

## Efecto del austemperizado en un hierro dúctil aleado con cromo y niobio

### Effect of austempering on a ductile iron alloyed with chromium and niobium

E.P. Jiménez García <sup>a,\*</sup>, C.Y. Becerra Mayorga <sup>a</sup>, M. Vargas Ramírez <sup>b</sup>, E. Cardoso Legorreta <sup>b</sup>,  
J. García Serrano <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

#### Resumen

Se realizó el tratamiento térmico de austemperizado a un hierro dúctil y a un hierro dúctil aleado con 0.22 % Nb y 0.18 % Cr para análisis metalográfico y mecánico. Preparando 5 muestras de cada material. Tanto el hierro dúctil como el hierro dúctil aleado Cr-Nb se sometieron al proceso de austenitizado a 900 °C durante 60 minutos. Posteriormente muestras de ambos hierros se austemperizaron a temperaturas de 250 °C, 280 °C, 310 °C, 340 °C y 370 °C, respectivamente por 60 minutos. Generando una mezcla de fases constituida por ausferrita y austenita retenida. Se evaluaron las microestructuras y se realizaron los cálculos correspondientes obteniendo un mayor número de nódulos (nódulos/mm<sup>2</sup>), nodularidad (%) y esferoidad (S) a 250 °C y 280 °C para el HDA y a 280 °C y 340 °C para el HDA Cr-Nb. Adicionalmente se evaluó la energía absorbida en la prueba de impacto Charpy, el mayor valor obtenido fue de (14 J) en la muestra a 340 °C de HDA Cr-Nb y el menor (8 J) a 280 °C de un HDA.

#### Palabras Clave:

Austemperizado, Austenitizado, Hierro dúctil austemperizado (HDA), Prueba de impacto Charpy, Ausferrita

#### Abstract

The austempering heat treatment was carried out on ductile iron and ductile iron alloyed with 0.22% Nb and 0.18% Cr for metallographic and mechanical analysis. Five samples of each material were prepared. Both the ductile iron and the Cr-Nb alloyed ductile iron were subjected to the austenitizing process at 900 °C for 60 minutes. Subsequently, samples of both irons were austempered at temperatures of 250 °C, 280 °C, 310 °C, 340 °C, and 370 °C, respectively, for 60 minutes. This process generated a mixture of phases consisting of ausferrite and retained austenite. The microstructures were evaluated, and the corresponding calculations were made, resulting in a higher number of nodules (nodules/mm<sup>2</sup>), nodularity (%), and sphericity (S) at 250 °C and 280 °C for the HDA and at 280 °C and 340 °C for the Cr-Nb HDA. Additionally, the energy absorbed in the Charpy impact test was evaluated, with the highest value obtained being 14 J in the 340 °C sample of Cr-Nb HDA and the lowest 8 J at 280 °C of an HDA.

#### Keywords:

Austempering, Austenitized, Austempered ductile iron (ADI), Charpy impact test, Ausferrite.

#### 1. Introducción

Los hierros contienen un porcentaje de carbono mayor de 2.11% hasta un 6.67%, representados en el segmento A-B en la figura 1. Se pueden observar las fases que comprenden a los hierros, como lo son austenita, perlita, ledeburita y cementita, las cuales tienen lugar en el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C, que se encuentra en equilibrio estable, donde se muestran diferentes temperaturas y porcentajes de carbono correspondientes a las fases presentes. (Handbook,1990), (Davydov *et al*;2023).

Este diagrama es fundamental para comprender las transformaciones microestructurales que experimentan los diferentes tipos de fundiciones de hierro durante el tratamiento térmico.

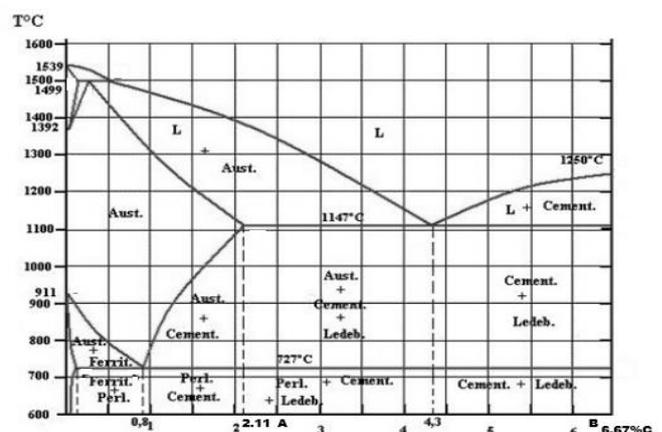


Figura 1: Diagrama Fe – Fe<sub>3</sub>C (Handbook,1990).

\*Autor para la correspondencia: jj419244@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: jj419244@uaeh.edu.mx (Evelyn Pamela Jiménez García), be260308@uaeh.edu.mx (César Yeshua Becerra Mayorga), marissav@uaeh.edu.mx (Marissa Vargas Ramírez), edgarc@uaeh.edu.mx (Edgar Cardoso Legorreta), jserrano@uaeh.edu.mx (Jesús García Serrano).

Comprender y utilizar este diagrama es crucial para optimizar las propiedades mecánicas tanto como las microestructurales, así como el rendimiento de los hierros dúctiles en diversas aplicaciones industriales. (Handbook, 1990), (Al-Sayed et al;2024).

La composición química del hierro dúctil (HD) varía dependiendo del grado de aleación requerido para las aplicaciones específicas. Sin embargo, el hierro dúctil consiste principalmente en hierro (Fe) y carbono (C), con adiciones de otros elementos para mejorar sus propiedades. (Chávez et al;2009),(Dos Santos,2023).

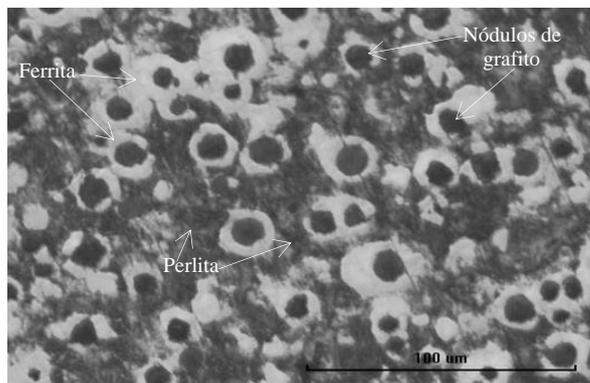
Algunos de los elementos comunes presentes en el hierro dúctil se encuentran en la tabla 1:

