


## Efecto de la temperatura de austemperizado en CADIs aleados con cromo Effect of the austempering temperature in CADIs alloyed with chromium

E. Colin-García <sup>a,\*</sup>, A. Cruz-Ramírez <sup>a</sup>, R.G. Sánchez-Alvarado <sup>a</sup>, M.A. Suarez-Rósaes <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de ingeniería metalúrgica y materiales, ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional, 07738, Zacatenco, CDMX, México.

<sup>b</sup> Departamento de materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, 02200, Azcapotzalco, CDMX, México.

### Resumen

Los hierros dúctiles con carburos tratados térmicamente mediante austemperizado son llamados CADIs. Estos materiales presentan elevadas propiedades de dureza y resistencia al desgaste. En este trabajo, se obtuvieron CADIs aleados con 0.28 %Cr utilizando temperaturas de austemperizado de 265 y 305 °C con tiempos de 30, 60, 90 y 120 min. La caracterización microestructural se llevó a cabo mediante microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos-X, y análisis cuantitativo con el uso del software Image J. La caracterización mecánica mediante dureza Rockwell C y resistencia al desgaste Block-on-ring. Los resultados mostraron que la matriz ausferrítica se obtuvo a los 90 min de austemperizado y la ventana del proceso en un rango de tiempo de entre 60 y 120 min. La mayor fracción volumen de austenita de alto contenido de carbono (14.45 %) se obtuvo en el CADI-305. La dureza más alta de 41 HRC y resistencia al desgaste de 0.42 mm<sup>3</sup> fueron obtenidos en el CADI-265.

**Palabras Clave:** CADI, Austemperizado, ventana del proceso, microestructura, ausferrita.

### Abstract

The ductile irons with carbides inside of metallic matrix that were heat treated through austempering are called CADIs. These materials present high mechanical properties such as hardness and wear resistance. In this work, CADIs alloyed with 0.28 %Cr were obtained using austempering temperatures of 265 and 305 °C together with austempering times of 30, 60, 90 and 120 min. The microstructural characterization was carried out employing the light microscopy, scanning electron microscope, X-ray diffraction, quantitative analysis with Image J software. The mechanical characterization using Rockwell C hardness and Block-on-ring wear resistance. The results showed that the ausferritic matrix was obtained at 90 min of austempering heat treatment, while the window process in the temperatures range from 60 to 120 min. The highest volume fraction of high carbon austenite (14.45 %) was obtained in CADI-305. The highest Rockwell C Hardness of 41 HRC and wear resistance of 0.42 mm<sup>3</sup> were obtained with CADI-265.

**Keywords:** CADI, austempering, window process, microstructure, ausferrite.

### 1. Introducción

El hierro dúctil (HD) también llamado nodular o esferoidal, es un material que se obtiene directamente del proceso de fusión. Generalmente, la microestructura resultante (colada) es de nódulos de grafito libre dentro de una matriz compuesta de ferrita y perlita con o sin carburos. Los hierros dúctiles presentan un correcto balance entre las propiedades mecánicas de ductilidad, resistencia a la tensión e impacto atribuidas a la morfología del grafito, la cual evita y previene la tendencia a la formación o propagación de grietas (Neri & Carreño, 2003).

Los tratamientos térmicos son ampliamente utilizados en los HDs. El austemperizado ha obtenido gran importancia debido a la combinación de las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión, dureza, elongación y energía de impacto.

Un hierro dúctil austemperizado es comúnmente llamado ADI por su acrónimo en inglés (austempered ductile iron). En este tratamiento del tipo isotérmico, se pretende obtener una matriz de ausferrita, la cual está constituida por ferrita acicular ( $\alpha_{Ac}$ ) y austenita de alto contenido de carbono ( $\gamma_{HC}$ ) (Putatunda *et al.*, 2006). En la práctica es difícil obtener esta

\*Autor para la correspondencia: [ecoling1400@alumno.ipn.mx](mailto:ecoling1400@alumno.ipn.mx)

**Correo electrónico:** [ecoling1400@alumno.ipn.mx](mailto:ecoling1400@alumno.ipn.mx) (Eduardo Colin-García), [alcruzz@ipn.mx](mailto:alcruzz@ipn.mx) (Alejandro Cruz-Ramírez), [ricardo.gerardo.sanchez-alvarado@ipn.mx](mailto:ricardo.gerardo.sanchez-alvarado@ipn.mx) (Ricardo Gerardo Sánchez-Alvarado), [risanchez@ipn.mx](mailto:risanchez@ipn.mx), [masuarez@azc.uam.mx](mailto:masuarez@azc.uam.mx) (Miguel Ángel Suarez-Rósaes).

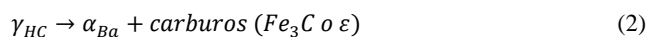
matriz metálica en un solo paso, por esta razón se utilizan diferentes tiempos de austemperizado.

