

EFFECTO DEL TRATAMIENTO DE REVENIDO EN LA FUNDICIÓN NODULAR AUSTEMPERADA

ADRIANA GÓMEZ GÓMEZ Y JUAN MANUEL VÉLEZ RESTREPO

Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

RESUMEN. Fue estudiado el efecto de la temperatura y el tiempo de revenido en las propiedades mecánicas de dos fundiciones nodulares austemperadas, a 375°C y 280°C. Los tratamientos de revenido fueron realizados a temperaturas de 200°C, 300°C, 400°C y 570°C por tiempos entre 0 y 100 horas. El estudio fue realizado en una fundición base (sin aleantes) y en una fundición aleada con 1.5% de Cu. El efecto de la temperatura para un tiempo de 2 horas de revenido, fue evaluado con ensayos de dureza, ensayos de impacto Charpy sin entalla, análisis metalográfico y difracción de rayos X. El efecto del sostenimiento fue estudiado para tiempos entre 1 y 100 horas mediante ensayos de dureza Vickers y análisis metalográfico. El revenido durante 2 horas produjo una descomposición microestructural a partir de 400°C, lo cual fue confirmado por difracción de rayos X. Para las muestras austemperadas a 375°C hubo disminución de la energía de impacto con el incremento de la temperatura de revenido; mientras que las muestras austemperadas a baja temperatura presentaron un aumento de esta propiedad para el revenido a 300°C, disminuyendo a 400°C e incrementándose nuevamente a 570°C. Los ensayos de dureza y el análisis metalográfico no mostraron cambios significativos en las muestras revenidas a 200°C y 300°C con la evolución del tiempo de sostenimiento, mientras que para ambas temperaturas de austemperado las muestras revenidas a 400°C y 570°C mostraron descomposición microestructural y disminución de la dureza.

PALABRAS CLAVES. Fundición Nodular, Austemperado, Revenido, Propiedades.

ABSTRACT. The time and temperature effects on the tempering treatment, was studied in two ADI compositions, alloyed with cooper and base alloy. The austempered was done at 375°C and 280°C. After austempered, the test specimens were tempering at 200°C, 300°C, 400°C and 570°C, at times between 0 and 100 hours. The temperature effect of tempering during two hours, was studied through hardness, unnotched Charpy impact energy, optical microscopy and X-ray diffraction. The time effect was measured through hardness and optical microscopy. After tempering during two hours, the results showed microstructural decomposition at 400°C and 570°C, confirmed with X-ray diffraction. Unnotched Charpy impact energy decreased with increasing of time for high austempered temperature, at low temperature that property increased for 300°C, decreased at 400°C and finally increased at 570°C. Hardness and metallographic studies didn't show significantly changes at 200°C and 300°C tempering temperatures with evolution time. Increasing tempering temperatures to 400°C and 570°C caused microstructural decomposition and decrement in hardness.

KEY WORDS. Austempered Ductile Iron, Tempering, Properties.

1 INTRODUCCIÓN

La fundición nodular austemperada (**FNA**) permite lograr una excelente combinación de propiedades mecánicas como: resistencia a la tracción entre 850 y 1600 MPa, límite elástico entre 550 y 1300 MPa, elongación entre 1% y 10% y resistencia al impacto sin entalla entre 30 J y 120 J. Estas propiedades están reguladas según norma **ASTM 897M-90** (American Society for Metals, 1990), la cual establece cinco clases de fundición nodular austemperada según los rangos de límite elástico y resistencia a la tracción.

Esa excelente combinación de propiedades encontradas en la fundición nodular austemperada, es debida a la microestructura de la matriz metálica, formada por austenita estabilizada y ferrita bainítica, denominada ausferrita. La estabilización de la austenita a temperatura ambiente se logra con la presencia de grandes cantidades de carbono en esa fase; este ele-

mento disminuye la temperatura de inicio de formación de martensita (M_S) que alcanza valores hasta de -120°C, para contenidos de Carbono entre 1,6% y 2,0% (Gundlach y Janowak, 1985). Cualquier cambio que ocurra con la austenita estabilizada, ya sea en sus características o en su cantidad, afectará las propiedades mecánicas de la fundición nodular austemperada.

