

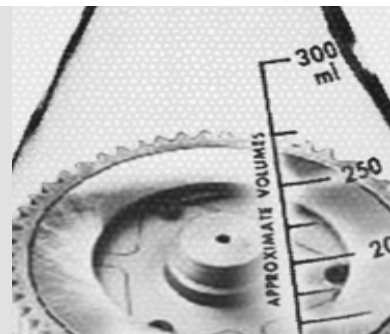
Temperatura de transición de la fundición nodular austemperada no aleada

Horacio Sierra Restrepo

Ingeniero mecánico. Especialista en Fundiciones de la Universidad de Wisconsin. Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
hsierra@unalmed.edu.co

Jeimar Ortega González

Ingeniero Mecánico. Trabaja como ingeniero independiente en la asesoría a empresas.



Recepción: 17 de octubre de 2003 | Aceptación: 10 de diciembre de 2003

Resumen

Se estudió la dependencia de la temperatura de transición dúctil-frágil con la temperatura de austemperado, para una fundición nodular no aleada. Se usaron probetas de impacto no entalladas según la norma ASTM 327. Se austenizaron a 920°C durante 2 horas, y posteriormente se austemperaron a 300°C durante 90 minutos y a 350°C y 400°C durante 50 minutos. Estos tiempos fueron escogidos porque corresponden a la máxima energía absorbida para cada temperatura de austemperado. Para determinar la temperatura de transición se realizaron ensayos Charpy de impacto con el martillo de 30 Kg, variando la temperatura de ensayo entre -70°C y 150°C.

Los resultados presentados muestran una disminución en la temperatura de transición a medida que la temperatura de austemperado se hace menor, lo cual puede ser consecuencia de la transformación de la austenita retenida en martensita por efecto de la temperatura del ensayo (temperatura sub-cero). Por otro lado, la estabilidad química de la austenita también determina la temperatura de transición para diferentes temperaturas de austemperado, presentando un mayor contenido de carbono las estructuras obtenidas a temperaturas de austemperado menores, ($T_a = 300^\circ\text{C}$).

Con el fin de soportar la hipótesis de la transformación de la martensita, se midió la dureza en probetas impactadas en el intervalo de temperatura de ensayo (-70°C a 150°C); las curvas de dureza Vickers versus temperatura de ensayo mostraron que a temperatura sub-cero la dureza se incrementa un 15% con respecto a la dureza obtenida a temperatura ambiente. Para poner en evidencia los cambios en la microestructura, las muestras en que se midieron la máxima y mínima energía de impacto fueron analizadas en microscopio óptico y electrónico de barrido.

Palabras Claves

Fundición nodular austemperada
Temperatura de transición
Resistencia al impacto

Transition temperature of unalloyed nodular cast iron

Abstract

The relation between ductile-to-brittle transition temperature and the austempering temperature for an unalloyed nodular cast iron was studied. Un-notched impact samples were used in accordance to the ASTM 327 standard. These were austenitized at 920°C for 2 hours, and then austempered at 300°C during 90 minutes and at 350°C and 400°C for 50 minutes. These combinations of time and temperature were chosen because they correspond to the highest energy absorber for each austempering temperature. In order to determine the transition temperature, Charpy-type tryouts were done with the 30 kg hammer, modifying the temperature between -70°C and 150°C.

The results showed a decrease in the ductile-to-brittle transition temperature when the austempering temperature decreases, which could be a consequence of martensite formation at sub-zero temperatures. On the other hand, the chemical stability also determines the transition temperatures for different austempering temperatures, showing a higher carbon content in the structures obtained at lower austempering temperatures ($T_a = 300^\circ\text{C}$).

With the purpose of supporting the hypothesis of martensite transformation, a measurement was done on the samples impacted in try out temperature interval (-70°C to 150°C); the Vickers hardness curves against the try out temperature showed that at sub-zero temperature the hardness increases a 15% regarding the hardness obtained at environment temperature. To make the microstructure changes evident, the samples in which the maximum and minimum impact energy were analyzed in an optical and electronic scanning microscope.

Key Words

Austempered ductile iron
Transition temperature
Impact resistance

1. Introducción



La fundición nodular austemperada es una familia de materiales cuyas propiedades mecánicas pueden ser variadas en un extenso intervalo a través de la adecuada selección del ciclo térmico, ofreciendo una amplia gama de propiedades mecánicas para aplicaciones específicas. Esta combinación de propiedades se debe a la microestructura de la matriz formada por austenita estabilizada y ferrita bainítica. Las cantidades relativas de esos constituyentes influyen marcadamente en todas las propiedades mecánicas, estáticas y dinámicas de la fundición

nodular. Un balance adecuado de estos constituyentes permite obtener alta resistencia y alta tenacidad, características solicitadas en múltiples piezas, otorgando una ventaja comparativa frente a otros materiales.