**Tabla 1:** Elementos de la aleación de Hierro Dúctil (Frank,2020), (Chávez et al;2009).

Composición química		
Elemento	Porcentaje (%)	Efectos
Hierro (Fe)	91 – 95%	Es el componente principal y proporciona la estructura básica del material.
Carbono (C)	3.2 - 4.2%	Se encuentra en forma de grafito esferoidal, lo que le confiere al material su ductilidad y resistencia.
Silicio (Si)	1 – 3%	Promueve la formación de grafito esferoidal y mejora la fluidez durante la fundición.
Manganeso (Mn)	0.1 – 1%	Controla la formación de grafito y mejora la resistencia y la tenacidad.
Azufre (S)	0.005 – 0.02%	Son considerados impurezas y se mantienen a niveles bajos para evitar efectos adversos en las propiedades mecánicas.
Fósforo (P)	0.005 – 0.04%	

Además de estos elementos principales, pueden añadirse pequeñas cantidades de otros elementos como magnesio, cobre, níquel o cromo para ajustar aún más las propiedades del hierro dúctil según las necesidades específicas de la aplicación. Es importante destacar que la composición química exacta puede variar según el grado de aleación requerido para la aplicación particular. (Dos Santos, 2023).

En el hierro dúctil se encuentra carbono en forma de grafito esferoidal (nódulos) debido a la adición de elementos nodulizantes como el cesio o el magnesio. Estos elementos actúan como desulfurantes y desoxidantes lo que permite una mejor formación de nódulos de grafito dispersos dentro de una matriz de ferrita y perlita, la cual podemos apreciar en la figura 2. (Handbook, 1990), (Becerra et al;2022).



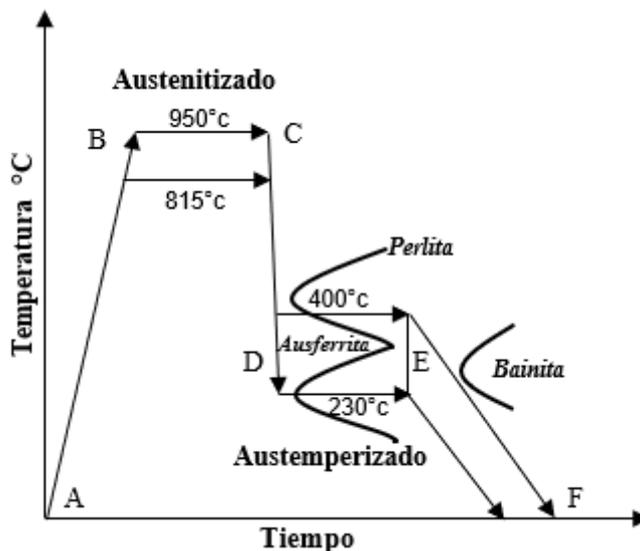
**Figura 2:** Microestructura de Hierro dúctil (Jiménez, 2024).

Altos grados de ductilidad presentan una matriz ferrítica y grados de alta resistencia tienen una matriz perlítica, se recomienda una matriz perlítica ferrítica para tener propiedades óptimas. (Becerra et al;2022), (Wang et al;2022).

Las propiedades de resistencia al desgaste del hierro dúctil austemperizado (HDA) son casi cuatro veces mayores que la del hierro dúctil perlítico. (ASTM,2019).

El tratamiento térmico de austemperizado consta de dos etapas. La primera etapa es el austenizado en un rango de temperatura de 815 a 950 °C representado en el segmento A-B de la figura 3, donde se muestra el incremento de la temperatura de austenizado. En el segmento B-C la pieza se mantiene por un tiempo de entre 1 a 4 horas, donde la matriz de fundición (perlítica, ferrítica) se transforma en austenita y también hay un enriquecimiento de austenita con hasta un 1.8-2.2 % de carbono de los nódulos de grafito, siendo térmica y mecánicamente estable sin formación de martensita. (Abioye et al;2017).

Seguido por un enfriamiento rápido en baño de sales, representado en el segmento C-D, donde luego las piezas son mantenidas isotérmicamente a la temperatura de austemperizado, en un rango de 230 a 400 °C durante el tiempo necesario para dar lugar a la transformación, procedimiento que se ilustra en el segmento D-E. En el segmento E-F observamos el enfriamiento desde la temperatura de austemperizado hasta la temperatura ambiente. (Becerra et al;2022), (Liu et al;2023).

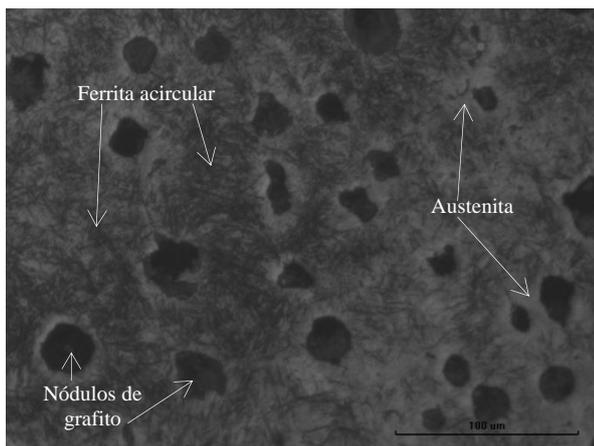


**Figura 3:** Diagrama de tratamiento de Austemperizado (Becerra et al;2022).

A temperaturas de austemperizado más altas (rango bainítico superior), producen una ferrita más gruesa pero una menor fracción de volumen de ferrita; la estructura de ferrita nuclea y crece en austenita, produciendo una menor resistencia a la tracción. Las temperaturas de austemperizado más bajas producen una ferrita más fina y con mayores fracciones de volumen y una resistencia a la tracción más alta. La naturaleza de la microestructura de ausferrita depende no solo del tiempo de austemperizado sino también de la temperatura. (Abioye *et al*;2017), (Górny *et al*;2014).

El hierro dúctil tratado con el método de austemperizado exhibe una microestructura que contiene grafito esférico inmerso en una matriz que usualmente constituye una mezcla de fases conocida como ausferrita. Existen diversas fases presentes, si bien las óptimas son la ferrita acicular y la austenita de alto contenido de carbono retenido. (Abioye *et al*; 2017).

En la figura 4 se aprecia una microestructura típica de un hierro dúctil austemperizado.



**Figura 4:** Microestructura de hierro dúctil austemperizado a 340°C durante 60 minutos (Jiménez,2024).

El hierro dúctil austemperizado (HDA) tiene enormes aplicaciones y ventajas técnicas debido a que posee mayor resistencia a la tracción que un hierro gris, dureza y resistencia al desgaste similares, junto con una ductilidad, elongación, tenacidad y resistencia al impacto térmico sustanciales, tiene menor densidad que el acero forjado, además de mayor maquinabilidad. (Abioye *et al*;2017),(Becerra *et al*;2022), (ASTM,2019).