La estabilidad de la fase austenítica puede ser afectada por la temperatura, caso conocido como estabilidad térmica o termodinámica, o por la presencia de esfuerzos o de deformaciones, lo que es referido como estabilidad mecánica. En el primer caso la austenita puede presentar transformación a martensita si el componente sufre enfriamientos a temperaturas muy bajas; por otro lado, si hay calentamiento de la fase pueden presentarse procesos de descomposición de esa austenita en fases más estables, como lo son ferrita y

Tabla 1. Composición química de los materiales utilizados

Fundición	Composición				
	%C	%Si	%CEquiv	%Mn	%Cu
Aleada con Cu	3,61 - 360	2,85 - 2,80	3,97 - 3,94	0,15	1,5
Base	3,63 - 360	2,95 - 2,61	4,00 - 3,90	0,15	-

Tabla 2. Características microestructurales del material en estado de colada.

	Aleada con Cu	Material Base
Nodularidad (%)	95	95
Conteo de nódulos/mm ²	150	150
Matriz ferrítica (%)	20	45
Matriz perlítica (%)	70	45
Dureza (HV)	256	184

carburos.

La presencia de esfuerzos aplicados al material puede generar modificación de la temperatura M_S (Reed Hill, 1964). La austenita retenida puede transformar a martensita si el esfuerzo aplicado produce una deformación que va en el mismo sentido de la formación de las placas de martensita, esto causa aumento en la temperatura M_S . Si la deformación generada es contraria, ocurrirá mayor estabilización de la austenita.

Es importante también mencionar el efecto de la deformación plástica. La austenita que ha sufrido este tipo de deformación trasformará a martensita a una temperatura superior a la M_S propia de la composición, conocida como temperatura M_d (Porter y Easterling, 1987).

Deben conocerse los cambios que ocurren durante el calentamiento de componentes fabricados en FNA, debido a su implicación en las propiedades mecánicas y en las dimensiones del elemento. Algunos autores (Nadkarni et al., 1996; Massone et al., 1996; Liu et al., 1994) han estudiado la descomposición de la austenita presente en la FNA, en condiciones de calentamiento a diferentes temperaturas. Los resultados han mostrado una caída de las propiedades mecánicas debida a la transformación de la austenita estabilizada durante el calentamiento. Al respecto pueden plantearse varias hipótesis:

Transformación de la austenita a martensita secundaria, lo que lleva a una disminución de la tenacidad y la ductilidad (Chobaut, 1988).

Transformación de la austenita en bainita.

Fragilidad causada por el revenido de la austenita retenida a temperaturas entre 260°C y 370°C.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la variación de la microestructura y de las propiedades mecánicas de la fundición nodular austemperada so-

metida a tratamiento de revenido a diferentes temperaturas. El conocimiento del rango de temperaturas en que se presenta estabilidad de la microestructura, después del tratamiento de austemperado, permitirá determinar la utilización de este material en la fabricación de componentes que pueden presentar calentamiento durante la operación. Un caso de especial interés es el contacto deslizante seco, sin presencia de lubricación.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

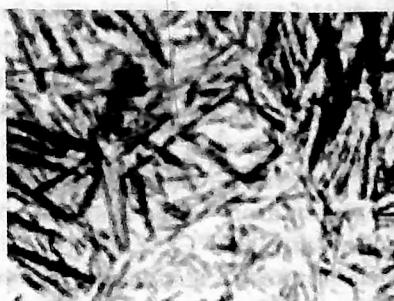
2.1 Materiales y Tratamientos Térmicos

Fueron estudiados dos tipos de fundición cuya composición se muestra en la tabla 1. El líquido fue vaciado en bloques Y de 25 mm de espesor. En la tabla 2 se presentan las características microestructurales de material en estado de colada. La adición de 1,5% de Cu a la fundición nodular fue realizada para evaluar la influencia de ese elemento en la microestructura, tanto en la condición de austemperado como sometido a revenido.

Las muestras fueron extraídas de la parte central de la zona aprovechable del bloque en Y, con el fin de garantizar igual número de nódulos.

Las fundiciones fueron austenizadas a 900°C durante dos horas; luego fueron austemperadas a 375°C y 280°C durante una y dos horas respectivamente. El tratamiento de revenido fue realizado a temperaturas de 200°C, 300°C, 400°C y 570°C por tiempos de 1, 2, 10, 40 y 100 horas para cada temperatura.