El proceso del tratamiento de austemperizado en los HDs inicia con el austenitizado. Durante esta etapa, los microconstituyentes y fases (perlita, ferrita y carburos no aleados) se transforman en austenita inestable. El rango de temperatura para la austenitización es de entre 850 a 1000 °C. Sin embargo, a temperaturas de 850 °C la reacción de austenitización puede no completarse correctamente obteniendo ferrita pro-eutectoide dentro la ausferrita. A temperaturas de 1000 °C, los granos de austenita inestable crecen excesivamente y se reduce la cantidad de carbono dentro de la austenita inestable, resultando en un incremento de martensita durante el enfriamiento. Por estas razones los hierros dúctiles son austenitizados a temperaturas de 900 °C con tiempos de permanencia de entre 120 a 180 min, con estas condiciones se obtienen granos homogéneos de austenita inestable con una cantidad considerable de carbono para obtener una correcta formación de ausferrita durante el enfriamiento. Al finalizar el austenitizado, las muestras deben trasladarse rápidamente a otro horno con sales fundidas para evitar la formación de perlita en la periferia de la muestra (Wang *et al.*, 2020).

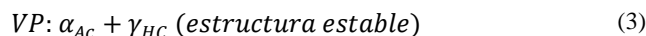
Durante los tiempos isotérmicos se han reportado dos estados de transformación isotérmica. En el estado I, la austenita inestable se transforma en ferrita acicular y austenita de alto contenido de carbono, de acuerdo con la ecuación (1) (Pereloma & Anderson, 2006).



Si el tiempo de austemperizado es largo, ocurre el estado II, representado por la ecuación (2). En este, la austenita de alto contenido de carbono se transforma en ferrita bainítica y carburos del tipo  $Fe_3C$  o  $\epsilon$  (Pereloma & Anderson, 2006).



Dentro de estos dos estados se encuentra un intervalo de tiempo denominado ventana del proceso, donde se obtiene la mayor la cantidad de ausferrita de acuerdo con la ecuación 3 (Pereloma & Anderson, 2006).



Los ADIs, son aleados en general con elementos grafitizantes como el níquel o cobre para incrementar ciertas propiedades mecánicas y obtener mayores contenidos de austenita de alto carbono (Putatunda *et al.*, 2006).

Como un derivado de los ADIs, se han desarrollado los ADIs con carburos también llamados CADIs (carbide austempered ductile iron), los cuales presentan mayor resistencia al desgaste que un ADI convencional (Laino *et al.*, 2008). El proceso para la obtención de un CADI es en esencia el mismo que para un ADI y ocurren los estados de transformación I y II. La matriz metálica de un CADI presenta una fracción volumen controlada de carburos dentro de la matriz ausferrítica (Kristin & Hayrynen, 2002).

Durante el proceso completo de austemperizado para la obtención de CADIs, se debe tener cierto control en la temperatura y tiempo del austenitizado, ya que los carburos ledeburíticos formados por bajo silicio o altas velocidades de

enfriamiento tienden a disolverse y son menos estables que los carburos aleados. (Laino *et al.*, 2009). El método principal para obtener carburos en el hierro dúctil es mediante la adición de elementos aleantes carburizantes (manganeso, vanadio, cromo, molibdeno, y boro) durante el proceso de fusión (Hayrynen & Brandenburg, 2003).

El cromo, incrementa la resistencia a la corrosión del hierro dúctil, especialmente con elevadas adiciones. Es un elemento estabilizador de ferrita e incrementa su dureza inhibiendo la ductilidad. Es un fuerte formador de carburos y modifica la cinética de transformación de la ventana del proceso acelerando los estados I y II (Sadighzadeh, 2015).

Debido a las características que presentan los HDs y CADIs con adiciones de cromo, se han realizado diversas investigaciones, dentro de las que se encuentran; el estudio sobre el efecto del vanadio y cromo sobre la precipitación de carburos en hierros dúctiles ferríticos (Kyeong-hwan *et al.*, 2011). El efecto de la temperatura de austemperizado sobre la corrosión de CADIs aleados con cromo (Mahadik *et al.*, 2017). El efecto de la composición química sobre la temperatura de austemperizado de CADIs aleados con cromo (Gawhare *et al.*, 2015). Sin embargo, la literatura en español sobre los CADIs es muy escasa, por esta razón, este trabajo tiene como objetivo determinar el efecto de la adición de 0.28 %Cr utilizando las temperaturas de austemperizado de 265 y 305 °C sobre matriz ausferrítica y su relación con las propiedades mecánicas de dureza y resistencia al desgaste.

## 2. Metodología experimental

### 2.1. Hierro dúctil

El hierro dúctil aleado con 0.28 %Cr se fabricó en un horno de inducción de corazón sin núcleo de 50 kg. El metal base fue obtenido utilizando 35 % retorno de hierro dúctil, 35 % de acero 1018 y 30 % metal soret. El ajuste químico se realizó con adiciones de FeSi (75 %), FeMn (60 %), grafito como recarburante y FeCr (60 %). El metal en estado líquido con una temperatura de 1496°C fue vaciado en una olla previamente preparada con Noduloy 9C3 para la realización del método sándwich. La inoculación se realizó en el chorro del horno hacia la olla de reacción utilizando Calcifer como inoculante. El metal tratado fue vaciado en moldes de arena en verde con la preforma del modelo de Y-Block convencional, de acuerdo con la Figura 1.



Figura 1. Pieza Y-block obtenida durante el proceso de fusión.

La composición química se obtuvo utilizando un espectrómetro de emisión óptica (Oxford spark) y el promedio de 5 mediciones fue reportado en la Tabla 1. Los contenidos de carbono y azufre de la Tabla 1 fueron determinados mediante un analizador de combustión LECO C/S 744.