Si bien el tratamiento térmico de austemperado se remonta a los años cincuenta, fue en la década de los ochenta que se tuvo una comprensión adecuada de las reacciones metalúrgicas, actualmente el crecimiento comercial de estos materiales ha presentado algún atraso debido al estricto control que debe tener la composición química, la solidificación y el tratamiento térmico.

En Colombia, las aplicaciones que se encuentran son puntuales y no se observa una fuerte decisión por parte de los fundidores para impulsar el desarrollo de productos fabricados en fundición nodular austemperada. A nivel internacional, numerosas piezas automotrices como: engranajes, cigüeñales, ruedas dentadas, piñonería, entre otros, se fabrican en fundición nodular austemperada. Muchas de esas piezas están sujetas a impacto, siendo la fundición nodular austemperada una buena alternativa, dadas sus excelentes propiedades mecánicas. A su vez, muchas de estas piezas pueden, también, estar sujetas a cambios bruscos de temperatura y, en consecuencia, su resistencia al impacto puede variar.

La recopilación bibliográfica analizada pone de manifiesto la deficiencia de información acerca de la relación entre la temperatura de transición y la resistencia al impacto para la fundición nodular austemperada.

La literatura presenta información de la resistencia al impacto para fundición nodular no aleada y diferentes microestructuras, ensayadas en Charpy V. Alguna información para ensayos Charpy no entallados es reportada para fundición de matriz ferrítica, la cual presenta un valor de temperatura de transición de -100°C con un valor de energía de transición de 75 J y una energía máxima de 125 J. En la misma referencia, se compara este comportamiento obtenido con probetas no entalladas con el comportamiento de probetas entalladas. Para estas últimas, la curva de impacto está desplazada hacia la derecha, ubicando la temperatura de transición en valores cercanos a -40°C y reportando valores máximos de energía más bajos, cerca de 45 J. Para microestructuras de temple y revenido, los resultados obtenidos en probetas entalladas indican que la temperatura de transición está por encima de 0°C y en muchos casos por encima de la temperatura ambiente. No fue posible obtener reportes para fundiciones no aleadas austemperadas y ensayadas a diferentes temperaturas.

El presente trabajo tiene por objeto estudiar la relación de la energía de impacto de la fundición nodular no aleada, austemperada a diferentes temperaturas con respecto a la temperatura de ensayo y así, determinar la temperatura de transición. Para ello,

fueron fabricadas probetas no entalladas para ensayo de impacto según la norma ASTM 327, se austemperaron a 920°C durante 2 horas, y posteriormente se austemperaron a 300°C durante 90 minutos y a 350°C y 400°C durante 50 minutos. Estos tiempos fueron escogidos porque corresponden a la máxima energía absorbida para cada temperatura de austemperado. Para determinar la temperatura de transición se realizaron ensayos de impacto Charpy sin entalla con el martillo de 30 Kg, variando la temperatura de ensayo entre -70°C y 150°C .

2. Materiales y procedimientos

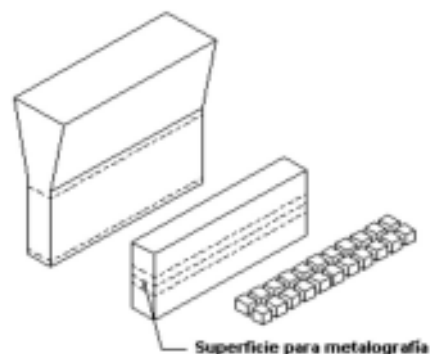
Para obtener las diferentes muestras utilizadas en este estudio, se vaciaron bloques en "Y" de fundición nodular no aleada con la composición química reportada en la tabla 1. La fundición nodular se obtuvo en un horno eléctrico de inducción y los bloques fueron vaciados de acuerdo a la norma ASTM A536 - 84.

Tabla 1. Composición química de la fundición nodular estudiada, % en peso

C	Si	Mn	Ni	Cu	S	P	Mg
3.54	2.6	0.45	0.01	0.01	0.018	0.02	0.04

Para los ensayos de dureza y las observaciones metalográficas se utilizaron probetas de dimensiones $20 \times 10 \times 10$ mm, las cuales se sacaron de la zona central de los bloques en "Y", como se ilustra en la figura 1.

Figura 1. Esquema del bloque en "Y" y la obtención de las muestras para dureza y metalografía