El tratamiento térmico de austemperizado es un método general para producir una estructura de matriz ausferrítica en hierro dúctil. (Abioye *et al*;2017).

Los elementos aleantes juegan un papel crucial en la microestructura resultante, las propiedades mecánicas y los parámetros críticos del proceso. Sin embargo, es importante utilizar solo la cantidad necesaria, ya que un exceso de estos elementos podría afectar negativamente la calidad del hierro dúctil austemperizado.(Becerra *et al*;2022). Este trabajo se enfoca en el cromo y el niobio como elementos de aleación a estudiar.

La adición de cromo mejora su resistencia a la corrosión ya que promueve la formación de una película de óxido protectora en la superficie del hierro dúctil y aumenta su resistencia al desgaste. Se disuelve en la matriz ferrítica y estabiliza la ferrita permitiendo una mayor resistencia mecánica y dureza, además la presencia de cromo puede influir en la nucleación y crecimiento de diferentes fases durante el proceso de tratamiento térmico, lo

que puede resultar en una microestructura más fina y uniforme. (Becerra *et al*;2022), (Frank,2020).

El niobio es un elemento microaleante que tiene un efecto retardante sobre la cinética de recristalización de la austenita, llegando a modificar las condiciones de transformación de la austenita y por efectos de precipitación endurece la ferrita. El niobio sirve de igual manera como estabilizador de esta fase, además mejora su resistencia a la deformación, fractura y fatiga. (Frank,2020),(Jiménez *et al*;2015), (Geib *et al*;1980).

Ambos elementos son formadores de carburos, los cuales se segregan en los límites de granos eutécticos durante la solidificación, lo que aumenta la resistencia del material al desgaste y a la abrasión. (Becerra *et al*;2022), (Sharun *et al*;2023).

## 2. Metodología y proceso

### 2.1. Obtención de hierro dúctil

Se fabricaron dos tipos de hierros, hierro dúctil y hierro dúctil aleado con cromo (Cr) y niobio (Nb), sus composiciones químicas se muestran en las tablas 2 y 3.

El proceso de fabricación de las fundiciones dúctiles se determinó realizando un balance de carga, considerando que la capacidad del horno es de 10 kg, se realizaron los cálculos pertinentes para obtener, el porcentaje de carga (acero 1018, metal soret, grafito, Fe-Si, Fe-Nb, Fe-Cr), los kilogramos por elemento y ferroaleaciones a añadir, así como sus porcentajes y rendimientos correspondientes, de igual forma se calcularon los kilos de Fe-Nb y Fe-Cr para obtener una fundición dúctil aleada con 0.22% Nb y 0.18% Cr.

**Tabla 2:**Composición química HD

Composición química (%)				
C	Si	Mn	S	P
3.76	2.54	0.38	0.03	0.009

**Tabla 3:**Composición química HD aleado con Cr y Nb

Composición química (%)						
C	Si	Mn	S	P	Nb	Cr
3.67	2.61	0.32	0.02	0.009	0.22	0.18

### 2.2. Tratamiento térmico de austemperizado

El tratamiento térmico de austemperizado para los dos hierros siguió el mismo procedimiento. Este consistió de dos partes. Primero el austenitizado se realizó en una mufla Thermolyne. En esta se austenitizó a una temperatura de 900 °C y se mantuvo durante un período de tiempo continuo de 60 minutos para disolver el carbono en la austenita. Posteriormente las muestras se transfirieron a un segundo horno, de forma rápida para impedir un descenso en la temperatura y que esto provocara la formación de perlita. Se utilizó el horno marca Marla, en donde se realizó el austemperizado con sales binarias al 50% de KNO<sub>3</sub> y 50% de NaNO<sub>3</sub>. Las sales inhiben la carburización en las piezas. Este procedimiento se realizó por un tiempo de 60 minutos a temperaturas de austemperizado uniformes de 250 °C, 280 °C,

310 °C, 340 °C y 370 °C, efectuado respectivamente a cada probeta con ambos hierros.

### 2.3. Análisis microestructural

Las muestras a ser caracterizadas por el proceso metalográfico, primero tuvieron que pasar por un proceso de corte de la superficie, para poder observar la microestructura correctamente debido a que en la superficie sucede un proceso de descarbonizado. Tras ello fueron preparadas siguiendo la técnica convencional de desbaste con lijas que van desde un tamaño de grano de 60, 120, 220, 320, 400, 600, 1000, 1500 y 2000. Posteriormente se realizó un pulido con pasta de diamante a 1 micra ( $\mu\text{m}$ ) y alcohol, utilizando paños de fibra sintética. La microestructura se examinó bajo microscopio óptico metalográfico Unitron mec2 y posteriormente se realizó un ataque químico con el reactivo nital al 4% para revelar las fases ferrita, austenita y perlita.

Se determinó la nodularidad (%), conteo nodular (nódulos/ $\text{mm}^2$ ), esferoidad (S), tamaño de nódulo ( $\mu\text{m}$ ) y distancia entre partículas ( $\lambda_G$ ). El estudio de los nódulos presentes se hizo a través de un analizador de imágenes image J.

El conteo de nodularidad (%) se define en la norma ASTM A247 (ASTM, 2019) que se muestra en la ecuación 1.

$$\%Nod = \left( \frac{\text{Área partículas aceptadas}}{\text{Área partículas aceptadas} + \text{partículas no aceptadas}} \right) \cdot 100. \quad (1)$$

Todas las partículas con un diámetro inferior a 10  $\mu\text{m}$  se descartaron en el conteo de nódulos, tamaño de nódulo y nodularidad.

El método del factor de forma se basa en el criterio de aceptabilidad. Los factores de forma más comúnmente utilizados son aquellos que relacionan la forma con una esfera perfecta como la esferoidad (S), la cual se calcula con la ecuación 2. (Yang et al;2023).

$$S = \left( \frac{4\pi \cdot \text{Área}}{(\text{Perímetro})^2} \right). \quad (2)$$

Una esfera perfecta producirá un valor de uno; si la forma se deforma, el valor disminuye. Un nódulo aceptable tendrá  $S > 0.65$ . La esferoidad se basa en mediciones de área y perímetro. (Ruxanda et al;2002).