Tabla 1. Composición química del HD aleado con 0.28 % Cr (% peso).

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni
3.50	2.50	0.62	0.012	0.011	0.041	0.28	0.11
Al	Cu						
0.02	0.32						

## 2.2. Tratamiento térmico de austemperizado

Se obtuvieron 8 muestras de aproximadamente 1.5 cm<sup>3</sup> de la sección inferior de una Y-Block (zona de trabajo). Las muestras fueron recubiertas con pintura de grafito para evitar la descarburización durante el austenitizado y se les colocó alambre recocido alrededor para su fácil manipulación.

El tratamiento térmico de las muestras se llevó a cabo en dos hornos eléctricos. En el primero se realizó la austenitización a una temperatura de 900 °C con un tiempo de permanencia de 180 min para obtener una correcta transformación hacia austenita inestable, entonces las muestras se retiraron y se pasaron al segundo horno que contenía un crisol de grafito con sales fundidas (50 %KNO<sub>3</sub> y 50 %NaNO<sub>3</sub>). El proceso se realizó para las temperaturas de austemperizado de 265 y 305 °C, de acuerdo con el ciclo térmico mostrado en la Figura 2. Los parámetros de temperatura de austemperizado y mezcla de sales han sido previamente reportados para composiciones similares en ADIs aleados con vanadio (Colín *et al.*, 2021). En adición, la mezcla de sales fue obtenida en base al diagrama KNO<sub>3</sub> y NaNO<sub>3</sub>, mientras que las temperaturas de 265 y 305 °C para obtener ausferrita fina con diferentes cantidades de austenita de alto carbono.

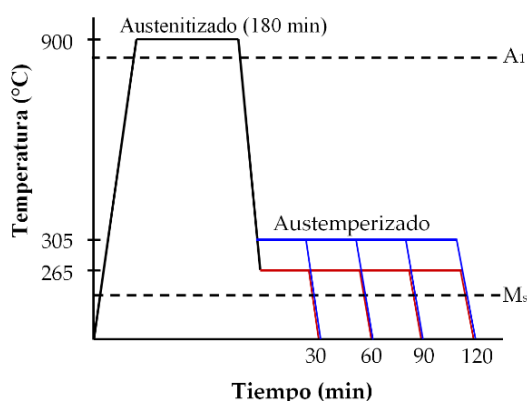


Figura 2. Ciclo de tratamiento térmico de austemperizado para las temperaturas de 265 y 305 °C.

## 2.3. Caracterización microestructural

La caracterización microestructural de colada y CADIs, se llevó a cabo mediante desbaste con papel abrasivo de granulometrías 180, 220, 320, 400, 600 y 1000. El pulido se realizó con un paño de pelo corto y alúmina en polvo de 0.3 μm. Ataques con nital 3 % y persulfato de amonio 10% se realizaron para evidenciar las fases y microconstituyentes

presentes, estos reactivos revelan completamente las microestructuras presentes en los HDs y CADIs (Pedro & Dommarco, 2019). Se obtuvieron imágenes en condición de pulido, con ataque de nital y persulfato de amonio a 100 aumentos con un microscopio óptico (Olimpus PMG-3).

Las fases obtenidas en los CADIs para las temperaturas y tiempos de austemperizado, fueron analizadas mediante la técnica de difracción de rayos X en un difractómetro Bruker D8 con radiación monocromática Cu K<sub>α1</sub>, los datos se obtuvieron en un rango de 45 a 100 grados.

Se obtuvieron imágenes de la matriz ausferrítica (90 min) para las temperaturas de 265 y 305 °C, utilizando un microscopio electrónico de barrido (JEOL modelo 6300) con electrones retrodispersados a 20 kV. Además, se realizó un análisis de mapeo y EDS para el análisis de los carburos contenidos dentro de los CADIs.

El análisis cuantitativo para el HD en condición de colada se realizó mediante el software Image J y las imágenes a 100 aumentos. Partículas de grafito menores a 10 μm no se reportaron en el conteo de partículas. El tamaño de nódulo promedio se obtuvo considerando una esfericidad superior a 0.65, mientras que la nodularidad utilizando la ecuación (4) (Ruxunda *et al.*, 2002)

$$\% \text{Nod} = \frac{\text{Area de nodulos}}{\text{Area de particulas totales}} \times 100 \quad (4)$$

En los CADIs se obtuvo la austenita de alto carbono con el uso de los difractogramas y modelos matemáticos ampliamente utilizados (5-7) (Miller, 1964).

$$\gamma_{HC} = \frac{1.4I_{\gamma}}{I_{\alpha} + 1.4I_{\gamma}} \quad (5)$$

$$I_{\gamma} = \frac{I_{\gamma 200} + I_{\gamma 311}}{2} \quad (6)$$

$$I_{\alpha} = I_{\alpha 211} \quad (7)$$

donde  $I_{\gamma}$  y  $I_{\alpha}$  son las intensidades de los picos (hkl) de las fases  $\gamma$  y  $\alpha$

## 2.4. Propiedades mecánicas

El tamaño y la geometría de los especímenes para los ensayos mecánicos de dureza y desgaste Block-on-ring fueron obtenidos de las normas ASTM E 18 y ASTM G 77, respectivamente. Las muestras para el desgaste se obtuvieron en CADIs obtenidos a 90 min en un equipo TE 53SLIM, mientras que la dureza se obtuvo para cada tiempo de austemperizado utilizando un indentador piramidal de punta de diamante con una carga de 150 kg de acuerdo con la escala Rockwell C, en un durómetro Wilson 3T TBRB. Los ensayos se llevaron a cabo a temperatura ambiente y se reportó el promedio de tres muestras con su desviación estándar.