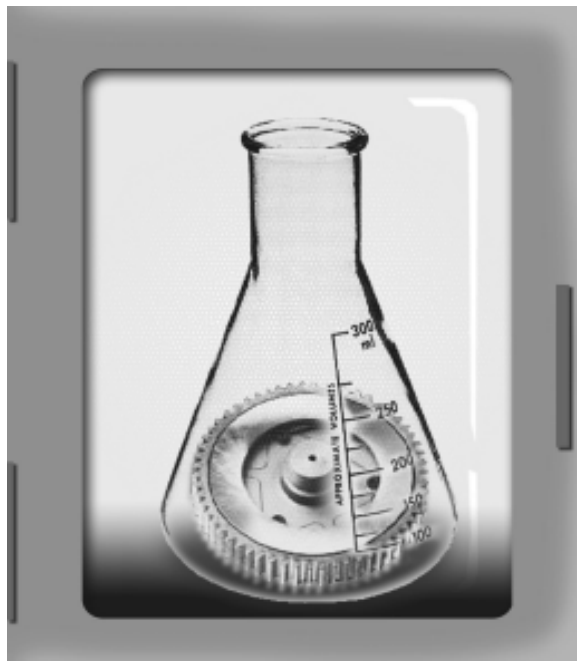


Las probetas para los ensayos de impacto fueron extraídas de las barras rectangulares iniciales, éstas se rectificaron y luego se cortaron para obtener las dimensiones finales $10 \times 10 \times 55$ mm, tal como se especifica en la norma ASTM 327 - 91.

2.1 Tratamientos térmicos

2.1.1 Austenización

Para todos los tratamientos efectuados, la austenización se realizó a $920^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ por dos horas, en un horno tipo mufla, marca SOLO con controlador de temperatura electrónico (tipo PID. Para evitar la decarburación durante la austenización, las muestras fueron colocadas dentro de un recipiente metálico y cubiertas con carbón vegetal. A intervalos de tiempo, se realizaron controles adicionales de la temperatura del horno utilizando una termocupla exterior tipo K adaptada a un termómetro marca FLUKE, con una variación de la temperatura de $\pm 10^{\circ}\text{C}$.



2.1.2 Austemperado para determinar tenacidad a temperatura ambiente

El tratamiento de austemperado de las probetas de impacto sin entalla se efectuó en un baño de sales tipo AS-140 en crisol adaptado a una mufla marca SOLO con controlador de temperatura electrónico (tipo PID), con variación de $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Las temperaturas seleccionadas fueron de 300°C , 350°C y 400°C .

El ciclo térmico para las temperaturas de austemperado mencionadas fue el siguiente: austenización a 920°C durante 2 horas, posteriormente se llevaron a las sales para austemperar a las temperaturas seleccionadas (300°C , 350°C y 400°C), durante tiempos entre 8

y 720 minutos. Una vez cumplido el tiempo de residencia, las muestras se enfriaron en agua agitada manualmente. Luego de austemperadas, las probetas fueron ensayadas a impacto a temperatura ambiente y sus resultados permitieron escoger los tiempos para austemperado de las probetas que serían ensayadas a diferentes temperaturas.

2.1.3 Austemperado para determinar la temperatura de transición

El tratamiento de austemperado para determinar la temperatura de transición fue realizado como se describe en el numeral anterior. Las

variaciones que tiene son: i) el tiempo escogido de sostenimiento en las sales corresponde a la máxima energía absorbida y ii) la temperatura del ensayo de impacto varió entre -70°C y 150°C con el propósito de determinar la temperatura de transición.

2.1.4 Impacto Charpy

Los ensayos de impacto Charpy se realizaron según la norma ASTM A 327 - 91, en probetas tipo A ($10 \times 10 \times 55\text{mm}$) sin entalla. Para cada tiempo de austemperado, se ensayaron tres probetas de impacto tanto para el ciclo descrito en 2.1.2 como el descrito en 2.1.3. Para el ensayo se utilizó una máquina marca AMSLER con martillo de 30 Kg,

2.2 Dureza y microestructura

Para la medición de la dureza de las probetas austemperadas, éstas fueron cortadas a la mitad y preparadas metalográficamente. Luego se les realizó el ensayo de dureza utilizando un durómetro WOLPERT UNIVERSAL, modelo Testor 2RC, con escalas de dureza Vickers, Brinell y Rockwell. La escala utilizada fue la Vickers con una carga de 31.25 Kg. y se realizaron un mínimo de 6 mediciones y un máximo de 8 por muestra.

Para la identificación microestructural, se utilizó un microscopio óptico marca Olympus PME con capacidad hasta de 2000 aumentos y un microscopio electrónico de barrido, marca Jeol 5900 LV. Para el ataque químico se usaron los siguientes reactivos: Nital al 2% y 4% y Lepera. (Norma ASTM E 407- 93.)

2.3 Fractografía

Con el fin de evidenciar las diferencias en las fracturas y en los mecanismos de fallas en las probetas impactadas a bajas y altas temperaturas, las fracturas fueron observadas en un microscopio electrónico de barrido marca Jeol 5900 LV.

3. Resultados y discusión

3.1 Impacto de la fundición nodular, austemperada a diferentes temperaturas

En las figuras 3 y 4 se aprecia con claridad la ventana del proceso y se determina, así, el tiempo para el

cual se obtiene la mayor energía absorbida (50 min. para $T_a = 350$ y 400°C). En éstas, se pone de manifiesto que a 350°C y 400°C la ventana del proceso es similar, al igual que las energías máximas absorbidas como se ve claramente en la figura 5. En la figura 2, no se aprecia con claridad la ventana del proceso, debido a la menor la rata de difusión del carbono a temperaturas inferiores de 350°C , favoreciéndose la precipitación de carburos y en consecuencia, obteniéndose la mezcla de microestructuras dada por austenita de alto carbono, ferrita bainítica y carburos.