El tamaño de los nódulos expresa el diámetro de cada nódulo de grafito en micrones ( $\mu\text{m}$ ). Se pueden utilizar dos métodos para obtener el tamaño promedio de los nódulos de grafito con respecto al área (A) y perímetro (P). (Colin et al;2024). Utilizando las ecuaciones (3) y (4) respectivamente.

$$NS_{avg} = (2)(\sqrt{A\pi^{-1}}). \quad (3)$$

$$NS_{avg} = P\pi^{-1}. \quad (4)$$

La distancia entre partículas ( $\lambda_G$ ), es el parámetro que relaciona el conteo de nódulos y el tamaño de nódulo, este representa la distancia característica de difusión del carbono, se puede calcular con la ecuación 5. (Seher et al;1972).

$$\lambda_G = 55.4 \cdot \left( \frac{d_{avg}}{\text{Conteo nodular}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

Donde  $d_{avg}$  es el diámetro promedio de los nódulos de grafito en mm y el conteo de nódulos es por  $\text{mm}^2$ , el cálculo se puede realizar con respecto al tamaño de nódulo calculado con el área o el perímetro. (Ruxanda et al;2002).

### 2.4. Ensayo de impacto Charpy

Se realizó la prueba de impacto Charpy en un péndulo, con las probetas maquinadas de acuerdo a la norma ASTM E23 (ASTM, 2019), las cuales tienen una sección transversal de 10 x 10 mm y 55 mm de longitud, las muescas realizadas a las probetas tienen una profundidad de 2 mm a 45°. Las dimensiones que se muestran en la figura 5. El ensayo fue realizado en todas las muestras del hierro dúctil y hierro dúctil aleado con cromo (Cr) y niobio (Nb) austemperizadas a las temperaturas de 250°, 280°, 310°, 340° y 370°. Los resultados obtenidos permiten obtener el valor de la energía absorbida en el ensayo de fractura por el hierro dúctil austemperizado.

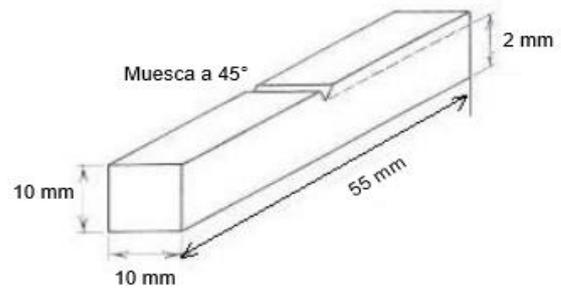


Figura 5: Probetas usadas en el ensayo Charpy (Jiménez,2024).

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Caracterización microestructural del hierro dúctil y hierro dúctil aleado con Cr y Nb

Se realizaron metalografías a los dos hierros dúctiles, los cuales fueron sometidos a un austenitizado a 900°C durante 60 minutos y seguido de eso se realizó un austemperizado a diferentes temperaturas de 250°, 280°, 310°, 340° y 370°C durante 60 minutos respectivamente. La caracterización metalográfica fue realizada en dos partes, en la primera se realizó el desbaste seguido de un pulido de las muestras para revelar nódulos de grafito; en la segunda se realizó un ataque con nital al 4% para exhibir la matriz metálica.

En las figuras siguientes de la 6-10 se muestran los nódulos de grafito de las muestras de hierro dúctil austemperizadas a 250°C, 280°C, 310°C, 340°C y 370°C respectivamente.

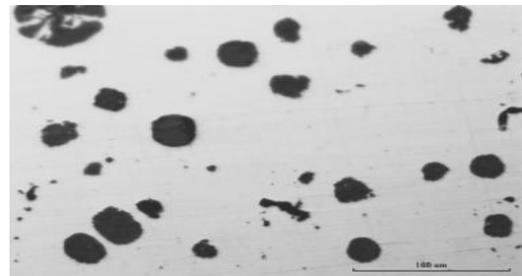
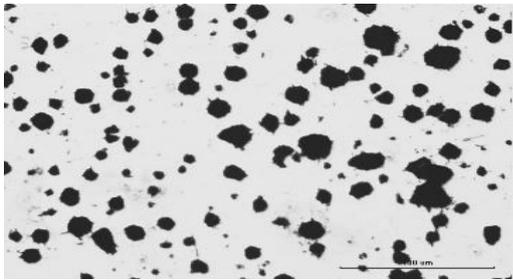
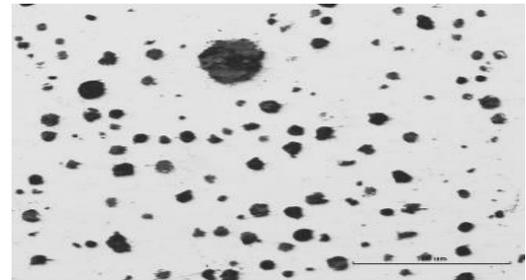


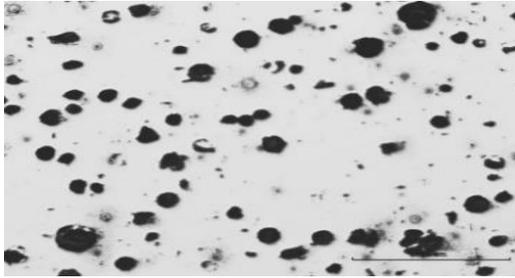
Figura 6: Nódulos de grafito de HDA a 250°C (Jiménez,2024).



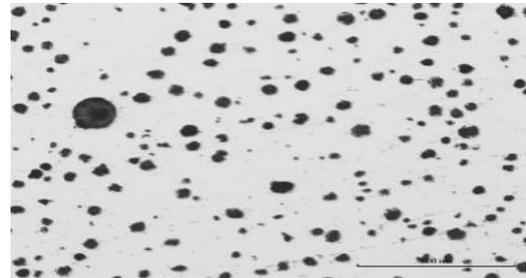
**Figura 7:** Nódulos de grafito de HDA a 280°C (Jiménez,2024).



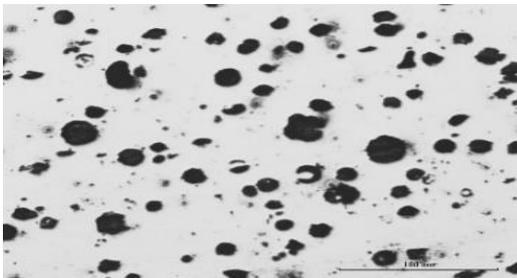
**Figura 11:** Nódulos de grafito de HDA Cr-Nb a 250°C (Jiménez,2024).



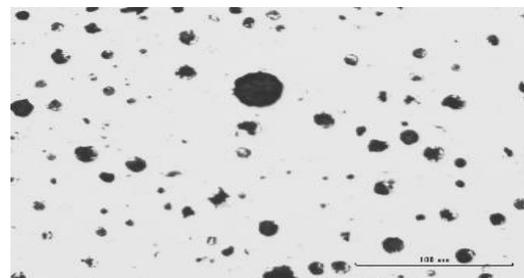
**Figura 8:** Nódulos de grafito de HDA a 310°C (Jiménez,2024).