## 3. Resultados y análisis

### 3.1. Hierro dúctil

La Figura 3 muestra la microestructura del hierro dúctil en condición de colada. Es evidente una correcta distribución de

nódulos de grafito dentro de una matriz perlítico-ferrítica con carburos atribuidos a la adición de cromo con morfología de tipo placa correctamente distribuidos.

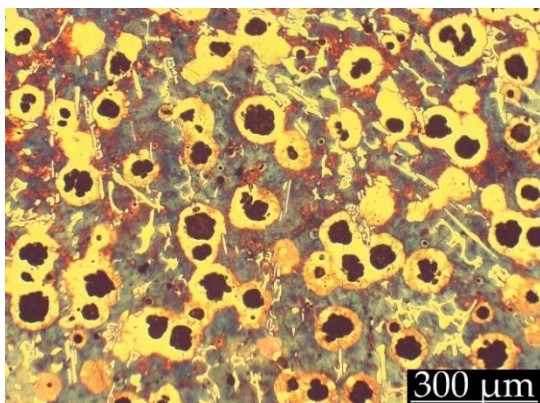


Figura 3. Microestructura en condición de colada del hierro dúctil.

El análisis cuantitativo del hierro dúctil mostró un conteo de partículas de grafito de 252 part/mm<sup>2</sup> y un tamaño de nódulo promedio de 46.32 μm. Sin embargo, la nodularidad obtenida de 79.32 %, se encontró por debajo del estándar de hierros dúctiles utilizados para austemperizado 85 % (Hayrynen, 2002). Este comportamiento se atribuyó a la adición de cromo, ya que este elemento tiene un efecto negativo en la formación de los esferoides de grafito (Sadighzadeh, 2015).

La fracción volumen de carburos fue de 5.8 %. La fracción volumen de perlita (53.3 %) fue mayor que la de ferrita (30.6 %), mientras que la de grafito fue de 10.3 %.

### 3.2. Hierro dúctil austemperizado con carburos

La Figura 4 muestra la evolución microestructural del CADI-265. A los 30 minutos de austemperizado, se formó una elevada cantidad de martensita y baja cantidad de ausferrita debido al corto tiempo de austemperizado. Al incrementar el tiempo a 60 min disminuyó la cantidad de martensita e incrementó la de ausferrita. A los 90 min se obtuvo una matriz de ausferrita, mientras que a los 120 min se evidenció la formación de ferrita bainítica. La evolución microestructural del CADI-305 fue similar, sin embargo, debido al incremento de temperatura, mostró una mayor cantidad de austenita de alto carbono.

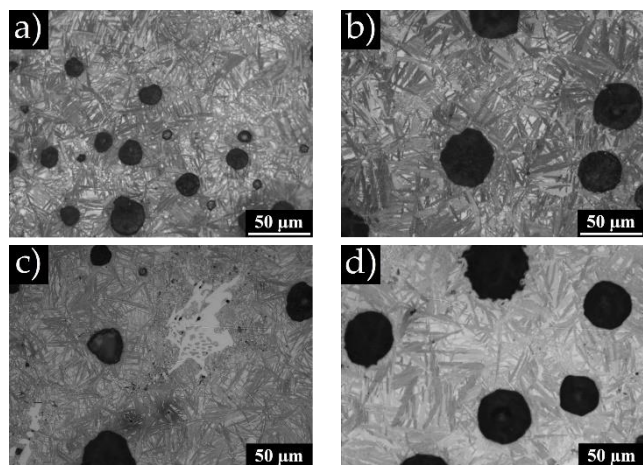


Figura 4. Micrografías del tratamiento térmico de austemperizado a 265 °C para diferentes tiempos isotérmicos a) 30, b) 60, c) 90 y d) 120 min.

La Figura 5 muestra las microestructuras MEB de la matriz de los CADIs. Las microestructuras son el resultado del conjunto de temperaturas de austemperizado de 265 y 305 °C con un tiempo de 90 min, en el cual se obtuvo la matriz de ausferrita.

En las imágenes se observan carburos inmersos en una matriz metálica de ausferrita (ferrita acicular y austenita de alto contenido de carbono). Sin embargo, en el CADI-265, la ferrita acicular es más fina y con menor tamaño, además, la fracción volumen de austenita de alto carbono es menor que en el CADI-305. Este comportamiento se atribuyó a la velocidad de transformación en estado sólido. Durante el proceso de austemperizado, la ferrita se forma a partir de la austenita inestable mediante un proceso de nucleación y crecimiento. A bajas temperaturas de tratamiento térmico como 265 °C, el super enfriamiento es mayor que a temperatura de 305 °C, por lo tanto, la tasa de nucleación es más elevada y mayor cantidad de ferrita logra nuclear. A medida que la ferrita acicular se forma, el carbono tiene que difundir desde la austenita inestable para que la ferrita acicular incremente su tamaño, sin embargo, debido a la baja temperatura (265 °C) la velocidad de difusión es muy lenta, resultando pequeños bloques de austenita de alto contenido de carbono (Putatunda & Gadicherla, 2000).