El tiempo seleccionado para el austemperado a 300°C fue 90 minutos, tiempo en el cual se obtuvo la energía máxima, la cual permanece constante para tiempos mayores.

Figura 2. Energía absorbida vs. tiempo de austemperado a 300°C para fundición nodular no aleada

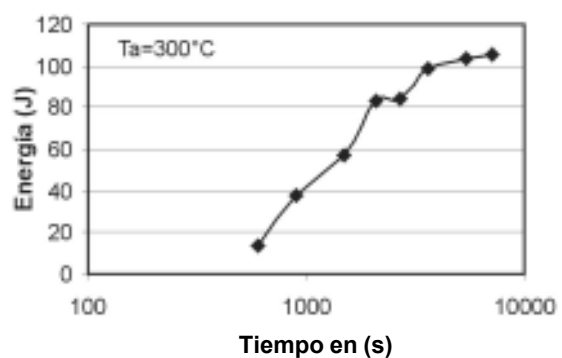
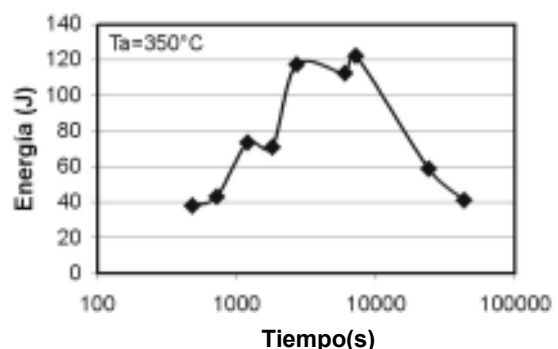


Figura 3. Energía absorbida vs. tiempo de austemperado a 350°C para fundición nodular no aleada



Al confrontar estos resultados de tenacidad con los de resistencia mecánica reportados por Blackmore, Rundman, y otros, se ve claramente que el austemperado a 350°C ofrece ventajas frente el austemperado a 400°C. A saber: mayor dureza y resistencia mecánica a igual tenacidad.

Figura 4. Energía absorbida vs. tiempo de austemperado a 400°C para fundición nodular no aleada

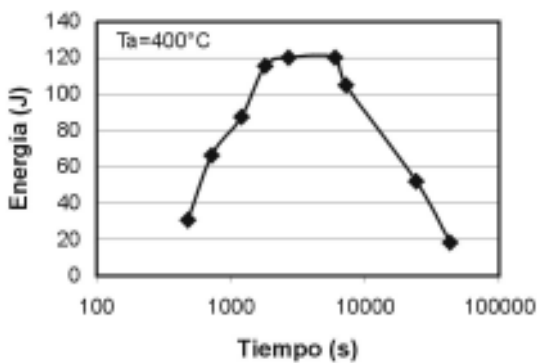
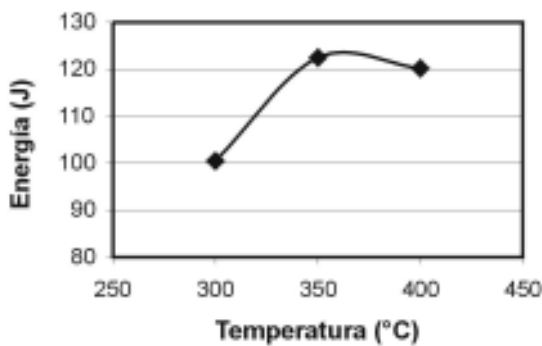


Figura 5. Energía máxima absorbida vs. temperatura de austemperado para fundición nodular no aleada



3.2 Energía absorbida variando temperatura de ensayo

De la información precedente se determinó el tiempo de austemperado que produce la más alta energía de impacto para cada una de las temperaturas utilizadas, tabla 2.

Tabla 2. Temperatura y tiempo de austemperado utilizados en el ensayo

Temperatura de austemperado, °C	Tiempo de austemperado, min
300	90
350	50
400	50

En las figuras 6, 7 y 8 se presentan los resultados de energía absorbida obtenidos en probetas de impacto no entalladas de fundición nodular no aleada, luego de austemperar a las temperaturas y tiempos señalados en la tabla 2 y ensayadas a diferentes temperaturas desde -70°C hasta 150°C. En estas figuras se pone en evidencia la temperatura de cambio de dúctil a frágil; temperatura de transición.