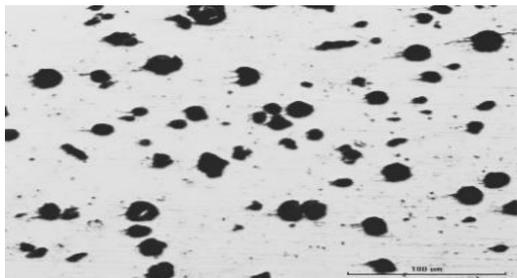
**Figura 12:** Nódulos de grafito de HDA Cr-Nb a 280°C (Jiménez,2024).



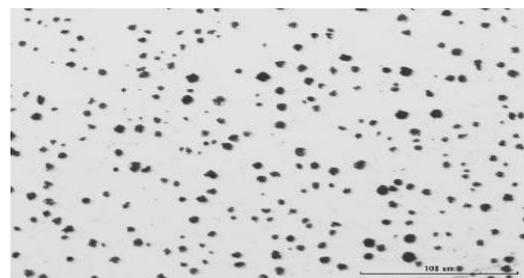
**Figura 9:** Nódulos de grafito de HDA a 340°C (Jiménez,2024).



**Figura 13:** Nódulos de grafito de HDA Cr-Nb a 310°C (Jiménez,2024).

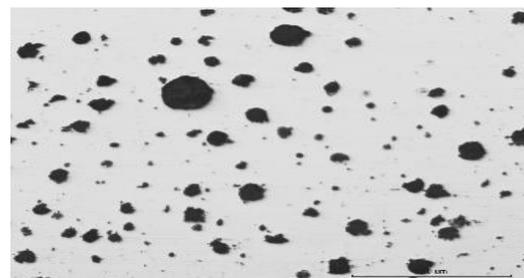


**Figura 10:** Nódulos de grafito de HDA a 370°C (Jiménez,2024).



**Figura 14:** Nódulos de grafito de HDA Cr-Nb a 340°C (Jiménez,2024).

En las siguientes figuras de la 11-15, se muestran los nódulos de grafito de las muestras correspondientes al HDA aleado con cromo (Cr) y niobio (Nb), austemperizadas a 250°C, 280°C, 310°C, 340°C y 370°C respectivamente.



**Figura 15:** Nódulos de grafito de HDA Cr-Nb a 370°C (Jiménez,2024).

En las figuras anteriores de la 6-15 se observan a detalle las microestructuras que presentan los nódulos de grafito distribuidos en una matriz metálica. Estos nódulos de grafito están presentes en forma de esferas negras, resultado de la solidificación del

carbono en el hierro fundido con forma esferoidal. (Gordillo *et al*;2010).

En la tabla 4 se muestran los datos nodulares, los resultados mostrados son el promedio de 4 zonas del hierro dúctil austemperizado aleado con cromo (Cr) y niobio (Nb). Se observa que el hierro tuvo un aumento en el conteo nodular a las temperaturas de 280° y 340°C, así mismo teniendo los valores más altos en esfericidad y por lo tanto un mayor % de nodularidad. Como se esperaba el tamaño de nódulo y distancia entre partícula son menores que a las temperaturas de 250°, 310° y 370°C. Esto se debe a la adición de cromo (Cr) ya que influye en la nucleación y crecimiento de los nódulos durante el tratamiento térmico y el niobio (Nb) actúa como estabilizador.

**Tabla 4:** Características nodulares del Hierro dúctil austemperizado aleado con Cr y Nb.

HDA (Cr-Nb)	Temperaturas				
	250°C	280°C	310°C	340°C	370°C
Nodularidad (%)	78.10	92.16	59.44	93.25	77.35
Conteo nodular (nód/mm <sup>2</sup> )	1468.6	1928.1	1034.3	2538.9	939.6
Esferoididad (S)	0.76	0.82	0.72	0.86	0.76
Tamaño de nódulo (A)(μm)	8.52	7.12	8.29	5.65	9.10
Tamaño de nódulo (P)(μm)	9.93	7.94	10.16	6.13	10.57
Distancia interpartícula (A)(λ <sub>G</sub> )	9.95	9.38	9.86	8.68	10.18
Distancia interpartícula (P)(λ <sub>G</sub> )	10.48	9.72	10.56	8.92	10.70

En la tabla 5 se observa que la esferoididad en todas las temperaturas está dentro de los parámetros S>0.65 y así mismo a menor esferoididad el % de nodularidad disminuye, observando un decremento conforme la temperatura va aumentando. En cuanto al conteo nodular se observa que las temperaturas de austemperizado que tienen mayor número de nódulos son a 250° y 280°C, mientras que en las temperaturas 310°, 340° y 370°C disminuye considerablemente el número de nódulos.

El tamaño de nódulo y la distancia entre partícula se calculó con el área y con el perímetro, sin embargo, los resultados no muestran diferencias considerables.

El tamaño de nódulo y la distancia entre partícula se calculó con el área y perímetro, sin embargo, los resultados no muestran diferencias considerables.

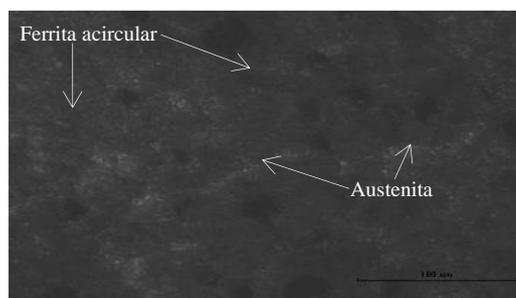
El espaciado disminuye significativamente con el aumento del conteo de nódulos para todas las temperaturas. Dado que a las temperaturas de 250 °C y de 280 °C en este estudio tienen un conteo de nódulos significativamente mayor.

