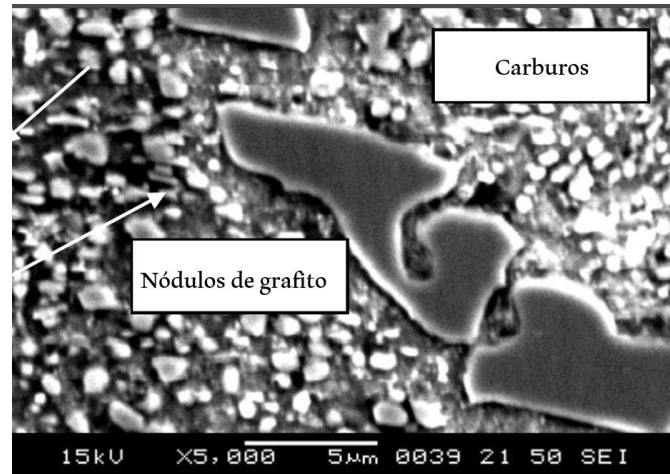


Figura 58. Microestructura de la muestra C1 900°C-1h 400°C-2h. A 5000X.

En el trabajo de Yang et al. (2021) (38), que estudia el hierro dúctil austemperado con carburos. Su microestructura está formada por nódulos de grafito, carburos eutécticos, ferrita acicular y austenita retenida, además al agregar Cr, Nb, V, Mo y otros elementos, el número de carburos aumenta. En su trabajo pretenden estudiar con mejor detalle la nucleación y crecimiento de la ferrita acicular a diferentes temperaturas de austemperizado, para proporcionar apoyo teórico en la selección de la etapa de austemperizado. Las muestras se fabricaron con una composición de 3.72 %C, 2.77 %Si, 0.51 %Mn, 0.99 %Cr y 0.04 %Mg, posteriormente el tratamiento térmico consistió en austenizar a 900°C durante 120 min y austemperizar a 250, 300, 350, 400 y 450°C durante 5, 10, 30, 60 y 120 min, para conocer los cambios en la microestructura. Las muestras se observaron en microscopía óptica, SEM y TEM. En los resultados se aprecia ferrita (BCC) acicular y austenita retenida, distribuidas alrededor de los carburos eutécticos, los cuales eran tipo M_3C con una red ortorrómbica, *Figura 59*. Mientras que en la *Figura 60* y *61* se muestra que un tiempo de austemperizado menor a 30 minutos la matriz estaba compuesta de martensita y austenita retenida, sin ferrita acicular; con 60 minutos, las ferritas aciculares aparecieron en la matriz, pero la cantidad fue menor; después de 120 min, la cantidad de ferrita acicular comenzó a aumentar.

Con el aumento de la temperatura de austemperizado, aumentó la fuerza impulsora del crecimiento de la ferrita acicular, el tamaño de la ferrita acicular en CADI aumentó con el aumento de la temperatura de austemperizado. Los autores indican que cuanto menor sea la temperatura de austemperizado, mayor será la fuerza impulsora de la nucleación y menor será el tamaño de la ferrita acicular.

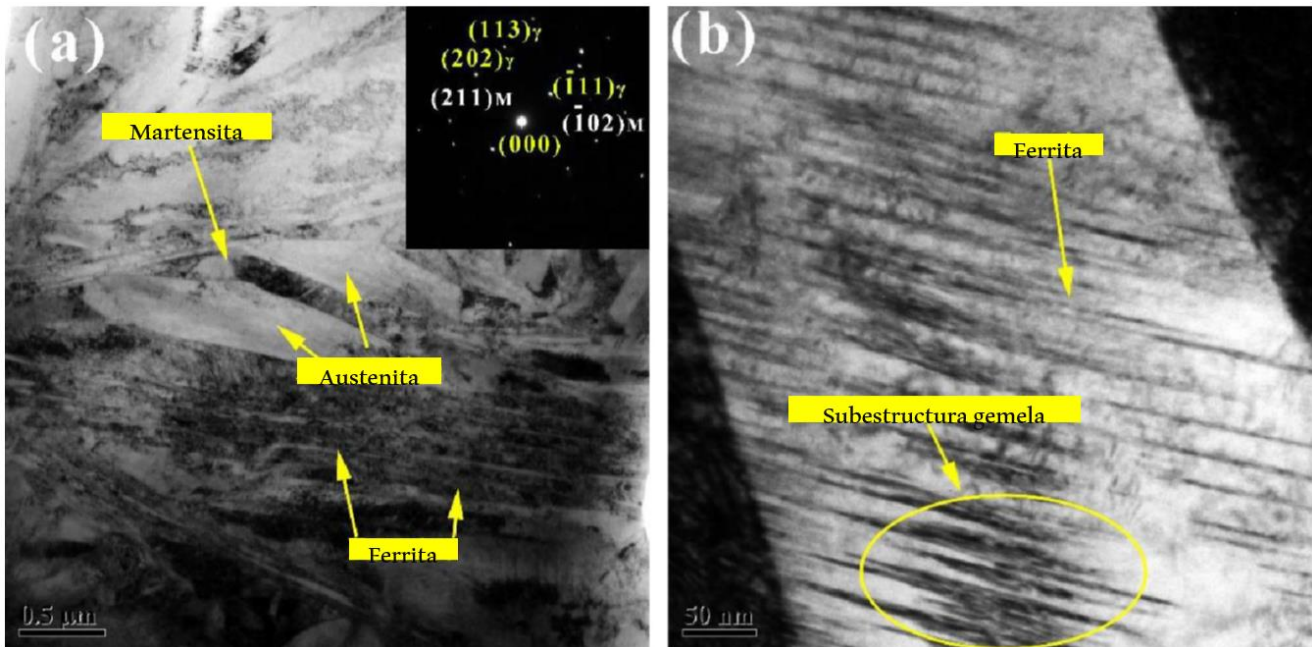


Figura 58. Micrografías TEM de campo brillante de CADI austemperizado a 250°C durante 120 min; (a) micrografías TEM de campo brillante y SADPs; (b) microestructura interna de ferrita acicular.