Figura 6. Energía absorbida vs. temperatura de ensayo para la fundición nodular no aleada austemperada a 300°C. 50 min

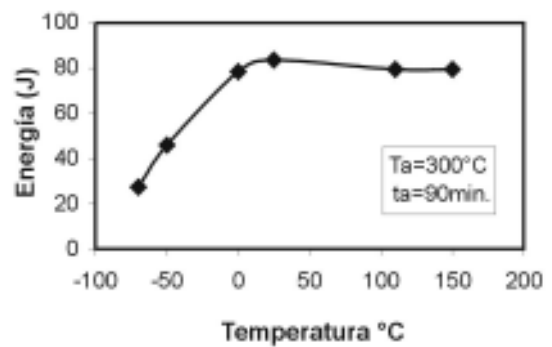


Figura 7. Energía absorbida vs. temperatura de ensayo para la fundición nodular no aleada austemperada a 350°C. 50 min

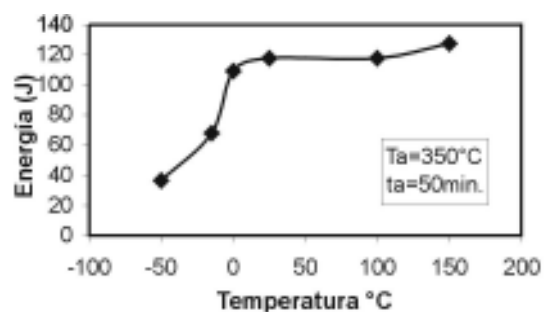
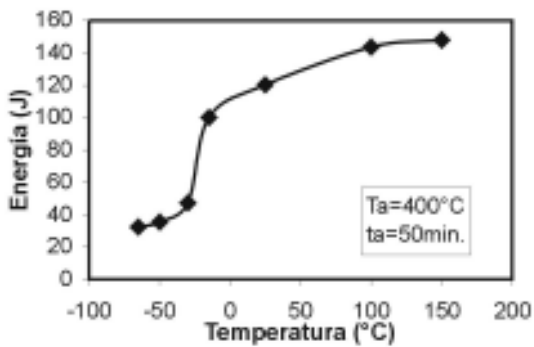


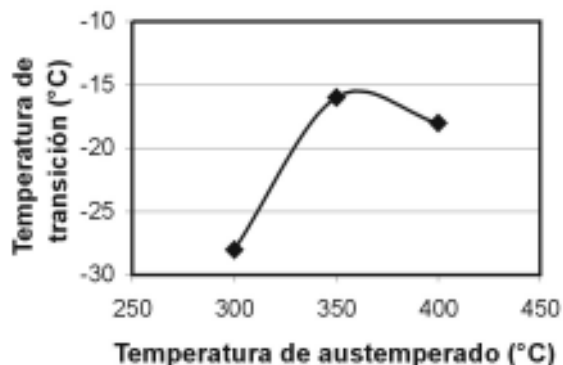
Figura 8. Energía absorbida vs. temperatura de ensayo para la fundición nodular no aleada austemperada a 400°C. 50 min



Tal como se aprecia en la figura 9 a medida que se hace menor la temperatura de austemperado, la temperatura de transición disminuye. Esta variación podría ser ocasionada por la estabilidad que proporciona la composición química de la austenita retenida y la ferrita. A medida que disminuye la temperatura de austemperado, la austenita retenida incrementa su contenido de carbono y por ende su estabilidad química. Además, cuando la austenita retenida transforma a ferrita bainítica se presenta una expansión volumétrica generando una presión hidrostática que contribuye en la estabilización de la estructura.

Estructuras más estables requieren temperaturas más bajas para el inicio de la formación de martensita, M_s . Por esta razón, las estructuras correspondientes a la temperatura de austemperado $T_a = 300^\circ\text{C}$ presentan mayor estabilidad y en consecuencia, una menor temperatura de transición.

Figura 9. Temperatura de transición versus temperatura de austemperado

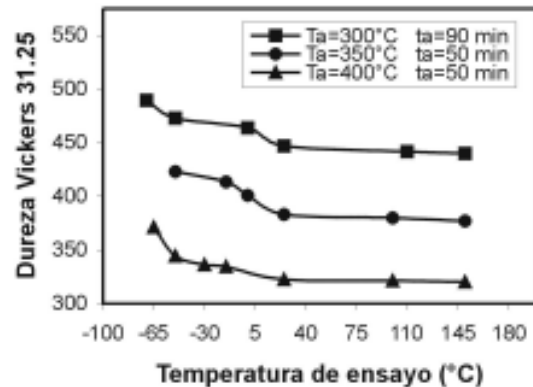


3.3 Dureza

Para tratar de verificar la hipótesis planteada en el numeral anterior, se hicieron mediciones de durezas a las probetas austemperadas a 300, 320 y 400°C y con temperatura de ensayo entre -70°C y 150°C y tal como se ilustra en la figura 10 se produjo un cambio apreciable en la dureza.