**Tabla 5:** Características nodulares del Hierro dúctil austemperizado (HDA).

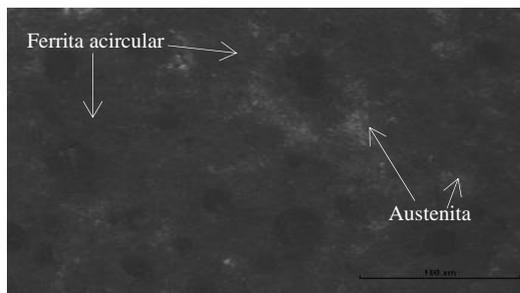
HDA	Temperaturas				
	250°C	280°C	310°C	340°C	370°C
Nodularidad (%)	93.76	90.13	61.45	60.58	60.37
Conteo nodular (nód/mm <sup>2</sup> )	1368.8	1204.1	1134.3	1103.5	770.7
Esferoididad (S)	0.75	0.74	0.72	0.70	0.70
Tamaño de nódulo (A)(μm)	8.17	7.94	15.05	10.73	12.25
Tamaño de nódulo (P)(μm)	10.88	10.23	16.98	13.47	15.24
Distancia interpartícula (A)(λ <sub>G</sub> )	10.049	9.954	12.319	11.005	11.502
Distancia interpartícula (P)(λ <sub>G</sub> )	11.056	10.831	12.825	11.872	12.371

El análisis de las microestructuras de hierro dúctil austemperizado (HDA) y hierro dúctil austemperizado aleado con cromo (Cr) y niobio (Nb) revela características distintivas en la morfología. En las formas de la 16-25 se observan las microestructuras que muestran las alteraciones durante el tratamiento a sus diferentes temperaturas, ya que se disuelve la perlita y ferrita en el hierro dúctil dando paso a la austenita la que a su vez se observa que se va transformando en ausferrita, compuesta por ferrita acicular y austenita retenida. (Becerra *et al*;2022).

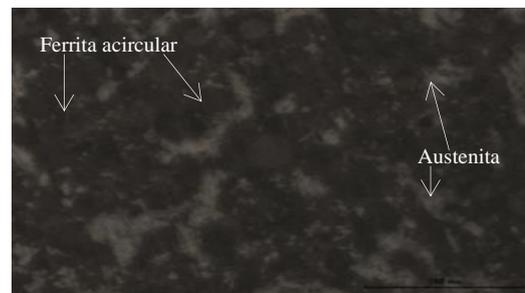
En las microestructuras del HDA, mostradas en las siguientes figuras de la 16-20, se puede observar que predomina una estructura ausferrítica fina y una cantidad significativa de austenita retenida. La ferrita acicular aparece en forma de agujas delgadas; a medida que aumenta la temperatura la ferrita acicular se vuelve más gruesa y la cantidad de austenita retenida comienza a disminuir ligeramente.



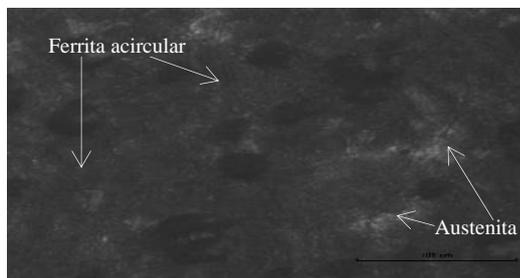
**Figura 16:** Microestructura atacada con nital 4% del HDA a 250°C (Jiménez,2024).



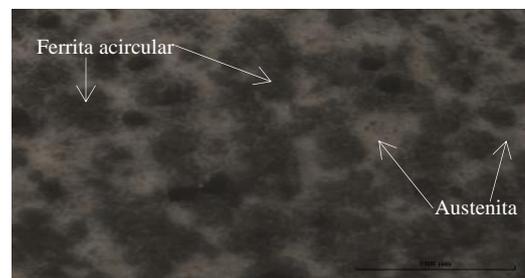
**Figura 17:** Microestructura atacada con nital 4% del HDA a 280°C (Jiménez,2024).



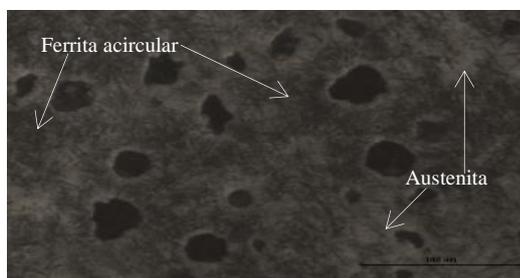
**Figura 21:** Microestructura atacada con nital 4% del HDA Cr-Nb a 250°C (Jiménez,2024).



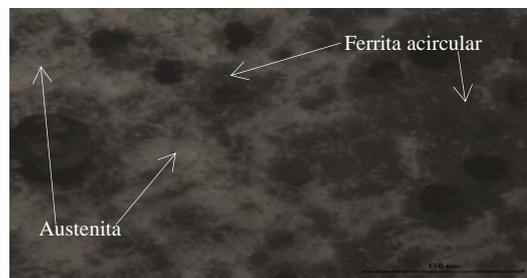
**Figura 18:** Microestructura atacada con nital 4% del HDA a 310°C (Jiménez,2024).



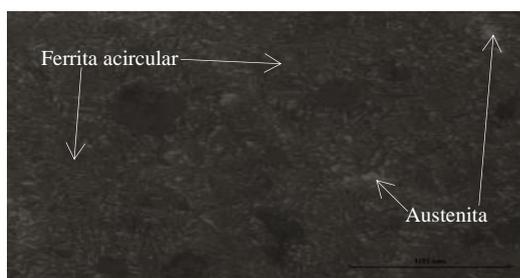
**Figura 22:** Microestructura atacada con nital 4% del HDA Cr-Nb a 280°C (Jiménez,2024).



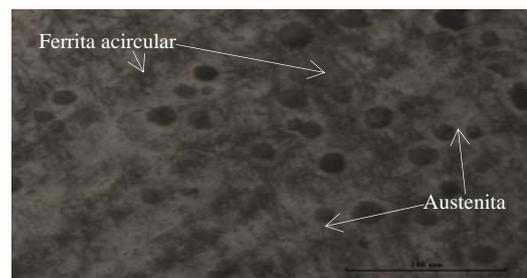
**Figura 19:** Microestructura atacada con nital 4% del HDA a 340°C (Jiménez,2024).



**Figura 23:** Microestructura atacada con nital 4% del HDA Cr-Nb a 310°C (Jiménez,2024).

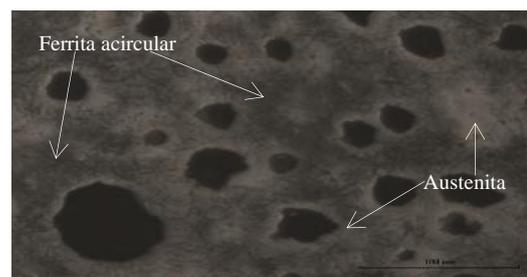


**Figura 20:** Microestructura atacada con nital 4% del HDA a 370°C (Jiménez,2024).



**Figura 24:** Microestructura atacada con nital 4% del HDA Cr-Nb a 340°C (Jiménez,2024).

Mientras que en la microestructura del hierro aleado con cromo (Cr) y niobio (Nb), mostradas en las siguientes figuras de la 21-25, se observa que la adición de estos elementos modifica la microestructura ya que influyen en la formación y estabilidad de las fases durante el austemperizado, por lo tanto, se puede observar una estructura ausferrítica más refinada y mayor estabilidad de austenita retenida debido a los efectos de endurecimiento de Cr y Nb.