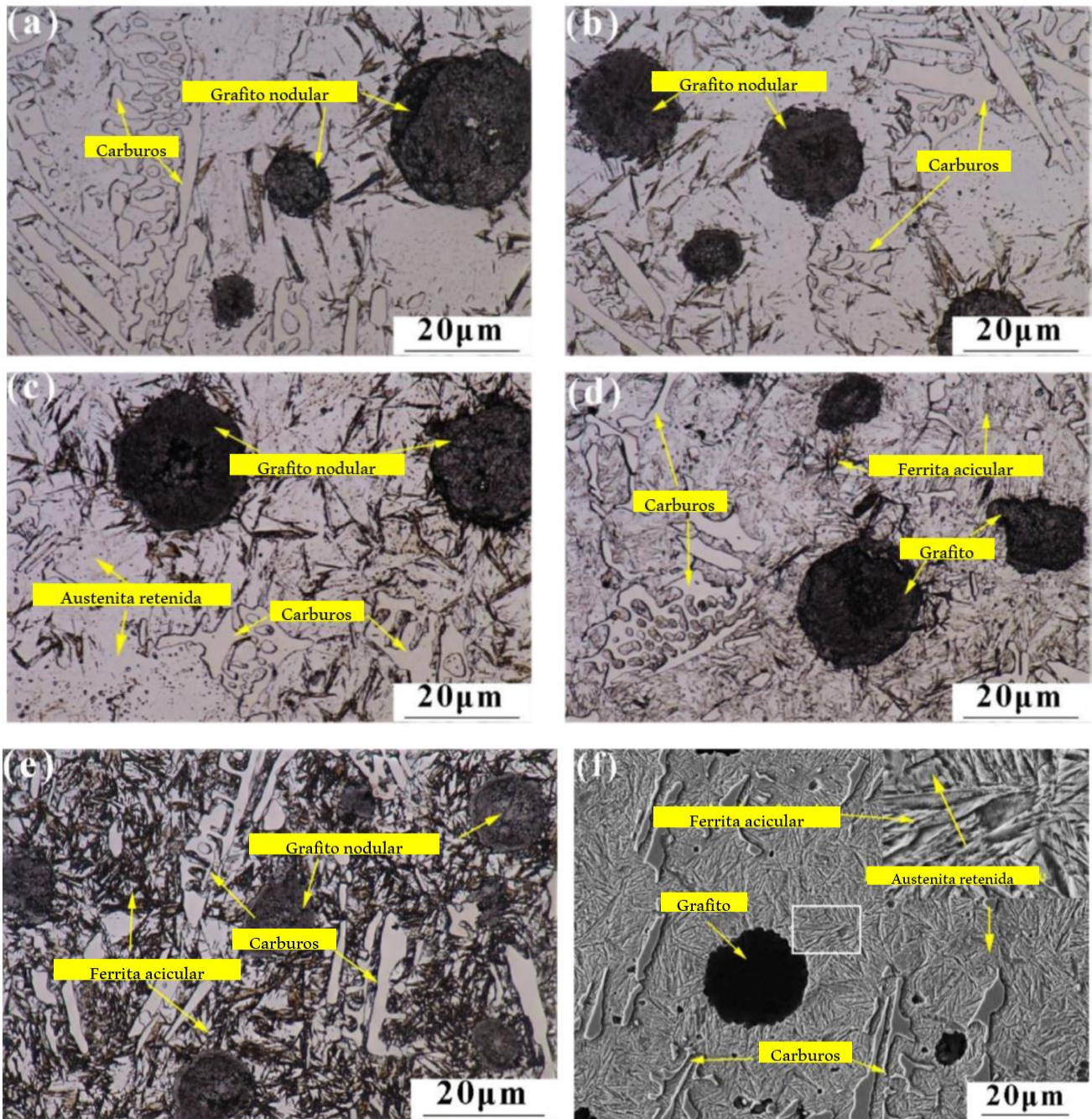


Figura 59. Microestructuras del CADI austemperizado a 250°C a diferentes tiempos: (a) micrografías ópticas (OM) para 5 min; (b) OM para 10 min; (c) OM para 30 min; (d) OM para 60 min; (e) OM para 120 min; (f) imagen SEM para 120 min.

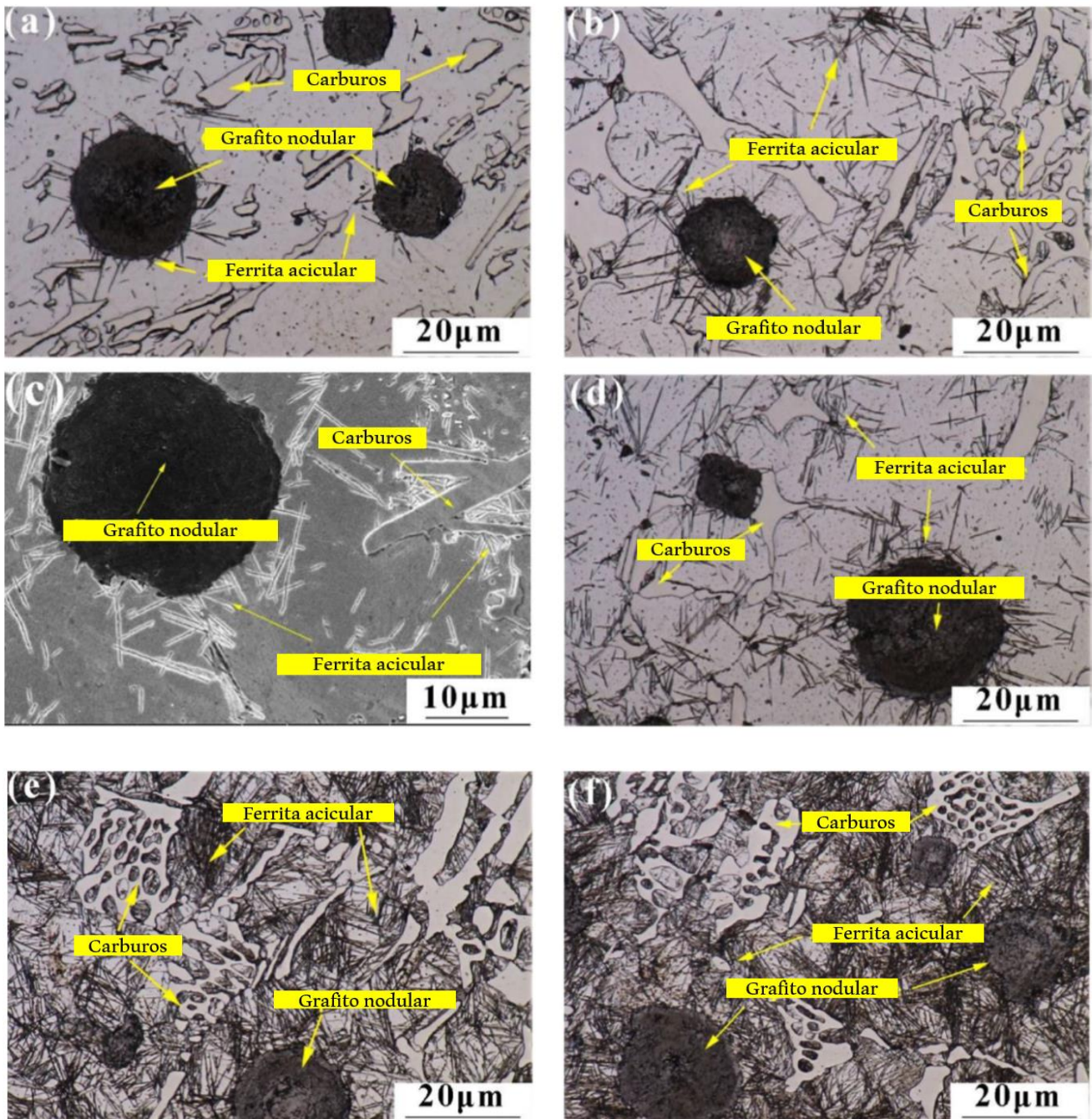


Figura 60. Microestructuras del CADI austemplado a 300°C durante diferentes tiempos: (a) OM durante 5 min; (b) OM durante 10 min; (c) SEM durante 10 min; (d) OM durante 30 min; (e) OM durante 60 min y (f) OM durante 120 min.

Las aplicaciones del hierro CADI se han incrementado gracias a su combinación de alta resistencia a la abrasión, resistencia al impacto y siendo mayor su resistencia al desgaste que el ADI grado 5, menos costoso que el hierro blanco con 18%Cr y logrando reemplazar al acero al manganeso con un costo igual o menor. Peng et al. (2011) (39) analizaron el efecto del boro. Se sabe que este elemento mejora la templabilidad en los aceros, debido a esta propiedad se han realizado diversos estudios para reemplazar elementos de aleación costosos como Cr, Mo y Ni. Ya que se le ha dado poca atención al hierro fundido, en especial a CADI, el objetivo del estudio es estudiar la influencia del boro en la microestructura y propiedades mecánicas de CADI. Para ello se fabricaron bolas de molienda que posteriormente se maquinaron, con diferente composición química ($C_{eq} \approx 4.3$), designadas como B1, B2, B3 y B4, en un horno de inducción de capacidad de 30 kg, con materiales de carga de chatarra de acero y aleaciones maestras FeB, FeMn, FeSi6Mg y FeSiBa. Debido a que el boro es un elemento activo, el oxígeno y el nitrógeno en la masa fundida se eliminan eficazmente para asegurar el rendimiento de este. Las muestras obtuvieron un contenido de B con aproximadamente 0.03, 0.05, 0.08 y 0.12 % en peso. Durante el tratamiento térmico se austenizaron en un horno de resistencia eléctrica a 900°C – 2 h y posteriormente se austemperizaron en un baño de sal a 260°C – 2.5 h. Después se tomaron muestras para realizar pruebas de impacto, dureza y preparación metalográfica. Los resultados se muestran en la *Figura 62*, en donde el contenido de la matriz de ferrita acicular disminuyó con mayor contenido de boro; en la *Figura 63* se observa que la dureza máxima es con la adición de 0.03% de Boro, una pequeña cantidad, pero a medida que aumenta el contenido de B disminuye la dureza y la resistencia al impacto (*Figura 64*), debido a que la matriz ausferrítica posee una mayor capacidad de deformarse. También se encontró que la esferoidización del grafito disminuye al aumentar el contenido de boro, las morfologías del grafito del CADI se degradan. Finalmente se encontró una alta dureza y buena resistencia al impacto con un contenido de B de 0.03% aproximadamente.