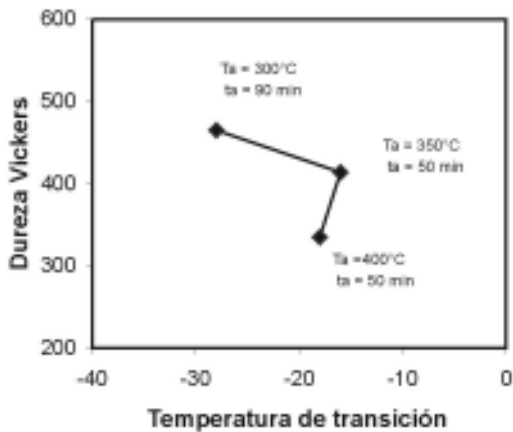
Estos cambios de dureza sólo se dan si hay cambios microestructurales. Como la dureza aumentó al disminuir la temperatura de ensayo, es predecible que se hubiese dado una transformación de alguna de las fases hacia otra fase de mayor dureza. Posiblemente, la austenita transformó a martensita y también pudo darse alguna formación de carburos al perder el carbono solubilidad en la ferrita por efecto de la baja temperatura.

Figura 10. Variación de la dureza con respecto a la temperatura de ensayo para diferentes temperaturas de austemperado



En la figura 11 se muestra la variación de la dureza con respecto a la temperatura de transición de la fundición nodular aleada y austemperada de acuerdo a los valores de tiempo y temperatura consignados en la tabla 2. De esta figura se desprende que a medida que la temperatura de austemperado decrece, la temperatura de transición disminuye, conservando los niveles de dureza propios del ciclo considerado. Para temperaturas de austemperado entre 350 y 400°C, la temperatura de transición está en el rango de -15 a -20°C , conservando la dureza propia de cada ciclo. Sus tenacidades se reportan en las figuras 6 a 8.

Figura 11. Variación de la dureza vs temperatura de transición para FNA



3.4 Microestructura

Mediante observación metalográfica se puso en evidencia la diferencia microestructural obtenida en las probetas austemperadas a 300°C y ensayadas a -70°C y 25°C, austemperadas a 350°C y ensayadas a -50°C y 100°C, y austemperadas a 400°C y ensayadas a -65°C y 100°C. En la figura 12 se pueden observar algunas diferencias en las microestructuras, sin poder aún precisar si se trata de transformación de austenita en martensita o precipitación de carburos.

Estas mismas muestras se inspeccionaron mediante microscopía electrónica, tal como se ilustra en la figura 13; poniendo de manifiesto las grandes diferencias microestructurales entre las muestras ensayadas a bajas y altas temperaturas.

Figura 12. Microestructuras de fundición nodular austemperada a diferentes temperaturas y ensayadas a diversas temperaturas