**Figura 25:** Microestructura atacada con nital 4% del HDA Cr-Nb a 370°C (Jiménez,2024).

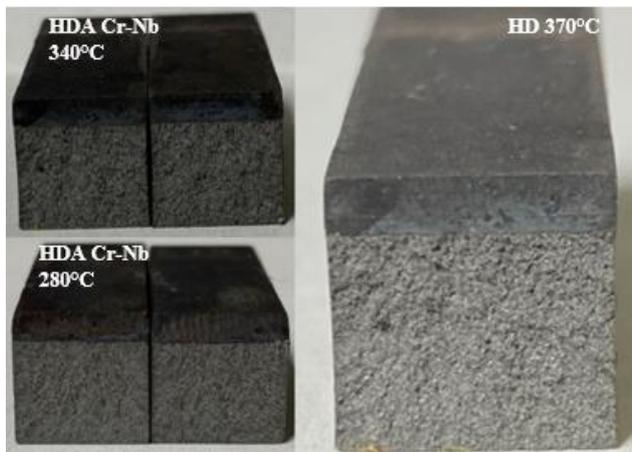
### 3.2. Ensayo de impacto Charpy

Los resultados de energía absorbida para las probetas de HDA y HDA aleado con cromo (Cr) y niobio (Nb), a distintas temperaturas 250°, 280°, 310°, 340° y 370° C, se muestran en la tabla 6. Se observa que en el HDA aleado con cromo (Cr) y niobio (Nb) la energía absorbida aumenta conforme la temperatura de austemperizado aumenta, mientras que en el HDA nos muestra que la probeta austemperizada a 280°C es la que menor energía absorbió. Esto se debe a que la precipitación de carburos es más pronunciada a temperaturas intermedias (como 280°C), lo que puede explicar la menor energía absorbida en este rango.

**Tabla 6:** Prueba de impacto Charpy

HDA Cr-Nb		HDA	
Temperatura °C	Joules	Temperatura °C	Joules
250	10	250	10.5
280	10	280	8
310	11.9	310	10.2
340	14	340	12
370	13	370	12.5

La figura 26 muestra las probetas de la prueba de impacto Charpy del hierro dúctil austemperizado y del hierro dúctil austemperizado aleado con Cr y Nb. El comportamiento general desde la temperatura de 250°C hasta 370 °C fue una fractura frágil. Las fracturas frágiles en el hierro dúctil austemperizado ocurren cuando el material se somete a altos niveles de tracción, superando su tenacidad. Este tipo de fractura indica una menor capacidad de absorción de energía.

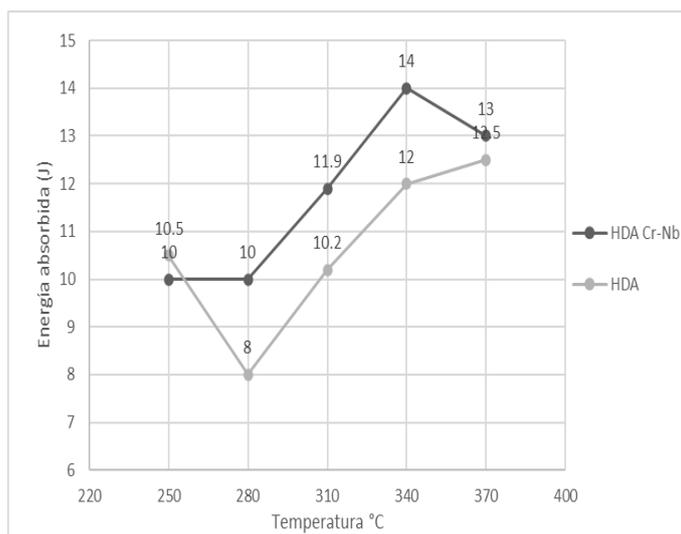


**Figura 26:** Probetas de impacto Charpy con fractura frágil (Jiménez,2024).

En la figura 27 se observa que el valor de energía absorbida a 250°C fue de 10 J del HDA Cr-Nb, mientras que del HDA fue de 10.5 J. A esta temperatura la microestructura contiene cantidades significativas de perlita y ferrita, con una menor cantidad de ausferrita y austenita retenida. La perlita es más frágil que la ausferrita, lo que explica por qué la energía absorbida es relativamente baja a esta temperatura. A 280°C en el HDA Cr-Nb se mantuvo en 10 J. Esto sugiere que la microestructura no cambia significativamente entre estas dos temperaturas.

La combinación de ausferrita y austenita retenida proporciona una resistencia y ductilidad balanceadas, pero no suficientes para aumentar la energía absorbida. En el HDA la energía absorbida a 280 °C disminuyó a 8 J, lo que indica una transición en la microestructura, teniendo una mayor presencia de fases frágiles, como la perlita, y un posible descenso en la cantidad de austenita retenida.

Por otro lado, al aumentar la temperatura, comienza a formarse más ausferrita, una fase que es más dúctil y puede absorber más energía que la perlita. La microestructura empieza a contener más ausferrita y austenita retenida, lo que explica el aumento en la energía absorbida como se observa en las temperaturas 310°, 340° y 370°C. Sin embargo, podemos observar que se absorbe más energía en el HDA aleado con Cr-Nb debido a que estos elementos contribuyen a la precipitación de carburos finos, que pueden mejorar la resistencia sin comprometer significativamente la ductilidad.



**Figura 27:** Grafica de la prueba de impacto Charpy.

### 4. Conclusiones

En el presente trabajo se presentó una caracterización tanto metalográfica como mecánica de un hierro dúctil y de un hierro dúctil aleado con cromo 0.18 % y niobio 0.22 %. Se presentan 5 temperaturas diferentes de austemperizado a 250 °C, 280 °C, 310 °C, 340°C y 370°C. Encontrando que las temperaturas óptimas en cuanto a los análisis microestructurales en un HDA aleado son a 280 °C y a 340°C, teniendo los valores más altos en nodularidad (%), conteo nodular (nódulos/mm2 ) y esferoidad (S), mientras que en un HDA son a 250 °C y a 280°C.

Se relacionó la energía absorbida (J) en la prueba de impacto Charpy con el aumento de las fases ausferrita y austenita retenida con el incremento de la temperatura. Estas fases contribuyen a una mayor capacidad de absorción de energía debido a su naturaleza más dúctil. Para el HDA aleado con Cr y Nb se debe a cambios en la microestructura con la temperatura de austemperizado. A temperaturas más bajas, la precipitación de carburos y la menor cantidad de austenita retenida resultan en una menor capacidad de absorción de energía. A medida que la temperatura aumenta, la estabilización de la austenita retenida y la formación de ausferrita más favorable mejoran la capacidad de absorción de energía, alcanzando un punto óptimo a 340°C.