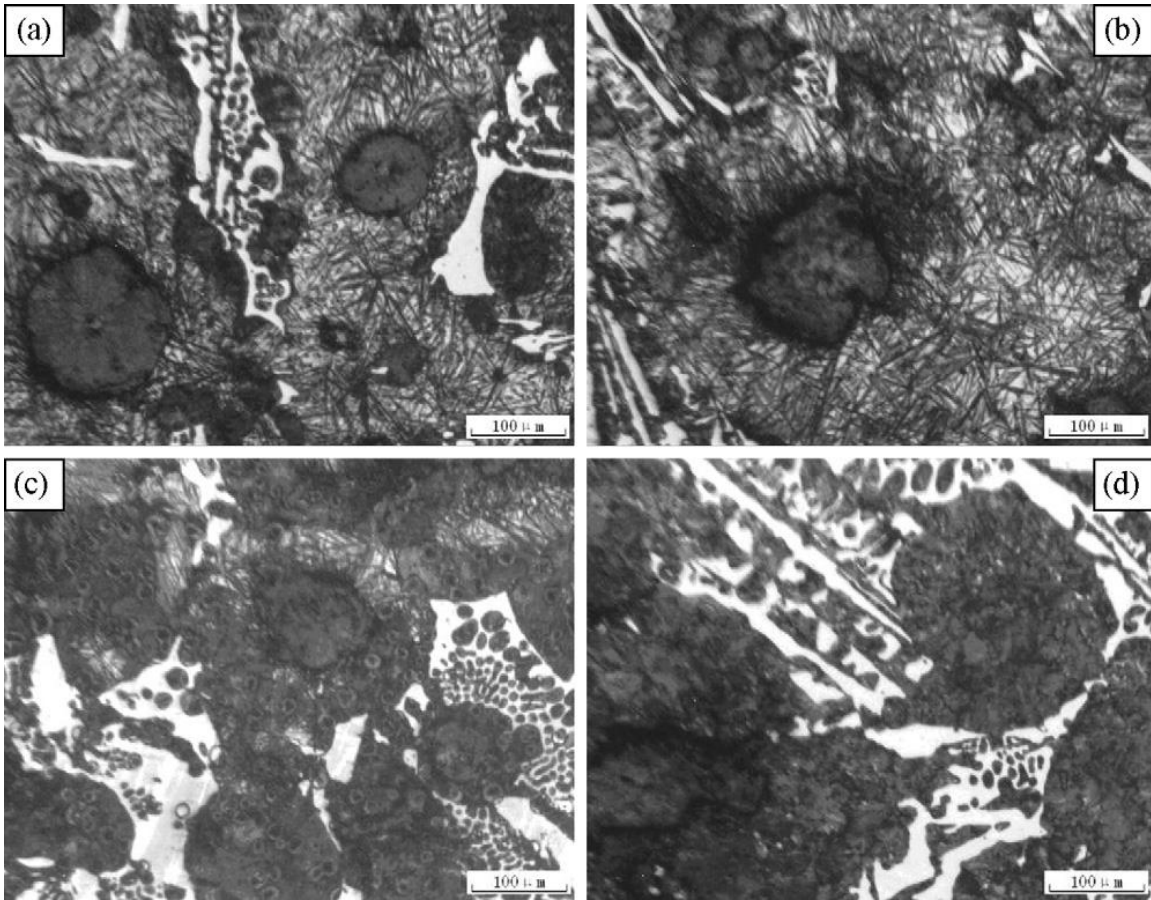


Figura 61. Microestructura del centro de la bola de molienda CADI con varios contenidos de boro (% en peso), (grabado) (a) 0,03% B, (b) 0,05% B, (c) 0,08% B, y (d) 0,12% B.

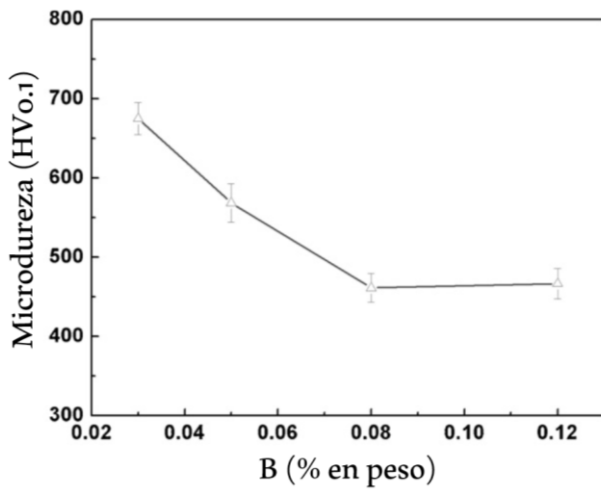


Figura 62. Microdureza del centro de la bola de molienda CADI para diferentes contenidos de Boro.

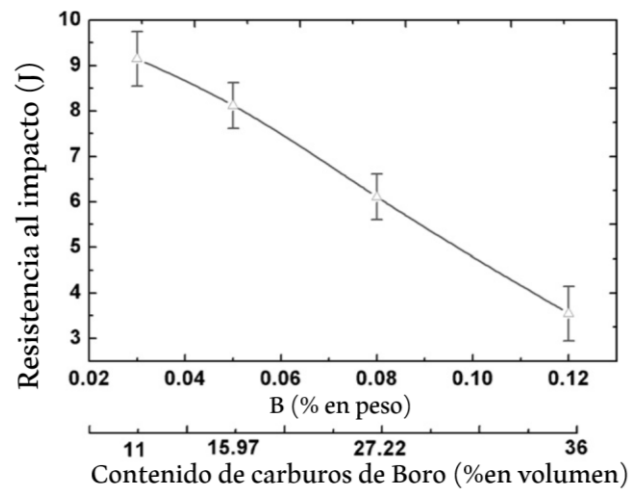


Figura 63. Relación de la resistencia al impacto y el contenido de carburos de Boro para diferentes contenidos de Boro.

Como expresa Leyva et al. (40) los hierros nodulares austemperizados con carburos llamados CADI (Carbide Austempered Ductile Iron) han sido desarrollados recientemente al exhibir resistencia al desgaste asociada a la fracción de carburos en la matriz de ausferrita formada durante el austemperizado, la cual confiere una aceptable resistencia al material. La transformación total de la matriz en ausferrita está relacionada con la ventana de proceso, que es la temperatura a la cual se completa la transformación. Esta ventana de proceso depende de distintos factores, como lo son: la temperatura de austemperizado, la temperatura de austenización y los elementos aleantes; por ejemplo, cuando las temperaturas de austemperizado son bajas la ventana de proceso es relativamente amplia, de lo contrario la amplitud de la ventana disminuye cerrándose gradualmente y moviéndose en lapsos de tiempo más cortos. Las propiedades mecánicas obtenidas a causa de estas singulares características microestructurales permiten la aplicación de CADI en distintas ramas de la industria como la minera, automotriz, ferroviaria y agrícola. En su trabajo estudiaron el efecto de la temperatura de austemperizado sobre la ventana de proceso, para ello fabricaron hierro ondular en un horno de inducción de capacidad de 100 kg, utilizando como carga chatarra de hierro y acero, además de utilizar ferroaleaciones para el balance y Cr electrolítico, las piezas se colaron en moldes de arena en verde. Luego se aplicó el tratamiento térmico de austemperizado, las condiciones de este se muestran en la *Tabla 18*, después del tratamiento las muestras se templaron en agua con el propósito de que la austenita sin transformar precipitara como martensita. Posteriormente se realizó una preparación metalográfica y se aplicaron ensayos mecánicos de resistencia al impacto, de acuerdo con la norma ASTM E23, y dureza HRC. Los resultados de la caracterización microestructural revelaron que a 275°C se muestra martensita, debido a que está por debajo de la línea M_s , se puede apreciar en la *Figura 65*; la muestra de 300°C se observa en la *Figura 66*, en donde a un $t_a = 60$ min se completó la transformación de ausferrita siendo más fina que la de 400°C; finalmente la muestra a 400°C se presenta en la *Figura 67* presentando martensita, ya que requiere mayores tiempos para completar la transformación de la ausferrita.

Por otro lado, en la *Figura 68* se ilustra la comparación de las propiedades mecánicas de las muestras austemperizadas a 300°C y 400°C, la temperatura de austemperizado de 300°C exhibe mayor resistencia al impacto que la muestra tratada a 400°C, mientras que la dureza fue mayor para 400°C que para 300°C, debido a la presencia de martensita. La importancia para la fabricación del hierro CADI se encuentra en que las propiedades mecánicas al depender de la ventana de proceso dependen a su vez de la temperatura de austemperizado y tiempo de austemperizado.

Tabla 18. Parámetros de temperatura (T_a) y tiempo (t_a) de austemperizado experimentales.