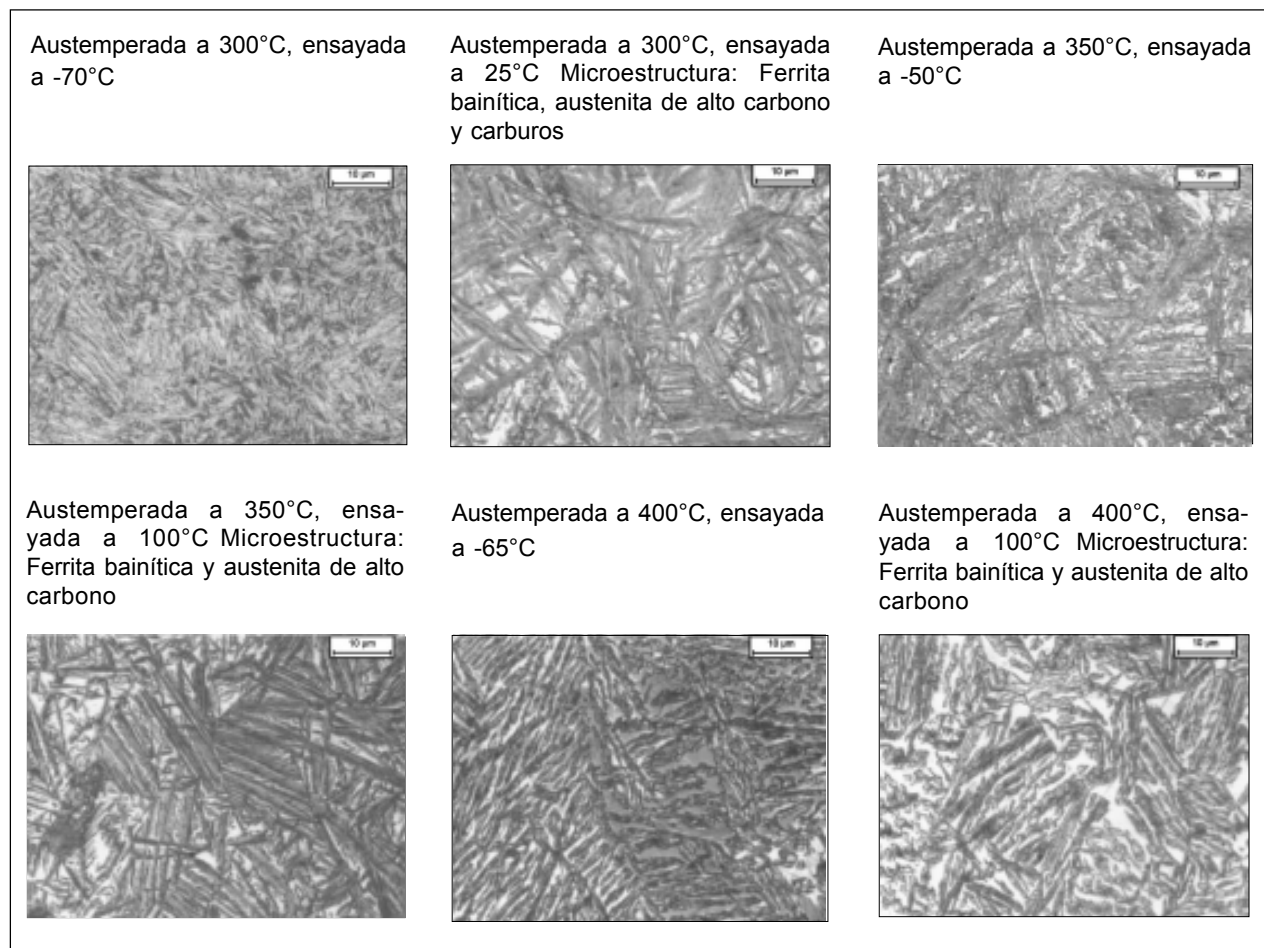
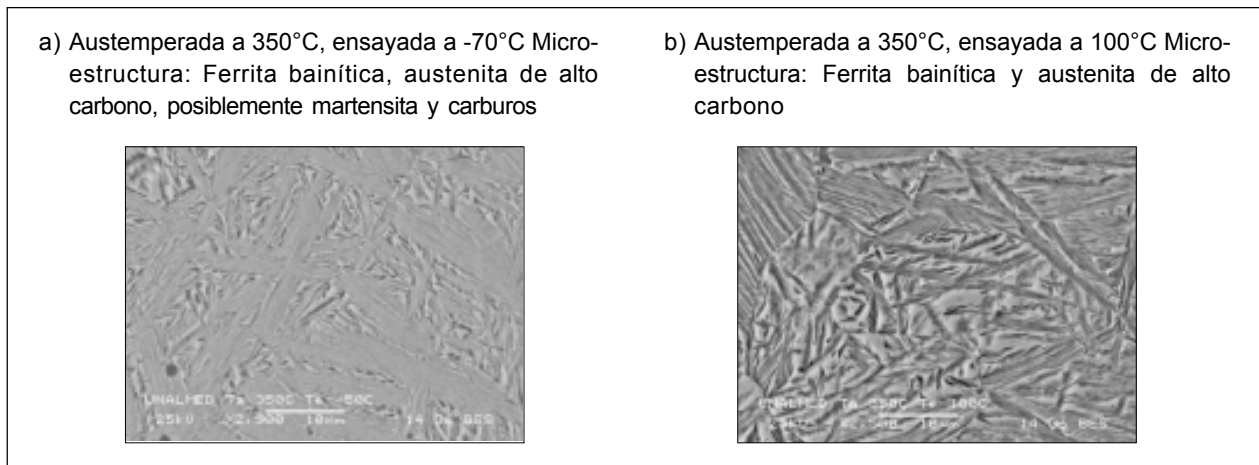


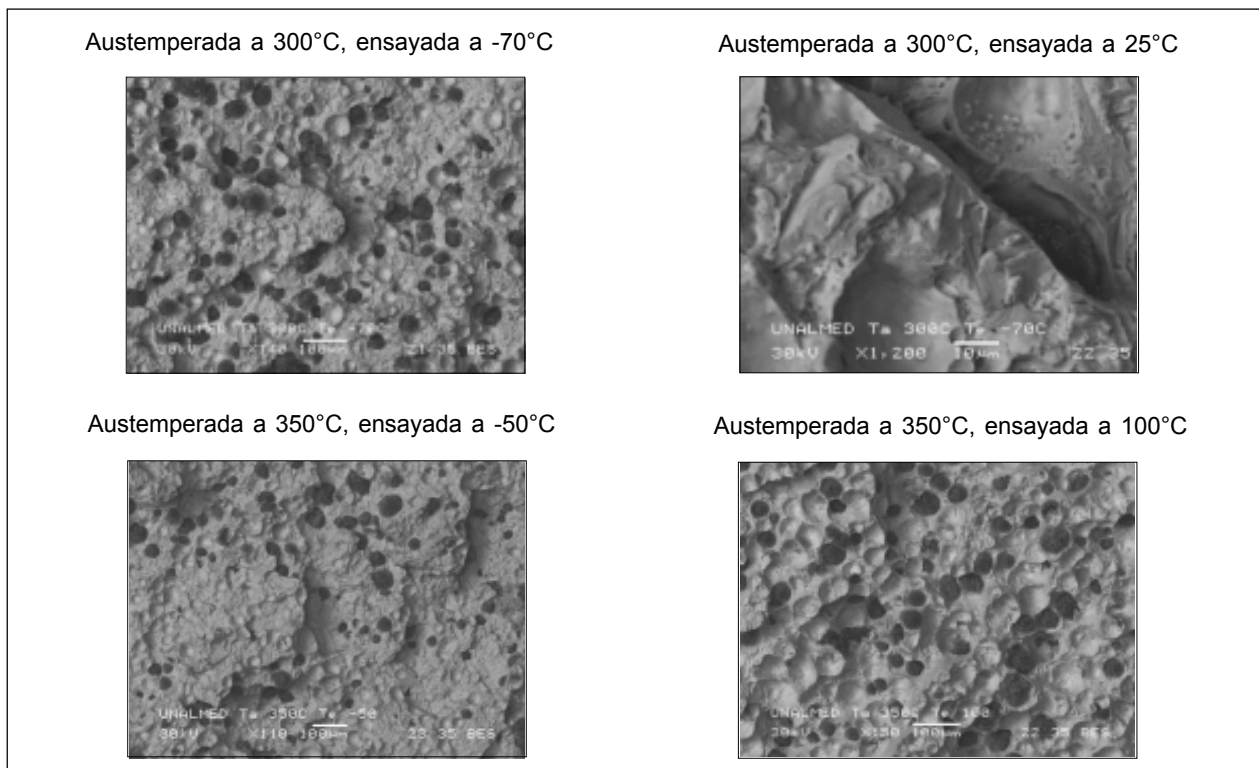
Figura 13. Micrografías microscopio electrónico, (a, b)