Este análisis muestra cómo los cambios en la microestructura obtenidos por el proceso de austemperizado a diferentes temperaturas, influyen directamente en las propiedades mecánicas. Finalmente se sugiere estudiar el efecto que tienen el cromo y el niobio a diferentes temperaturas de austemperización o incluso con diferentes tratamientos térmicos, cambiando los porcentajes de estos elementos y evaluando los porcentajes de austenita retenida de cada prueba.

## Referencias

- Abioye, A.A., Atanda, P.O., Abioye, O.P., Afolalu, S.A., Dirisu, J.O., (2017). Microstructural characterization and some mechanical behavior of low manganese austempered ferritic ductile iron. *International journal of applied engineering research volume 12*, 14435-14441.
- Al-Sayed, S. R., Elgazzar, H., & Nofal, A. (2024). A comparative study of laser fluence effect on surface modification and hardness profile of austempered ductile iron. *Journal of Materials Research and Technology*, 31, 3189–3204. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.07.052>
- ASTM, annual book of ASTM Standards, p.126, ASTM, (2019). The effects of austempering temperature and time onto the machinability of austempered ductile iron. *Materials Science and Engineering*, 147-153. DOI: 10.1016/j.msea.2005.07.005.
- ASTM E23: Ensayo de flexión por impacto Charpy & Izod. (s/f). ASTM E23: Ensayo de flexión por impacto Charpy & Izod. Recuperado el 30 de mayo de 2024. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-flexion-por-impacto-astm-e23/>
- ASM Handbook committee, (1990). ASM Handbook volume 1 properties and selection: irons steels and high-performance alloys. ASM International. Alabama, Estados Unidos.
- Becerra-Mayorga, C. Y., Vargas-Ramírez, M., Cruz-Ramírez, A., García-Serrano, J., & Colín-García, E. (2022). Ventana óptima de un hierro dúctil austemperizado con aleantes carburizadores. *PÁDI boletín científico de ciencias básicas e ingenierías del ICBI*, 10 (Especial7), 118–124. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iespecial7.9823>
- Becerra-Mayorga, C. Y., Vargas-Ramírez, M., Cruz-Ramírez, A., García-Serrano, J., & Colín-García, E. (2022). Diagrama de tratamiento de Austemperizado. *PÁDI boletín científico de ciencias básicas e ingenierías del ICBI*. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iespecial7.9823>
- Chávez, F., Oviedo, F., Flores, N., Montero, R., Yáñez, F., Vera, G., Quezada, P., & Peña, W. (2009). Fundición nodular (hierro dúctil): Requisitos. Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2499(Primera), 16.
- Colin García, Eduardo & Sánchez-Alvarado, R.G. & Cruz Ramírez, Alejandro & Suarez-Rosales, M.A. & Portuguez-Pardo, L. & Jiménez-Lugos, J.C. (2024). Effect of regular thicknesses on the microstructural and quantitative analysis for a hypo-eutectic ductile iron alloyed with Ni and V. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2-2. 10.2298/JMMB231114002C.
- Davydov, S. V. (2023). Phase diagram of Fe–100% C alloys. Part one. Basic inconsistencies of Fe–Fe<sub>3</sub>C alloy phase diagram. *Steel in Translation*, 53(2), 144–153. <https://doi.org/10.3103/s0967091223020031>
- Dos Santos, M. (2023, noviembre 22). Composición química del hierro nodular: Todo lo que necesitas saber. <https://polaridad.es/hierro-nodular-composicion-quimica/>
- Frank, A. (2020). PRINCIPIOS GENERALES DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS. *Metalografía y Tratamientos Térmicos*, 6, 11.
- Geib, M. D., Matlock, D. K., & Krauss, G. (1980). The effect of intercritical annealing temperature on the structure of niobium microalloyed dual phase steel. *Metallurgical Transactions*, 11(10), 1683–1689. <https://doi.org/10.1007/bf02660523>
- Gordillo-Pinto, S. A., Herrera, P. E. (2010). Estudio de los tratamientos térmicos de templado y revenido en la fundición de hierro dúctil con matriz metálica ferrítica. *Escuela Politécnica Nacional*.
- Górný, M., Tyrała, E., & Lopez, H. F. (2014). Effect of copper and nickel on the transformation kinetics of austempered ductile iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(11), 3505-3510. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1167-5>
- Jiménez, E. (2024). Microestructura de Hierro dúctil y Hierro dúctil aleado con Cr y Nb, Universidad Autónoma del estado de Hidalgo.
- Jiménez, S. C. G. T. (2015). Efecto del Niobio sobre el Comportamiento de Precipitación y Propiedades Mecánicas de un Acero de Bajo Carbono. *Tribuna del investigador*, 16(22), 13
- León, E. H. Z. (2013). Austempering de hierro nodular en un reactor de lecho fluidizado. *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Liu, C., Du, Y., Wang, X., Zheng, Q., Zhu, X., Zhang, D., Liu, D., Yang, C., & Jiang, B. (2023). Comparison of the tribological behavior of quenched-tempered ductile iron and austempered ductile iron with similar hardness. *Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*, 520–521(204668), 204668. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204668>
- Ortega, Y. (2006). Prueba de impacto: ensayo Charpy. *Revista Mexicana de Física*, 52(51–57).
- Ruxanda, Roxana & Stefanescu, Doru & Piwonka, T.S.. (2002). Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Castings.
- Sharun, V., & Anand Ronald, B. (2023). Traditional machining of Austempered ductile iron (ADI): A review. *Materials Today: Proceedings*, 72, 2027–2031. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.445>
- Sheikh, M., (2019). Influence of Austempering Heat Treatment on Ductile Iron. *PakJET*, vol. 2, 38-40. DOI: <https://doi.org/10.51846/vol2iss2pp38-40>
- Wang, X., Du, Y., Liu, C., Hu, Z., Li, P., Gao, Z., Guo, H. y Jiang, B. (2022). Relación entre los parámetros de proceso, la microestructura y las propiedades mecánicas del hierro dúctil austemperizado (ADI). *Ciencia e ingeniería de materiales. A, Materiales estructurales: propiedades, microestructura y procesamiento*, 857 (144063), 144063. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144063>
- Yang, P., Wang, R., Fu, H., Absi, R., Bennacer, R., Yang, X., & La, P. (2023). Wear properties of titanium microalloying carbide austempered ductile iron and refining mechanism of TiC on M3C. *Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*, 516–517(204603), 204603. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204603>