T_a (°C)	275°C				300°C			400°C			
t_a (minutos)	15	60	120	180	15	60	120	15	60	120	180

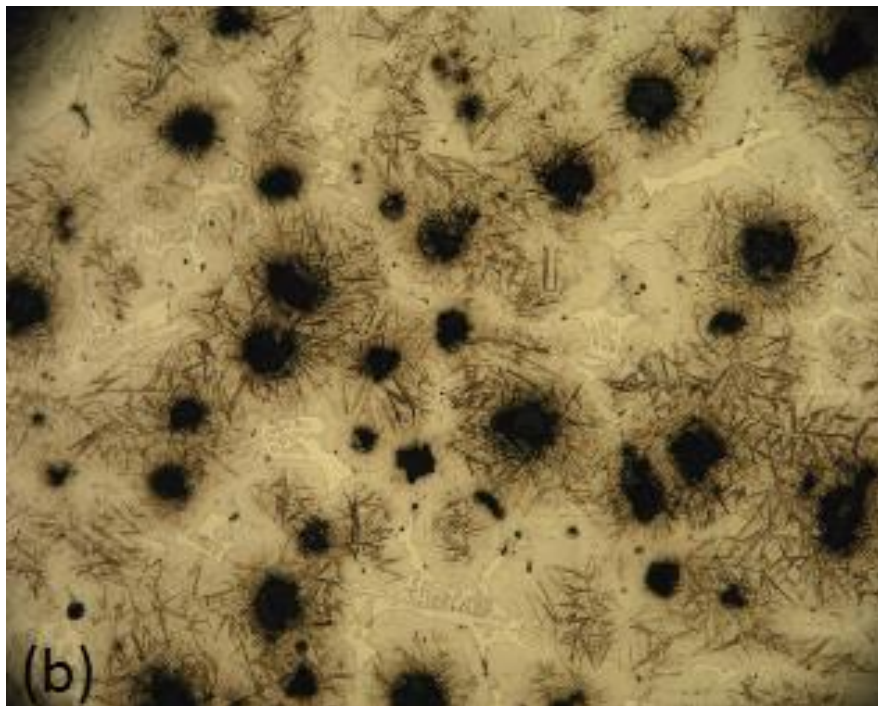


Figura 64. Microestructura de la muestra austemperizada a 275°C a 180 min.

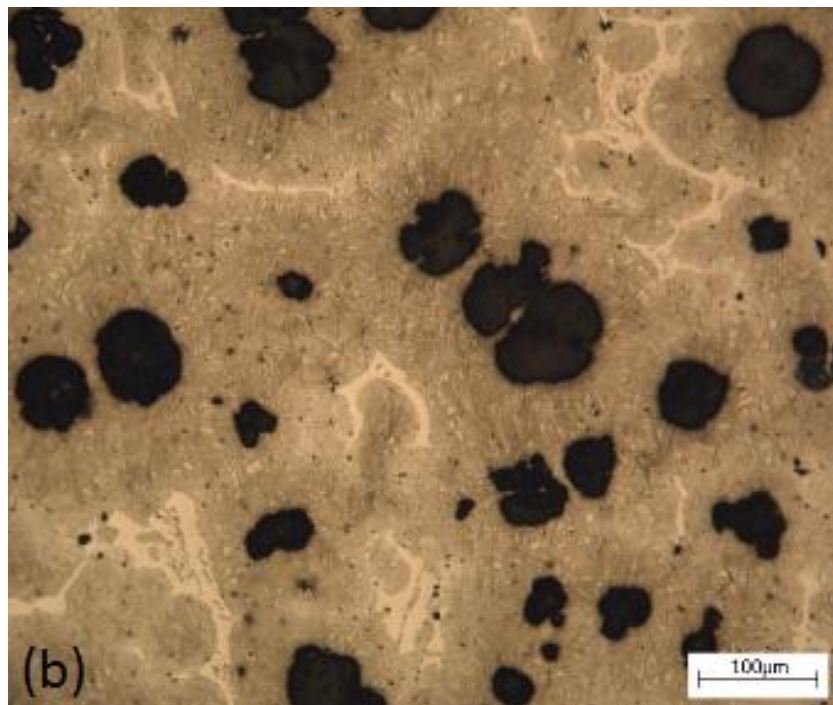


Figura 65. Microestructura de la muestra austemperizada a 300°C a 60 min.

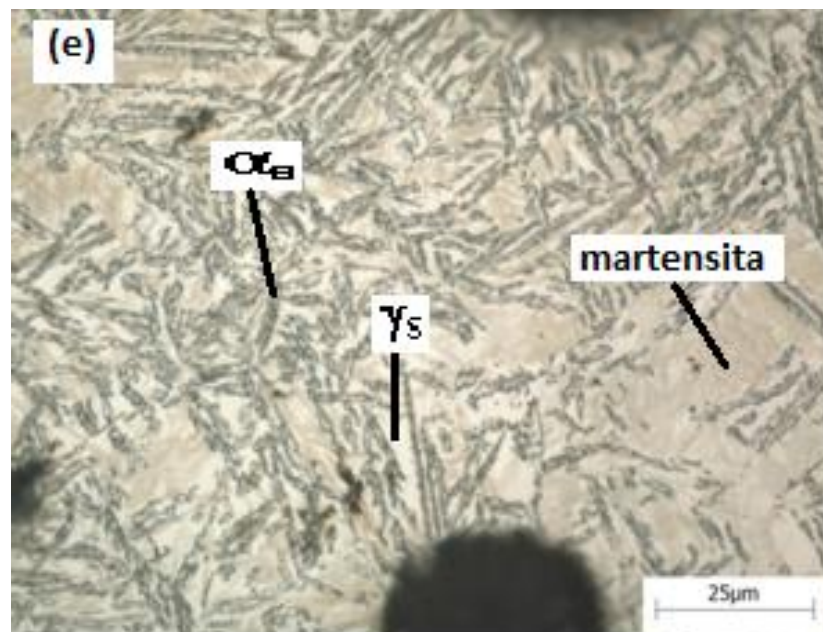
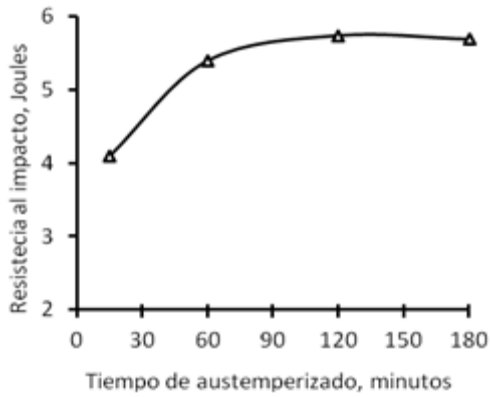
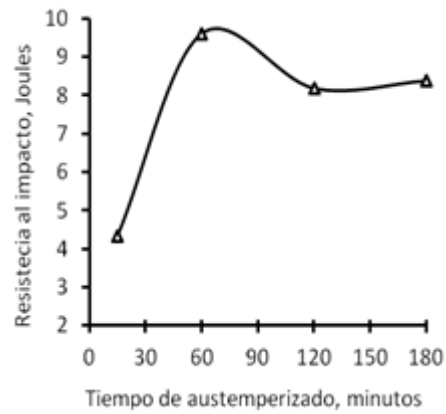


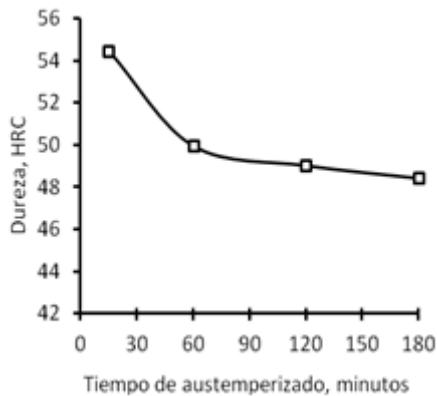
Figura 66. Microestructura de la muestra austemperizada a 400°C.



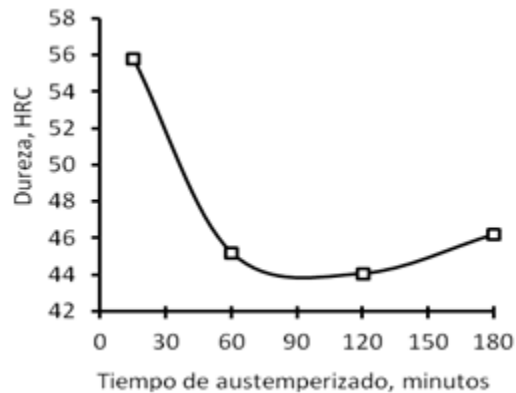
400°C



300°C



400°C



300°C

Figura 67. Comparación de las propiedades de Resistencia al impacto y dureza para las muestras tratadas isotérmicamente a 400 y 300°C.