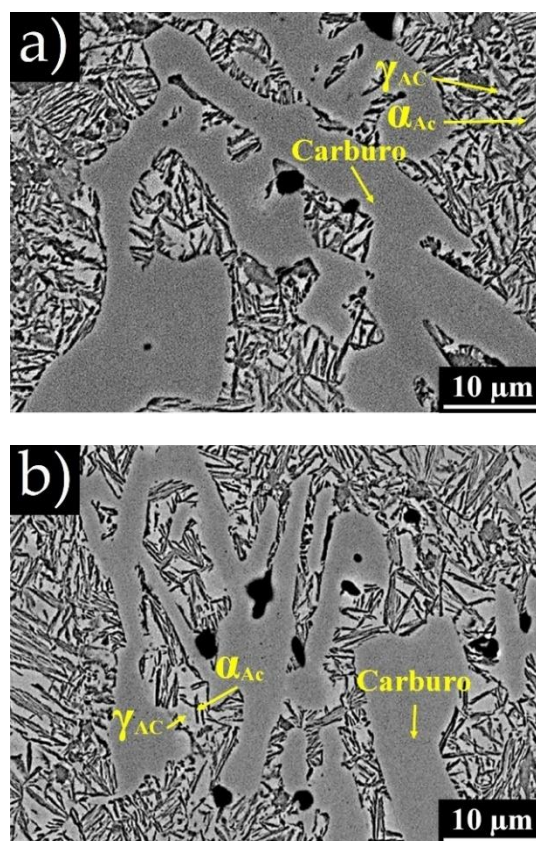


Figura 5. Microestructuras de los CADIs obtenidos a temperaturas de austemperizado de a) 265 °C y b) 305 °C

La Figura 6 muestra un análisis de mapeo y MEB-EDS de los carburos en el CADI-265. De acuerdo con las imágenes, se observa que el hierro y el carbono se encuentran dispersos homogéneamente dentro de la ausferrita y carburos, mientras que el silicio dentro de la ausferrita. El cromo y el manganeso se distribuyeron principalmente en los carburos.

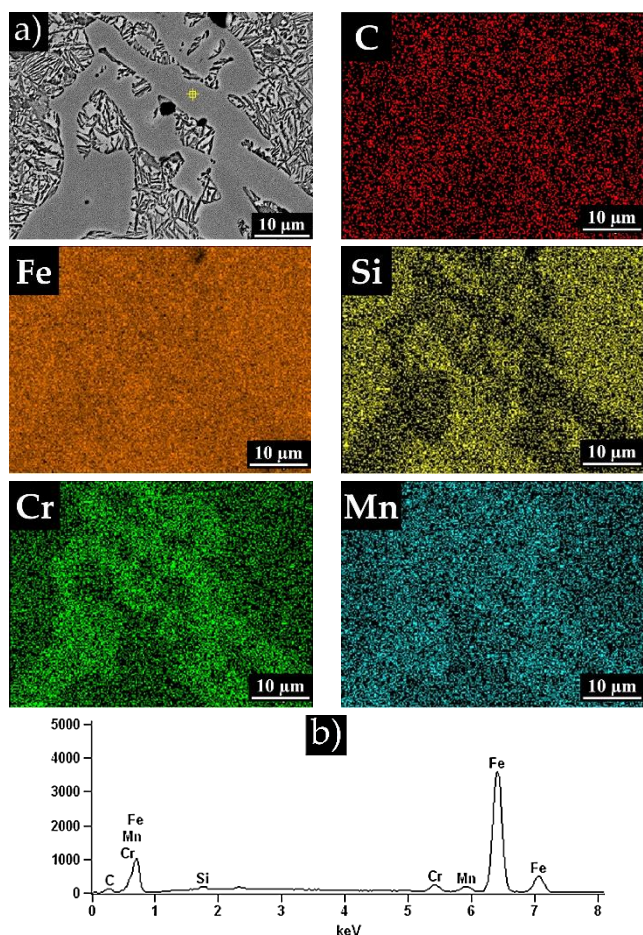


Figura 6. Análisis MEB a) Mapeo y b) EDS de carburos del CADI-265.

La Figura 7 muestra los difractogramas obtenidos al tiempo de 90 min y las temperaturas de austemperizado de 265 y 305 °C. Los planos de la ferrita acicular presentes fueron (110), (200), (211) y (310), mientras de la austenita de alto contenido de carbono fueron (111), (200), (220) y (311). Debido a la baja fracción volumen de los carburos, no se reportaron picos de difracción. Los planos identificados en este trabajo para la ausferrita, han sido reportados previamente en CADIs con elevadas fracciones volumen de carburos (Becerra *et al.*, 2022).