3.5 Fractura

En la figura 14 se presentan las fracturas obtenidas en muestras austemperadas a 300 y 350° y ensayadas a impacto a temperaturas de -70°C, y 25°C para las primeras y -50°C y 100°C para las segundas.

Para temperaturas de ensayo subcero, la fractura es plana y la propagación de la grieta avanza por la intercara grafito matriz.

Para temperaturas superiores a 0°C, la fractura tiene mayor relieve poniendo de manifiesto mecanismos de falla por cizalladura. Sin embargo, la propagación de la grieta se da también por la intercara grafito matriz.

Figura 14. Tipos de fracturas

Conclusiones

La máxima energía absorbida para temperaturas de austemperado correspondientes a: $T_a = 350\text{ °C}$ y $T_a = 400\text{ °C}$ presenta un valor similar (120 J). Para la temperatura de austemperado, ($T_a = 300\text{ °C}$), la energía absorbida es menor (100 J). En todos los casos se cumple con suficiencia los mínimos de la norma ASTM A897M-90.

El mecanismo de fractura para la fundición nodular austemperada no aleada se presenta a través de la intercara grafito matriz, independientemente de la temperatura de ensayo.

El cambio de dúctil a frágil en la fundición nodular austemperada no aleada, parece estar relacionado con cambios microestructurales, ocasionados por enfriamientos sub-cero.

Los posibles cambios microestructurales que se dan por la temperatura sub-cero producen cambios de dureza cercanos al 15% en comparación con los reportados por la fundición nodular austemperada no aleada a temperatura ambiente.

Al disminuir la temperatura de austemperado se presenta una caída en la temperatura de transición.

Para tener certidumbre de los cambios microestructurales, sería conveniente realizar difracciones de rayos x en las zonas cercanas a la fractura y en algunas alejadas de ella.

Bibliografía

American Society For Testing And Materials (ASTM). (1993). ASTM A327-91. Standard Test Methods for Impact Testing of Cast Irons. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 01.02. pp. 133 - 135.

American Society for Testing And Materials (ASTM). (1994). ASTM A897M-90, Standard Specification Austempered Ductile Iron Castings [Metric]. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 01.02. pp. 552 - 557.

American Society For Testing And Materials (ASTM). ASTM A536-84, Annual Book of ASTM Standards. Vol 2.

ASM/ American Society for Metals. (1978). Metals Handbook. Vol. 4. 9 ed. Ohio. p. 1.

Blackmore A., Peter and Harding A., Richard. (1984). The Effects of Metallurgical Process Variables on the Properties of Austempered Ductile Iron. First International Conference on Austempered Ductile Iron. Chicago Illinois.

Janowak, J. F and Gundlach, R.B. (1983). Development of a Ductile Iron for a Commercial Austempering. En: AFS Transactions. Vol. 91.

Janowak, J. F and GUNDLACH, R.B. (1984 a). Approching Austempered Ductile Iron Properties by Controlled Cooling in the Foundry. First International Conference on Austempered Ductile Iron. Chicago Illinois.

Loper R., Carl Jr. (1984 b). First International Conference on -50, 350 Austempered Ductile Iron Conference Summary. Chicago, Illinois.

Rundman, K.B.; Moore; et al. (1988). The Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron. En: Heat Treating. Vol. 5. No. 2. pp. 79-95.

Walton, Charles F. (editor) (1982). Iron Castings Handbook. Iron Castings Society. 831p.