Uno de los más grandes retos en la fabricación de los hierros CADI recientemente introducidos, es la obtención de un hierro nodular con carburos estables durante la etapa de austenización y que se encuentren distribuidos homogéneamente en la matriz de ausferrita. Dos caminos comúnmente utilizados para la obtención de dichas características de los carburos es fomentar elevadas velocidades de enfriamiento y añadir elementos blanqueadores, en donde la segunda opción origina carburos más estables durante la etapa de austenización, en donde ocurre la transformación total de la perlita en austenita. Posterior al tratamiento de austenización se encuentra el austemperizado, el cual provee una matriz de ausferrita producto de la transformación de la austenita, que proporciona elevada resistencia y resistencia. De manera conjunta, el material resultante tendrá

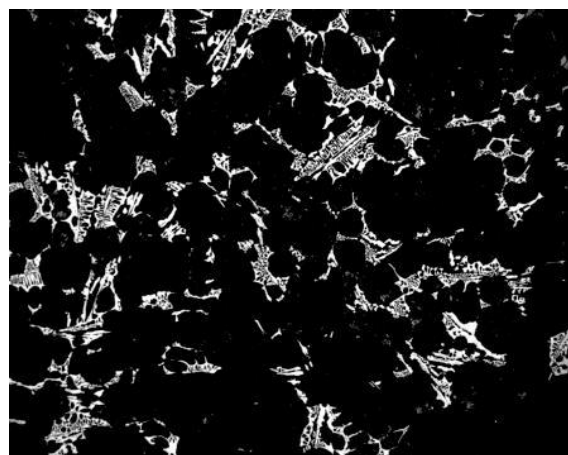
resistencia al desgaste y a la abrasión debido a los carburos y resistencia debido a la matriz de ausferrita. Debido a que aún no existen normas para los hierros CADI, la información sobre las variables del proceso de fabricación de un hierro con carburos, así como del tratamiento térmico de austemperizado es rudimentaria, por ello en su investigación García et al. (41) postulan que los carburos ledeburíticos varían de una zona a otra, son estables a $T_{\gamma} = 875$ y 975°C y el porcentaje de disolución de carburos va del 16 al 41%. Para ello, se fabricó un hierro nodular con carburos en un horno de inducción de capacidad de 120 kg, utilizando como carga chatarra de acero bajo carbono, chatarra de hierros gris, junto con ferroaleaciones de FeSi75, FeMo60 y Cu puro, obteniendo piezas coladas en un molde de arena. La pieza original se dividió en muestras de dimensiones 2x2x1 cm, para evaluar antes y después del tratamiento de austenización la fracción de carburos, el grafito y la matriz, analizando 12 zonas en cada muestra para obtener un valor promedio. Los resultados de esta evaluación microestructural, así como las condiciones del tratamiento térmico de austenización se muestran en la *Tabla 19* y *20*. Al evaluar la fracción de carburos inicial y final en cada muestra se encontró que el menor porcentaje de disolución de carburos está a las temperaturas de 875 y 975°C , en las microestructuras de las *Figura 69* se muestra que no existe una homogeneidad de cantidad de carburos en cada zona, con una variación hasta del 40%, existen entre 6.46 y 11.83% de carburos en la matriz con disoluciones del 16 al 41%. A pesar de evaluar a distintos tiempos y diferentes temperaturas no se puede obtener una relación de la cinética de disolución en función de la temperatura T_{γ} con un t_{γ} fijo o viceversa.

Tabla 19. Condiciones experimentales del tratamiento de austenización para cada muestra (T_γ = temperatura de austenización).

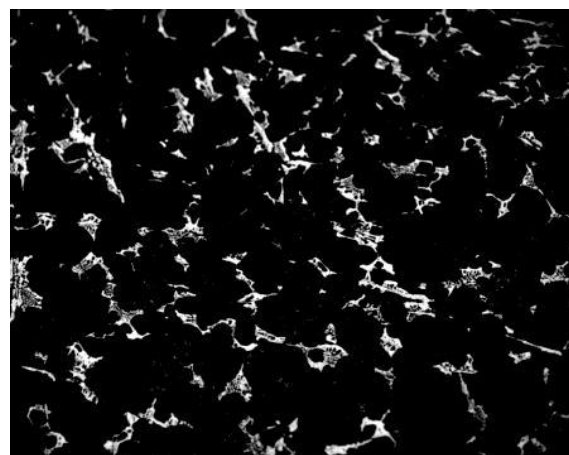
T_γ (°C)	Tiempo de Austenización (t_γ) [min]/Muestra				
875	60	90	120	150	180
	F 2.4	F 2.5	F 2.6	F 3.5	F 3.6
900	60	90	120	150	180
	F 1.1	F 1.2	F 1.3	F 1.4	F 1.5
925	60	90	120	150	180
	F 1.1	F 1.9	F 1.8	F 1.7	F 1.6
950	60	90	120	150	180
	F 1.12	F 1.11	F 1.13	F 1.4	F 2.1
975	60	90	120	150	180
	F 2.2	F 3.1	F 3.2	F 3.3	F 3.4

Tabla 20. Valores obtenidos de nodularidad y carburos en la evaluación microestructural.

Nodularidad (%)	Tamaño de nódulos	Conteo (nódulos/mm ²)	Microestructura de colada
> 90	6	100	Perlita + carburos



a)



b)

Figura 68. Microestructura de la matriz con carburos, oscurecida con una solución con HNO_3 , mostrando la distribución de carburos (a) zona intermedia de la pieza y (b) zona izquierda.

4.2 Obtención de CADI

En la *Tabla 21* se muestra el resumen de una serie de pasos de fabricación de un hierro CADI, desde las ferroaleaciones utilizadas para inoculación y nodularización, en donde comúnmente se utilizó el "método de sándwich", como nodulizante comúnmente se utilizaron las aleaciones Fe-Si-Mg y como inoculantes las aleaciones Fe-Si o Fe-Si-Ba.

La temperatura de austenización común fue cerca de 900°C o mayor, ya que se encontró que a temperaturas menores aún existía ferrita proeutectoide, además altas temperaturas de austenización favorecen las propiedades mecánicas (35), sin embargo, el tratamiento S&A con un tratamiento previo a súper alta temperatura de 1100°C dio como resultado un aumento en las propiedades de resistencia al impacto con una mínima diferencia en la dureza y adicionalmente obtener una mayor resistencia al desgaste comparado con un austemperizado ordinario.

Los tiempos de austemperizado fueron variados, desde 1 a 2 h o hasta 4 h (27), en donde se demostró que tiempos largos promueven la formación de carburos, además permiten que la austenita se sature de carbono. De esta manera se obtiene una mayor resistencia al desgaste.

El medio de temple en el austemperizado es un baño de sales, de composición 45% NaNO_2 + 55% KNO_3 ó 50% KNO_3 + 50% NaNO_3 , se demostró que la adición de agua al baño de sales (26) puede modificar las propiedades mecánicas de la pieza debido a que modifica la velocidad de enfriamiento, la dureza fue máxima con el máximo porcentaje de agua, pero la resistencia disminuyó.

Es importante mencionar los objetivos de cada uno de los trabajos de investigación, dado que la literatura es escasa, conocer los campos que no han sido explorados puede conllevar a una nueva línea de investigación a futuro.

Tabla 21. Condiciones del tratamiento térmico para la producción de CADI.

Autor	Tratamiento al metal líquido	Ciclo de Austempering			Objetivo
		Austenización	Austemperizado		
S. Laino, J. A. Sikora y R. C. Dommarco	Nodulizante: Fe-Si-Mg (9% Mg)	$T_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$	$T_a = 280$ y 360°C	Medio Baño de sales	Obtener un material con alta resistencia a la abrasión con una mayor resistencia al impacto.
	Inoculante: Fe-Si (75% Si)	$t_{\gamma} = 1$ h	$t_a = 2$ h		
Hayam. A. Aly, Adel A. Nofal, Abdel Hamid A. Hussein, Elsayed M. El-Banna	Se ha utilizado una tecnología de vórtice para la esferoidización y la inoculación	$T_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$	$T_a = 275$ y 375°C	Medio Sin información	Mejorar la resistencia al impacto, la dureza y la resistencia al desgaste de un CADI.
		$t_{\gamma} = 1$ h	$t_a = 1.5$ h		
Alejandro Basso, Sebastian Laino y Ricardo C. Dommarco	Nodulizante: 1.5% de Fe-Si-Mg (6% Mg)	$T_{\gamma} = 910^{\circ}\text{C}$	$T_a = 280$ y 360°C	Medio Baño de sales	Evaluar la resistencia a la abrasión y resistencia al impacto con diferentes matrices en un CADI.
	Inoculante: 0.6% de Fe-Si (75% Si)	$t_{\gamma} = 2$ h	$t_a = 1.5$ h		