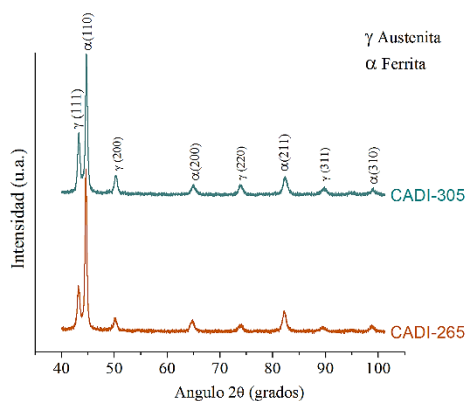


Figura 7. Difractogramas del tiempo de 90 min para las temperaturas de austemperizado de 265 y 305 °C.

La Figura 8 muestra la fracción volumen de austenita de alto contenido de carbono de los CADIs a las temperaturas de 265 y 305 °C. Durante los primeros 30 min de austemperizado en

el CADI-265, se obtuvo gran cantidad de martensita y baja cantidad de ausferrita, por esta razón la fracción volumen de austenita fue la menor (9.92 %). Al incrementar el tiempo de austemperizado a 60 min, la cantidad de martensita decreció incrementando la cantidad de ausferrita, obteniendo mayor cantidad de austenita (10.32 %). Los dos tiempos de transformación isotérmica se encontraron en el estado I de austemperizado.

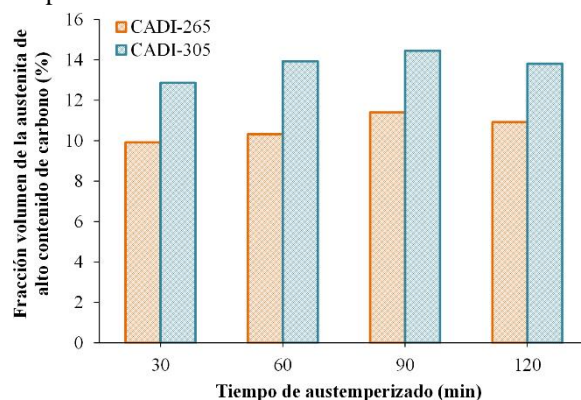


Figura 8. Efecto del tiempo y temperatura de austemperizado sobre la formación de la austenita de alto contenido de carbono.

A los 90 min de austemperizado, se obtuvo la mayor fracción volumen de austenita de alto contenido de carbono (11.4 %). A los 120 min, se obtuvo una menor fracción volumen de austenita de alto contenido de carbono (10.92 %), este comportamiento se atribuyó a la descomposición de la austenita de alto carbono hacia bainita, de acuerdo con el estado II de austemperizado. Un comportamiento similar ocurrió en el CADI-305 °C.

La austenita de alto carbono es un indicativo de la matriz ausferrítica y de la ventana del proceso. La mayor fracción volumen se asocia a la maximización de la matriz ausferrítica, mientras que el tiempo anterior y posterior a este máximo determina la ventana del proceso (Parhad *et al.*, 2012). En este sentido, la matriz de ausferrita se obtuvo a los 90 min, mientras que la ventana del proceso se determinó en el intervalo de tiempos de entre 60 y 120 min. Un comportamiento similar fue reportado previamente para una ventana del proceso en ADIs aleados con 0.2 %Cr a temperaturas de 350 °C en un intervalo de tiempo de entre 45 y 120 min (Bedolla *et al.*, 2020).

### 3.3. Propiedades mecánicas de los CADIs

Los carburos de cromo son estables durante la etapa de austenitización (Patil *et al.*, 2014), por esta razón se consideró que la fracción volumen de carburos (5.8 %) fue la misma en la microestructura de colada y en los CADIs obtenidos a los diferentes tiempos de austemperizado, por lo tanto, el cambio de dureza se atribuyó a las fases presentes.

La Figura 9, muestra los resultados de dureza para las muestras de colada y CADIs obtenidos a temperaturas de 265 y 305 °C y tiempos de 30, 60, 90 y 120 min. Las durezas más altas, se obtuvieron en el CADI-265, este comportamiento se atribuyó a la ausferrita fina compuesta principalmente por ferrita acicular y una baja fracción volumen de austenita de alto contenido de carbono. Es evidente que la dureza más elevada se obtuvo en los primeros 30 min de austemperizado (51 HRC), debido a que durante el enfriamiento se generó una gran cantidad de martensita y baja cantidad de ausferrita. Al

incrementar el tiempo a 60 min disminuyó la formación de martensita incrementado la ausferrita dentro de la matriz generando una menor dureza (46 HRC). A los 90 min se presentó la dureza más baja (41 HRC) debido a que en este tiempo se obtuvo la matriz de ausferrita. Al continuar con la transformación isotérmica a 120 min, la dureza fue constante.

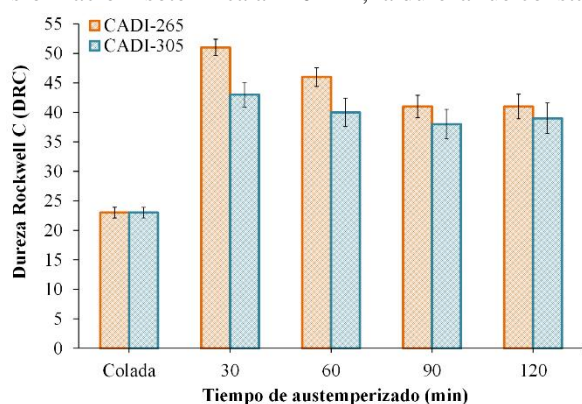


Figura 9. Efecto de la temperatura de austemperizado sobre la dureza Rockwell C.