Las temperaturas seleccionadas para el revenido corresponden al rango utilizado en los aceros (200°C-600°C). Esos tratamientos permiten conocer si hay alguna relación entre las temperaturas de revenido y de austemperado. La temperatura de 570°C fue seleccio-



a) Material base, austemperado a 375°C



b) Material base, austemperado a 280°C

Figura 1. Microestructura obtenida con el material austemperado.

nada para evaluar la posible formación de precipitados de cobre, como es sugerido por otros autores.

2.2 Microestructura

La evolución microestructural fue estudiada con microscopio óptico, se realizaron además pruebas de difracción de rayos X para determinar la variación de la fracción volumétrica de austenita, utilizando un difractómetro Philips tipo PW1710, usando 40 kV, 40 mA, tubo de cobre y radiación k_α .

2.3 Propiedades Mecánicas

Con el fin de estudiar el cambio en las propiedades mecánicas antes y después del tratamiento de revenido, se hicieron medidas de dureza Vickers y de energía absorbida en el ensayo de impacto Charpy (sin entalla), utilizando 3 muestras por ensayo según norma ASTM E23.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Características del Material Austemperado

3.1.1 Microestructura

En ambas fundiciones tratadas a 375°C la microestructura está formada por paquetes de láminas gruesas de ferrita bainítica y austenita estabilizada entre ellas, denominada ausferrita (Figura 1a). Se observaron regiones de austenita en bloque entre las láminas de ferrita bainítica, fenómeno más acentuado en la fundición aleada con Cu. La microestructura obtenida con el austemperado a 280°C, consiste de láminas finas de ferrita bainítica y austenita estabilizada entre ellas (Figura 1b).

3.1.2 Propiedades Mecánicas

La Tabla 3 muestra la dureza y la energía absorbida en el ensayo de impacto Charpy de las fundiciones en el estado austemperado.

Tabla 3. Propiedades mecánicas en estado austemperado

FNA	0% Cu	1,5% Cu
T _A (°C)	280	375
Dureza (HV)	483	335
Charpy (J)	25	87
	31	86

Se observa que el material aleado con Cu presentó menor dureza que el material base. Esto es debido a la mayor fracción volumétrica de austenita estabilizada presente en las fundiciones con 1,5% Cu, acorde con lo reportado por otros autores. Los valores de energía de impacto no mostraron diferencias en el tratamiento a 375°C, mientras que a 280°C la fundición aleada con Cu presentó mayor energía de impacto. Este resultado puede ser atribuido a la capacidad del Cu para inhibir la formación de carburos a bajas temperaturas de austemperado.

3.2 Efecto del Revenido a Diferentes Temperaturas Durante 2 Horas

3.2.1 Variación Microestructural

Para ambas fundiciones austemperadas a alta y baja temperatura, y revenidas a 200°C y 300°C no hubo cambio en la morfología de la matriz metálica. Las microestructuras de las muestras revenidas a 400°C, para todas las condiciones de austemperado, revelan que hay una descomposición de la estructura laminar, siendo más acelerada en la fundición base. Se observa formación de martensita dentro de la austenita en bloques, más acentuada en la fundición aleada con Cu que puede ser atribuida a la desestabilización de la austenita durante el tratamiento de revenido. Este resultado sugiere la existencia de una "temperatura crítica" superior a 300°C para que ocurra la descomposición de la microestructura.

La microestructura de los materiales revenidos a

570°C muestra que se ha iniciado un proceso de ferritización de la matriz, se observan carburos globulizados muy finos en una matriz ferrítica, algunos de los cuales conservan una tendencia de orientación laminar de acuerdo con la microestructura inicial.

3.2.2 Variación de la Fracción Volumétrica de Austenita Estabilizada

La figura 2 muestra el cambio de la fracción de austenita estabilizada con la temperatura de revenido para un tiempo de dos horas. La fracción de esa fase fue mayor en las muestras austemperadas a 375°C que en las tratadas a 280°C. La fundición aleada con Cu presentó mayor cantidad de austenita que la fundición base para todas las temperaturas de revenido. Este resultado coincide con lo afirmado por Sierra (1997), quien encontró que la adición de Cu produce un aumento de la fracción volumétrica de austenita estabilizada.