S. Laino, J. A. Sikora y R. C. Dommarco	Nodulizante: Fe-Si-Mg (9% Mg)	$T_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$	$T_a = 320^{\circ}\text{C}$	Medio Baño de sales	Determinar la resistencia al desgaste por abrasión y la resistencia al impacto al utilizar un enfriador de cobre en el molde.
	Inoculante: Fe-Si (75% Si)	$t_{\gamma} = 1 \text{ h}$	$t_a = 2 \text{ h}$		
Peng Yun-Cheng, Jin Hui-Jin, Liu Jin-Hai y Li Guo-Lu	Nodulizante: Fe-Si-6Mg-2Re (6% Mg)	$T_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$	$T_a = 260^{\circ}\text{C}$	Medio Baño de sales (45% NaNO_2 + 55% KNO_3) con adición de 0 a 3% de agua	Conocer la influencia de la velocidad de enfriamiento en la resistencia al impacto y dureza.
	Inoculante: Fe-Si-Ba (72% Si)	$t_{\gamma} = 1 \text{ h}$	$t_a = 1.5 \text{ h}$		
Yang Penghui, Fu Hanguang, Li Goulu, Liu Jinhai y Zhao Xuebo	Nodulizante: 1.5% de Fe-Si-6Mg-2Re (6Mg-2Re-40%Si)	$T_{\gamma} \text{ S\&A} = 1100^{\circ}\text{C}$ $t_{\gamma} \text{ S\&A} = 10 \text{ min}$	$T_a = 300^{\circ}\text{C}$	Medio Baño de sales (50% KNO_3 + 50% NaNO_3)	Conocer la influencia de un nuevo tratamiento térmico aplicado en la fabricación de un
	Inoculante: 1.2% de Fe-75Si (75% Si)	$T_{\gamma} 1 = 880^{\circ}\text{C},$ $T_{\gamma} 2 = 720,$	$t_a = 120 \text{ min}$		

		760, 800, 840°C			CADI a altas temperaturas.
		$t_{\gamma 1}$ y $t_2 = 120$ min			
Haiqiang Cheng, Hanguang Fu, Shengqiang Ma, Jian Lin y Yongping Lei	Nodulizante: Fe-Si- 8Mg-3Re Inoculante: Fe-75Si	$T_{\gamma} = 850,$ 900, 950 y 1000°C $t_{\gamma} = 0-200$ min	$T_a =$ 300°C $t_a = 2$ h	Medio Baño de sales (50% KNO_3 + 50% $NaNO_3$)	Conocer el efecto de Tauste y tauste en la resistencia a la abrasión y dureza del CADI.
Yang Penghui, Fu Hanguang, Lin Jian, Guo Xingye y Lei Yongping	Nodulizante: Sin información Inoculante: Sin información	$T_{\gamma 1} = 1073,$ 1123, 1173, 1223 K $t_{\gamma 1} = 2$ h $T_{\gamma 2} = 1123$ K $t_{\gamma 2} = 60,$ 1800, 3600, 7200, 10800 s	$T_a =$ Sin informa- ción $t_a = -$ $T_a = -$ $T_a = -$	Medio Sin información	Conocer el efecto de Tauste y tauste en la homogeneización de la austenita.
S A Patil, S U Pathak y Ajay Likhite	Nodulizante: Fe-Si-Mg (9% Mg)	$T_{\gamma} = 900$ °C	$T_a = 250,$ 325, 400°C	Medio Baño de sales	Obtener CADI con carburos aleados utilizando Cr.

	Inoculante: Fe-Si (75% Si)	$t_{\gamma} = 1 \text{ h}$	$t_a = 1, 2, 3 \text{ h}$		
Mahendra Pawar, Madhavi Harne y Dr. Sunil Patil	Nodulizante: Sin información	$T_{\gamma} = 900, 975^{\circ}\text{C}$	$T_a = 400^{\circ}\text{C}$	Medio Baño de sales	Determinar la resistencia al desgaste por abrasión de un CADi con carburos de Cr.
	Inoculante: Sin información	$t_{\gamma} = 1 \text{ h}$	$t_a = 1 - 4 \text{ h}$		
K. L. Hayrynen y K. R. Brandenburg	Nodulizante: Sin información	$T_{\gamma} = 899^{\circ}\text{C}$	$T_a = 371, 316, 260^{\circ}\text{C}$	Medio Sin información	Comparar las propiedades de dureza y resistencia a la abrasión de los CADi obtenidos contra los hierros resistentes a la abrasión.
	Inoculante: Sin información	$t_{\gamma} = \text{Sin información}$	$T_a = \text{Sin información}$		
Yang Pengui, Fu Hanguang, Absi Rafik, Bennacer Rachid,	Nodulizante: 1.5% Fe-Si-6Mg-2Re (6Mg-2Re-40%Si)	$T_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$	$T_a = 250, 300, 350, 400, 450^{\circ}\text{C}$	Medio Sin información	Determinar la microestructura de un CADi a diferentes temperaturas y

Darcherif Moumen, Ma Shengqiang, Lin Jian y Gou Xingye	Inoculante: 1.2% Fe-Si (75% Si)	$t_{\gamma} = 120 \text{ min}$	$t_a = 5, 10, 30, 60, 120 \text{ min}$		tiempos de austemperizado.
Peng Yun-Cheng, Jin Hui-Jin, Liu Jin-Hai y Li Guo-Lu	Nodulizante: Fe-Si-6Mg-3Re (6% Mg) Inoculante: Fe-Si-Ba (70% Si)	$T_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$ $t_{\gamma} = 2 \text{ h}$	$T_a = 260^{\circ}\text{C}$ $t_a = 2.5 \text{ h}$	Medio Sin información	Conocer el efecto del B en las propiedades de dureza y resistencia al impacto en un CADI.

4.3 Propiedades mecánicas

La *Tabla 22* muestra un resumen comparativo de las propiedades reportadas por los autores citados en los párrafos anteriores. Se presentan algunos valores obtenidos en los artículos consultados como: dureza Rockwell B y C, resistencia al impacto, resistencia al desgaste y pérdida de volumen.

Tabla 22. Comparación de las propiedades mecánicas para las distintas condiciones reportadas por los autores en los artículos consultados.

Autor (año)/Referencia	Condiciones de la muestra	Propiedades				
		HRB	HRC	Impacto (J)	Resistencia al desgaste relativa E	Volumen perdido (mg)
Laino et al. (2008) (25)	A1 - 280°C (2.5%Cr)	500		6.8	1.73	
	A1 - 360°C (2.5%Cr)	420		8.3	1.95	
Laino et al. (2009) (1)	CADI 1 - 0.5%Cr - 15 mm con enfriador	450		7	3.01	
	CADI 2 - 2%Cr - 0 mm con enfriador	550		6	3.11	
Aly et al. (2020) (3)	1%Cr - 1%Nb V - 375°C		45	30		
	1.5%Cr - 1%Nb V - 275°C		61	21		
Basso et al. (2013) (34)	CADI 360°C 17% carburos	490		8.5	5.9	
Peng et al. (2012) (26)	0% agua adicionada		56. 4	14		
	3% agua adicionada		61. 5	10		

Penghui et al. (2020) (2)	Tratamiento S&A		52	19.5		
Haiqiang et al. (2019) (35)	900°C - 50 min, 300°C - 100 min		50	7.9		20
Patil et al. (2014) (37)	C2 - 325°C - 1h (2.3%Cr) 37.7% carburos				5.8934	
	C3 - 325°C - 3h (2.26%Cr) 50.8% carburos				3.9368	
Pawar et al. (2015) (27)	C1 900°C - 1h, 400°C - 2h					85.3

También los resultados de resistencia a la abrasión se omitieron debido a la escasa exactitud de los valores mostrados en sólo algunos artículos, pero se abordará más adelante.

Las propiedades mecánicas que tenían en común la mayoría de los artículos eran la dureza, resistencia al impacto y, sobre todo al desgaste. Los autores realizaron investigaciones con el objetivo de encontrar un equilibrio entre estas tres propiedades, también conocer las consecuencias del proceso de fabricación, composición química y tratamientos térmicos para analizar más a fondo el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de austenización y tratamiento isotérmico.

En el caso de Laino et al. (2008 y 2009) en ambos de sus trabajos consiguieron buenos resultados de dureza, resistencia al impacto y al desgaste, en el primero buscaron observar el efecto del contenido de Cr, mientras que en el segundo el

efecto de la velocidad de enfriamiento mediante el uso de un enfriador de cobre (chill) y diferentes contenidos de Cr. Los resultados indicaron que en el segundo caso se obtuvo una mayor resistencia relativa al desgaste que con sólo la adición de Cr. En la *Tabla 22* se observan estos valores, aunque el rango de las durezas no es muy amplio, pero al comparar la resistencia al impacto y al desgaste se observa que estas dos propiedades mecánicas son inversamente proporcionales, es decir, a mayor resistencia al desgaste menor resistencia. Los resultados de dureza y resistencia al impacto provistos por Haiqiang et al. (2018) concuerdan con el trabajo de Laino et al. (2009).