El CADI-305°C mostró un comportamiento similar con el incremento del tiempo de austemperizado, sin embargo, las menores durezas fueron atribuidas al crecimiento de las fases en la ausferrita (ferrita acicular y los bloques de austenita de alto carbono), además del incremento de la fracción volumen de la austenita de alto contenido de carbono.

La austenita es una fase blanda, es decir, presenta baja dureza (Salazar *et al.*, 2022), por lo tanto, el incremento en su fracción volumen decrece la dureza (Yun *et al.*, 2012). Un comportamiento similar en las durezas obtenidas bajo temperaturas de austemperizado 250 y 325 °C fue reportado previamente en CADIs aleados con cromo (Mahadik *et al.*, 2017).

La Figura 10, muestra los resultados de desgaste del HD y de los CADIs obtenidos a 90 min y temperaturas de 265 y 305 °C. Los dos CADIs presentaron menor pérdida de volumen que la muestra de colada. Este comportamiento se atribuyó a la matriz de ausferrita, la cual presentó mayor dureza que la estructura de colada. En general al incrementar la dureza, la resistencia al desgaste es mayor (Han *et al.*, 2015).

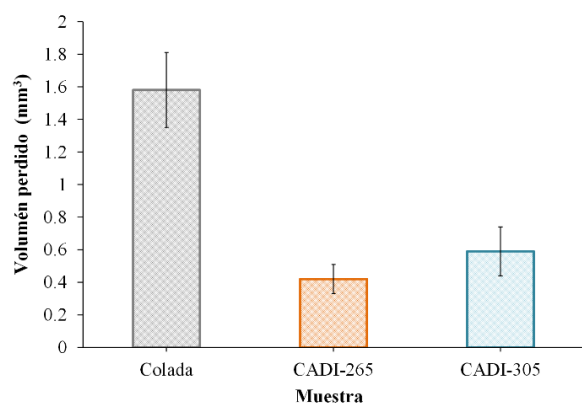


Figura 10. Efecto de la temperatura de austemperizado sobre la resistencia al desgaste.

La temperatura de austemperizado afectó la resistencia al desgaste de los CADIs obtenidos. La menor pérdida de volumen de 0.42 mm<sup>3</sup> fue obtenida en el CADI-265, este

comportamiento se atribuyó a la ausferrita fina compuesta principalmente por ferrita acicular y una baja fracción volumen de austenita de alto contenido de carbono (Zhou *et al.*, 1993).

El CADI-305, mostró una mayor pérdida de volumen de 0.59 mm<sup>3</sup> debido al crecimiento en el tamaño de las fases de la ausferrita y al incremento la fracción volumen de la austenita de alto contenido de carbono. La austenita es una fase con baja dureza por lo tanto al incrementar su contenido la dureza fue menor (Sellamuthu *et al.*, 2018). Un comportamiento similar en la resistencia al desgaste bajo diferentes temperaturas fue obtenido en CADIS aleados con vanadio y un rango de temperaturas de entre 220 a 320 °C (Han *et al.*, 2015).

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se realizó la evaluación de un hierro dúctil aleado con 0.28 %Cr tratado térmicamente mediante austemperizado a temperaturas de 265 y 305 °C durante intervalos de tiempo de 30, 60, 90 y 120 min. Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

1. La ventana del proceso para el tratamiento de austemperizado, se obtuvo en el intervalo de tiempo de 60 y 120 min, maximizando la matriz de ausferrita a los 90 min para las temperaturas de austemperizado de 265 y 305 °C.
2. La mayor fracción volumen de austenita de alto contenido de carbono (14.45 %), se obtuvo con la temperatura de austemperizado de 305 °C. Mientras que al disminuir la temperatura a 265 °C se obtuvo una fracción volumen de 11.4 %.
3. Las propiedades mecánicas de dureza Rockwell C y resistencia al desgaste incrementan con bajas temperaturas de austemperizado obteniendo las mayores en el CADI-265 con 41 HRC y 0.42 mm<sup>3</sup>, respectivamente.

#### Agradecimientos

Los autores desean agradecer a las Instituciones CONAHCYT, Estancias posdoctorales por México, SNI y SIP-Instituto Politécnico Nacional, por su permanente asistencia al grupo de metalurgia de procesos del departamento de ingeniería metalúrgica y materiales de ESIQIE.

#### Referencias

- Becerra-Mayorga C. Y., Vargas-Ramírez M., Cruz-Ramírez A., García-Serrano J., Colín-García E., (2022). Ventana óptima de hierro dúctil austemperizado con aleantes carburizadores. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingeniería del ICBI* 10, 118-124.  
DOI: 10.29057/icbi.v10iEspecial7.9823
- Bedolla-Jacuinde, A., Hernandez-Hernandez, R. A., Vapeani Guerra F., Mejia I., (2020). The role of chromium during austempering of ductile iron. *Metallurgical Research & Technology* 117, 2020.  
DOI: 10.1051/etal/2019072
- Colín García E., Cruz Ramírez A., Reyes Castellanos G., Chávez Alcalá J. F., Téllez Ramírez J., Magaña Hernández A., (2021). Heat treatment evaluation for camshafts production of ADI low alloyed with vanadium. *Metals* 11, 1-23.  
DOI: 10.3390/met11071036
- Gawhare S., Harne M., Patil S., (2015). Effect of chemical composition and austempering temperature on properties of CADI. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science* 3, 184–193.