En el trabajo de Basso et al. (2013) realizan los mismos ensayos, ahora los resultados mostraron una resistencia al desgaste que aumenta poco más del doble que la resistencia relativa más alta obtenida por Laino y colaboradores, incluso sin sacrificar el valor de resistencia al impacto y dureza, valores similares a los reportados por el primer autor. La metodología de Basso y colaboradores es mejor en el caso de requerir gran resistencia al impacto y al desgaste. También es comparable con Patil et al. (2014) los valores de resistencia al desgaste relativa, sin embargo, para las muestras identificadas como C2 y C3 se tienen 37.7 y 50.8% [9] de carburos en lugar de 17% de carburos en CADI austemperizado a 360°C por Basso.

De los trabajos de Aly, Peng, Penghui y colaboradores, se puede observar el efecto de la dureza frente a la resistencia al impacto, donde a mayor dureza menor resistencia al impacto, debido a que materiales muy duros también son muy frágiles. En la literatura se relaciona el contenido de carburos con el de la dureza, por lo cual se puede decir que a mayor contenido de carburos, mayor dureza y menor resistencia al impacto.

Durante las investigaciones de Pengui, Aly et al. se observan valores de resistencia al impacto sobrepasando por mucho a los demás, con valores de 19.5 J, 30 J y 21 J respectivamente, evidencia que los CADI poseen una resistencia al impacto

mucho mayor a los hierros blancos aleados, con altas durezas y con buenas resistencias al desgaste.

Cuando se tiene una mayor pérdida de volumen implica una menor resistencia al desgaste relativa [1 – 10], se puede afirmar que el CADI obtenido por Pawar et al. (2015) posee una menor resistencia al desgaste a comparación del CADI obtenido por Haiqiang y colaboradores, teniendo 85.3 y 20 mg respectivamente en volumen perdido, se puede suponer que una temperatura de austemperizado mayor conlleva a una menor resistencia al desgaste.

Capítulo 5: Conclusiones

- En resumen, esta tesina se ocupó de revisar bibliografía especializada en los hierros CADI, debido a la necesidad de obtener literatura amplia y profunda sobre el tema y realizar una síntesis de los procesos que se requieren para la manufactura de los hierros CADI.
- Después de revisar las características de producción y evaluación de CADI se pudo obtener una recopilación de las distintas variables para su producción. Por un lado, la fabricación de un hierro con carburos controlados y con mayor estabilidad, ya sean aleados con la adición de elementos estabilizadores como Cr, Nb, V, y en un caso el uso del B debido a su bajo costo; carburos ledeburíticos y carburos inducidos por un enfriador de cobre.
- Por otro lado, el control de la etapa de austenización, en donde se encontró que tiempos largos favorecen valores altos de dureza, resistencia al impacto, desgaste y abrasión, la temperatura de austenización también se involucra ya que a temperaturas altas y tiempos prolongados se favorecen las propiedades mecánicas de dureza, resistencia al impacto, resistencia al desgaste y abrasión.
- De manera similar en la etapa de austemperizado se encontró que tiempos cortos promueven la formación de martensita, mientras que tiempos largos favorecen la formación de carburos, además de enriquecer la austenita en carbono, asimismo, altas temperaturas de austemperizado promueven estructuras gruesas.

- Se demostró que el hierro CADI puede competir contra otros materiales resistentes al desgaste y a la abrasión, como el caso de los aceros forjados, al manganeso y en el caso de hierros blancos aleados con Cr con cantidades de 18% e incluso de 27%, pero con la ventaja en poseer mayor resistencia.
- Las distintas alternativas para la producción de hierros CADI deben evaluarse tomando en cuenta las distintas variables que conlleva el proceso, desde la fabricación de un hierro nodular con carburos, el proceso de austenización con las variables de temperatura y tiempo, así como la etapa de austemperizado, donde al igual que la austenización es importante el control de la temperatura y tiempo.
- Adicionalmente la producción de CADI estará en aumento, ya que diversos autores argumentan los productos y servicios que puede brindar el hierro CADI en reemplazo de otros materiales con el mismo objetivo a un costo igual o menor.

Referencias

1. Laino S., Sikora J. A. & Dommarco R. C. (2009). *Influence of Chemical Composition and Solidification Rate on the Abrasion and Impact Properties of CADI*. 1239-1245, s.l. : ISI International, Vol. 49:8. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.1239>.
2. Penghui, Y., Hanguang, F., Guolu, L., Jinhai, L., & Xuebo, Z. (2020). *Microstructures and Properties of Carbodic Austempered Ductile Iron Containing Fe₃C particles and Superfine Ausferrite*. 108363, s.l. : Materials & Design, Vol. 186. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108363>.
3. Aly H. A., Nofal A., Hussein A. H. A. & El-Banna E. M. (2020). *Development of Carbodic Austempered Ductile Iron (CADI)*. 163-170, Key Engineering Materials, Vol. 835. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.835.163>.
4. Hayrynen K. L., & Brandenberg K., R. (2003). *Carbodic Austempered Ductile Iron (CADI) – The New Wear Material*. 03-088, s.l. : American Foundry Society, Vol. 111.
5. Smith, W. & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México : McGraw-Hill.
6. Diez, C.J., Fernández, G. R., Ordóñez, U., Mondelo, F. & Fraga, E. (2004). *Efecto del conteo de nódulos en la resistencia a la tracción de los hierros dúctiles austemperados*. 27-35, s.l. : Ingeniería Mecánica, Vol. 7 (1).
7. Pedro, D. I. (2020). *Tribología de Fundición Nodular Austemperada con Carburos: Fatiga de Contacto y Deslizamiento (tesis doctoral)*. Argentina : Universidad Nacional del Mar del Plata.
8. Diez, C. J., Figueroa, C. R., Ordóñez, U., Fernández, G. R. & Mondelo, F. (2008). *Influencia de los factores microestructurales en la resistencia al desgaste por deslizamiento de las fundiciones nodulares austemperadas.// Influence of the microstructure factors in the sliding wear resistance of austempered cast ductile iron*. 21-28, s.l. : Ingeniería Mecánica, Vol. 11(3).
9. Diez, C.J., Fernández, GR., Ordóñez, U. & Fraga, E. (2004). *Efecto del conteo de nódulos en la resistencia al desgaste por abrasión de los hierros dúctiles austemperados*. 17-23, s.l. : Ingeniería Mecánica, Vol. 7 (2).
10. Abel A. Barnabas A. Oyetunji S. O., Seidu Adeolu A., Adediran & Stojanovic E. (2019). *Optimization of parameters of antimony modified carbodic austempered ductile iron (CADI) using Taguchi method*. s.l. : Cogent Engineering, Vol. 6:1. <http://doi.org/10.1080/23311916.2019.1629719>.
11. Zhao, Xb., Yan, Js., Liu, Jh., Fu, Bg., Yang, Wt. & Li, Gl. (2020). *Simulation on stress of large diameter CADI grinding ball based on ANSYS*. 227-234, s.l. : China Foundry, Vols. 17. <https://doi.org/10.1007/s41230-020-9132-4>.