- Han Ch. F., Sun Y. F., Wu Y., Ma Y. H., (2015). Effects of vanadium and austempering temperature on microstructure and properties of CADI. *Metallography, Microstructure, and Analysis* 4, 135–145.  
DOI: 10.1007/s13632-015-0197-1
- Hayrynen K. L., (2002). The production of austempered ductile iron (ADI). *World conference on ADI*, 1-6.
- Hayrynen K. L., K. R. Brandenburg, (2003). Carbide austempered ductile iron (CADI) - the new wear material. *Transactions of American Foundry Society* 111, 1–6.
- Kristin R. B., Hayrynen K. L., (2002). Agricultural applications of austempered ductile iron. *World conference on ADI*, 135-142.
- Kyeong-hwan C., Kyoung-mook L., Snag-mok L., Kyong-whoan L., (2011). The effect of vanadium and chromium on the precipitation of carbide in Si-Mo ferritic ductile cast iron. *Key Engineering Materials* 457, 102-107.  
DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.457.102
- Laino S., Sikora J. A., Dommarco R. C., (2008). Development of wear resistant carbide austempered ductile iron (CADI). *Wear* 265, 1–7.  
DOI: 10.1016/j.wear.2007.08.013
- Laino S., Sikora J. A., Dommarco R. C., (2009). Influence of chemical composition and solidification rate on the abrasion and impact properties of CADI. *ISIJ International* 49, 1239–1245.  
DOI: 10.2355/isijinternational.49.1239
- Mahadik S. P., Harne M. S., Raka V. B., (2017). Study on the effect of austempering temperature and time on the corrosion resistance of carbide austempered ductile iron (CADI) material. *Journal of Advances in Science and Technology* 13, 234-240.
- Miller R. L., (1964). A rapid method for the determination of retained austenite. *Transactions ASM* 57, 892-899.
- Neri M.A., Carreño C., (2003). Effect of copper content on the microstructure and mechanical properties of a modified nodular iron. *Materials Characterization* 51, 219-224.  
DOI: 10.1016/j.matchar.2003.09.001
- Parhad P., Umale S., Likhite A., Bhatt J., (2012). Characterization of inoculated low carbon equivalent iron at lower austempering temperature. *Transactions of the Indian Institute of Metals* 65, 449–458.  
DOI: 10.1007/s12666-012-0150-9
- Patil S. A., Pathak S. U., Likhite A., (2014). Development and wear analysis of carbide austempered ductile iron (CADI). *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 3, 9652–9657.
- Pedro D. I., Dommarco R. C., (2019). Rolling contact fatigue resistance of carbide austempered ductile iron (CADI). *Wear* 418-419, 94-101.  
DOI: 10.1016/j.wear.2018.11.005
- Pereloma E. V., Anderson C. S., (2006). Microstructure and properties of austempered ductile iron subjected to single and two step processing. *Materials Science and Technology* 22,1112–1118.  
DOI: 10.1179/174328406X114216
- Putatunda S. K., Gadicherla P. K., (2000). Effect of austempering time on mechanical properties of a low manganese austempered ductile iron. *Journal of materials Engineering and Performance* 9, 193–203.  
DOI: 10.1361/105994900770346150
- Putatunda S. K., Kesani S., Tackett R., Lawes G., (2006). Development of austenite free ADI (Austempered ductile iron). *Materials Science and Engineering: A* 435-436, 112-122.  
DOI: 10.1016/j.msea.2006.07.051
- Ruxunda R. E., Stefanescu D. M., Pivonka T. S., (2002). Microstructure characterization of ductile thin wall iron castings. *AFS Transactions* 02-177, 1-17.
- Sadighzadeh B. A., (2015). Effect of alloying elements on austempered ductile iron (ADI) properties and its process: Review. *China Foundry* 12, 54–70.
- Salazar Ferrel F. G., Soria Aguilar M. J., Carrillo Pedroza F., (2022). Efecto de los tratamientos térmicos sobre las propiedades mecánicas de aceros al carbono. *CienciAcierta* 73, 1-15.
- Sellamuthu P., Harris Samuel D. G., Dinarakan D., Premkumar V. P., Li Z., (2018). Austempered ductile iron (ADI): Influence of austempering temperature on microstructure, mechanical and wear properties and energy consumption. *Metals* 8, 1-12.  
DOI: 10.3390/met8010053
- Wang B., Baber G. C., Qiu F., Zou Q., Yang H., (2020). A review: phase transformation and wear mechanisms of single-step and dual-step austempered ductile irons. *Journal of Materials Research and Technology* 9, 1054-1069.
- Yun-Cheng P., Hui-Jin J., Jin-Hai L., Gou-Lu L., (2012). Influence of cooling rate on the microstructure and properties of a new wear resistant carbide austempered ductile iron (CADI). *Materials Characterization* 72, 53-58.
- Zhou W.-S., Zhou Q.-D., Meng S.-K., (1993). Lubricated sliding and rolling wear of austempered ductile iron. *Wear* 162-164, 696-702.  
DOI: 10.1016/0043-1648(93)90068-W