12. Wang, H., Li, Z., Ma, L., Liang, L., Wu, G. & Zhang, X. (2019). *Prediction of CADI Chemical Composition and Heat Treatment Parameters using a BPNN Optimized with the Genetic Algorithm*. 052022, s.l. : IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci, Vols. 233. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/233/5/052022>.
13. *Modern Casting*. (2023). American Foundry Society. North Penny Lane : s.n.
14. *Modern Casting*. (2021). American Foundry Society. North Penny Lane : s.n.
15. WORLD FOUNDRY ORGANIZATION. (2018). *WFO GLOBAL FOUNDRY REPORT 2018. ACTUAL SITUATION OF THE WORLDWIDE CASTING INDUSTRY*. s.l. : WFO.
16. Kalpakjian, S. & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México : Pearson Prentice Hall.
17. ASM Specialty Handbook. (1996). *Cast Irons*. s.l. : ASM International.
18. Nasir, Tanzim. (2011). *"Design of Heat Treatment for Production of Austempered Ductile Iron (ADI) With Targeted Automotive Applications"*, Thesis . s.l. : University of Windsor.
19. Vázquez Gómez, Octavio. (2009). *"Simulación de la evolución térmica y microestructura durante el austemperizado del hierro dúctil"*, Tesis de Maestría. s.l. : Universidad Nacional Autónoma de México.
20. García Hinojosa, J. A., y otros. (2012). *EFFECTO DE LA ADICIÓN DE CROMO Y MOLIBDENO EN LA FORMACIÓN DE CARBUROS EN HIERROS NODULARES*. s.l. : CONAMET/SAM.
21. Aranda Villada, V. A., y otros. *Carbide Dissolution in Unalloyed and Cr Alloyed Nodular Iron*. s.l. : 10 th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron - SPCI10.
22. Aranda Villada, Víctor Antonio. (2010). *Efecto de la Temperatura y Tiempo de Austenización en la Disolución de Carburos en un Hierro Nodular Blanqueado (D 120/90/02 Modificado)*. "Tesis de licenciatura". s.l. : Universidad Nacional Autónoma de México.
23. García Hinojosa, J. A., y otros. (2012). *OBTENCIÓN DE HIERROS NODULARES CON CARBUROS POR ADICIÓN DE Cr Y Mo PARA FABRICAR HIERROS CADI*.
24. Keough, J. R. & Hayrynen K. L. (2000). *Carbide Austempered Ductile Iron (CADI)*.
25. Laino S., Sikora J. A. & Dommarco R. C. (2008). *Development of wear resistant carbide austempered ductile iron (CADI)*. 1-2, s.l. : Wear, Vol. 265. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.08.013>.
26. Peng, Y.-C., Jin, H.-J., Liu, J.-H., & Li, G.-L. (2012). *Influence of Cooling Rate on the Microstructure and Properties of a New Wear Resistant Carbide austempered ductile iron (CADI)*. 53-58, s.l. : Materials Characterization, Vol. 72. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.07>.

27. Pawar, M., Harne, M., & Patil, S. (2015). *Effect of Microstructure on Wear Behavior of Carbide Austempered Ductile Iron (CADI)*. 266-274, s.l. : IJARSE, Vol. 4. <https://doi.org/>
28. Plaza, David. ¿Qué es el árbol de levas? Tipos y averías. *motor.es*. [En línea] [Citado el: 13 de 05 de 2022.] <https://www.motor.es/que-es/arbol-de-levas>.
29. Páginas amarillas Colombianas SAS. Dientes de escavadora. [En línea] [Citado el: 01 de 05 de 2022.] <https://paginasamarillascolombianas.com/comercios/3330/>.
30. John Deere. Arado de vertederas. *Arado de vertederas*. [En línea] 2022. [Citado el: 01 de 05 de 2022.] <https://www.deere.com.mx/es/equipo-de-labranza/arados-de-vertedera/995/>.
31. Detalle el tiro con ruedas y sistema de suspensión de un viejo vagón de tren. *Detalle el tiro con ruedas y sistema de suspensión de un viejo vagón de tren*. [En línea] 2022. [Citado el: 01 de 05 de 2022.] https://es.123rf.com/photo_36758089_detalle-el-tiro-con-ruedas-y-sistema-de-suspensi%C3%B3n-de-un-viejo-vag%C3%B3n-de-tren.html.
32. Wuxi Orient Anti-wear Engineering Co.,Ltd. Revestimiento de molino de bolas. [En línea] 2020. [Citado el: 01 de 05 de 2022.] <http://spanish.ballmillliners.com/>.
33. Keough, J. R., & Hayrynen, K. L. (2000). *Carbide austempered ductile iron (CADI)*. 840-845, s.l. : Ductile Iron News, Vol. 3.
34. Basso A., Laino S. & Dommarco R. (2013). *Wear Behavior of Carbide Ductile Iron with Different Matrices and Carbide Distribution*. 33-40, s.l. : Tribology Transactions, Vol. 56:1. <https://doi.org/10.1080/10402004.2012.725149>.
35. Haiqiang, C., Hanguang, F., Shenqiang, M., Jian, L., & Yongping, L. (2019). *Effects of austenitizing process on microstructures and properties of carbide austempered ductile iron*. s.l. : Materials Research Express, Vols. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aae44c>.
36. Yang, P., Fu, H., Lin, J., Guo, X., & Lei, Y. (2019). *Thermodynamic and Kinetic Analysis of Austenite Homogenization on Carbide Ductile Iron*. 1900256, s.l. : Steel Research International, Vol. <https://doi.org/10.1002/srin.201900256>.
37. Patil S.A., Pathak U.S., & Likhite A. (2014). *Development and Wear Analysis of Carbide Austempered Ductile Iron (CADI)*. 9652-9657, s.l. : International Journal of Innovative Research in Science. Engineering and Technology, Vol. 3. <https://doi.org/>
38. Yang P., Fu H., Absi R., Bennacer R., Darcherif M., Ma S., Lin J. & Guo X. *J Mater Sci. (2021)*. Microstructure evolution of carbide austempered ductile iron at different austempering temperatures, Vols. 56. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05543-0>.
39. Peng, Y.C., Jin, H.J., Liu, J.H., & Li, G.L. (2011). *Effect of boron on the microstructure and mechanical properties of carbide austempered ductile iron*. 321-325, s.l. : Materials Science and Engineering A, Vol. 529. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.034> .
40. Leyva A., J. G., y otros. (2012). *EFFECTO DE LA TEMPERATURA ISOTÉRMICA DE AUSTEMPERIZADO EN LA VENTANA DE PROCESO DE HIERROS CADI ALEADOS CON CROMO Y MOLIBDENO*. s.l. : CONAMET/SAM.

41. García Hinojosa, J. A., Aranda Villada, V. A. y Leyva Álvarez, J. G. *Estudio de la estabilidad de carburos ledeburíticos en hierros nodulares para fabricación de hierros CADI*. s.l. : 15º CONGRESSO DE FUNDIÇÃO DA ABIFA.
42. Hebei Kum-A Hydraulic Machinery Co., LTD. ADI Products. [En línea] [Citado el: 13 de 05 de 2022.] https://en.hbdfkm.com/products_details/961733594515390464.html.
43. Xiamen Ollwinner Industry & Trade Co., Ltd. Cigüeñal nodular Ciguenal del hierro del alto rendimiento para el tamaño estándar de Mercury. [En línea] 2019-2022. [Citado el: 13 de 05 de 2022.] <https://spanish.marine-steeringparts.com/supplier-278453-nodular-iron-crankshaft>.
44. Sun, X., Wang, Y., Li, D. Y., & Wang, G. (2013). *Modification of carbidic austempered ductile iron with nano ceria for improved mechanical properties and abrasive wear resistance*. 116–121, s.l. : Wear , Vol. 301. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.018>.
45. Rivero M., H. D., y otros. *Effect of the ratio Mo/Cr in the precipitation and distribution of carbides in alloyed nodular iron*.
46. Penghui, Y., Hanguang, F., Xiangwei, Z., Jian, L., & Yongping, L. (2019). *Wear behavior of CADI obtained at different austenitizing temperatures*. 105876, s.l. : Tribology International, Vol. 140. <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105876>.
47. Dhanapal, P., & Nazirudeen, M. (2010). *Parameter optimization of carbidic austempered ductile iron using taguchi method*. 473-3482, s.l. : International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(8).
48. Cheng, H., Fu, H., Ma, S., Lin, J. & Lei, Y. (2018). *Effects of austenitizing process on microstructures and properties of carbidic austempered ductile iron*. 016522, s.l. : Materials Research Express, Vols. 6 (1). <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/aae44c>.

Bibliografía

- Cheng, H. F. H. M. S. L. J. & L. Y., 2018. Effects of austenitizing process on microstructures and properties of carbidic austempered ductile iron. 6 (1). [http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/aae44c\(016522\)](http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/aae44c(016522)).
- Dhanapal, P. & N. M., 2010. Parameter optimization of carbidic austempered ductile iron using taguchi method. 2(8) (3473-3482).
- Keough, J. R. & H. K. L., 2000. Carbidic austempered ductile iron (CADI). 3(840-845).
- Penghui, Y. H. F. X. Z. J. L. & Y. L., 2019. Wear behavior of CADI obtained at different austenitizing temperatures. 140. [http://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105876\(105876\)](http://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105876(105876)).
- Rivero M., H. D. y otros, s.f. Effect of the ratio Mo/Cr in the precipitation and distribution of carbides in alloyed nodular iron.
- Sun, X. W. Y. L. D. Y. & W. G., 2013. Modification of carbidic austempered ductile iron with nano ceria for improved mechanical properties and abrasive wear resistance. 301. [http://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.018\(116-121\)](http://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.018(116-121)).
- Modern Casting. American Foundry Society. North Penny Lane: s.n., 2017.