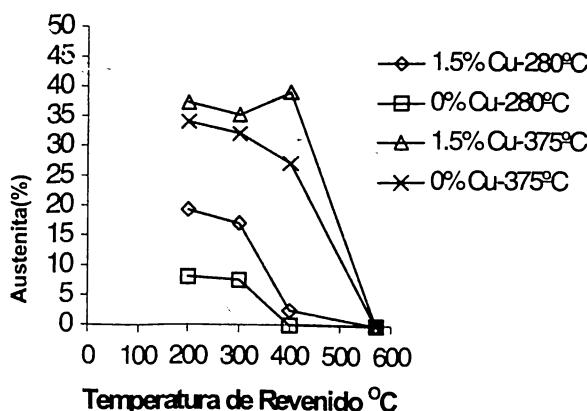


Figura 2. Variación de la fracción volumétrica de austenita con la temperatura de revenido. Tiempo de revenido 2 horas.

Se observa que el tratamiento de revenido produce una reducción de la fracción volumétrica de austenita estabilizada. Esto indica que esta fase, responsable por la buena combinación de propiedades mecánicas de la FNA, es desestabilizada con tratamientos de revenido superiores a 200°C.

Entre 200°C y 300°C hay una leve disminución de la fracción volumétrica de austenita en todas las condiciones de tratamiento. Este resultado es consistente con la variación microestructural descrita anteriormente.

El revenido a temperaturas superiores a 300°C produjo una caída fuerte de la austenita en las muestras austemperadas a 280°C, no encontrándose austenita después del revenido a 400°C durante dos

horas en la fundición base, mientras que la fundición de 1,5% Cu ese valor fue 2%. Este resultado confirma la descomposición de la microestructura detectada para esa temperatura de revenido en las dos composiciones estudiadas.

Las muestras austemperadas a 375°C, por otro lado, presentaron una disminución lenta de la austenita entre 300°C y 400°C; el aumento encontrado en la muestra aleada con Cu puede ser considerado dentro del margen de error del experimento. Esta mayor estabilidad de la austenita fue corroborada por los resultados de Baricco et al. (1999), quienes encontraron que para fundiciones nodulares austemperadas a alta temperatura la transformación de austenita estabilizada se da entre 470°C y 520°C, dependiendo de la composición de la fundición nodular.

El revenido a 570°C produjo una transformación total de la austenita, coherente con el proceso de ferritización ya descrito.

Los resultados obtenidos con la variación de la fracción volumétrica de austenita estabilizada, son consistentes con la descomposición microestructural. Esto es, hay una pequeña disminución de la austenita para tratamientos a temperaturas inferiores a 300°C. Para temperaturas de revenido superiores a 400°C se muestra una tendencia continua de disminución de la austenita para las dos composiciones y las dos temperaturas de austemperado, hecho que coincide con el proceso de descomposición de la microestructura.

3.2.3 Variación de la Dureza

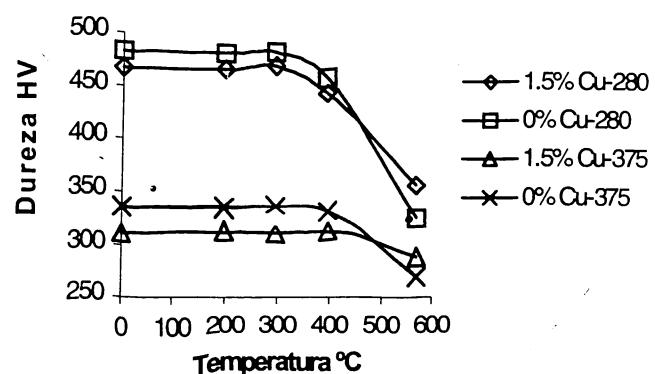


Figura 3. Variación de la dureza con la temperatura de revenido para tiempos de 2 horas.

La figura 3 muestra la variación de la dureza con la temperatura de revenido para 2 horas de sosténimiento. Las muestras austemperadas a 280°C no muestran gran variación en la dureza hasta la temperatura de 300°C, a partir de la cual hay una

caída acentuada de esa propiedad para ambas fundiciones. Las fundiciones tratadas a 375°C mostraron una dureza aproximadamente estable con la temperatura de revenido hasta 400°C. A 570°C se observa para ambos tratamientos una reducción fuerte de la dureza que evidencia el proceso de ferritización descrito.

Se observa en general que el material aleado con cobre presenta menores valores de dureza que la fundición base en estado austemperado y para todas las temperaturas de revenido, excepto para la temperatura de 570°C donde las muestras aleadas manifiestan mayor dureza para ambos materiales. Esa menor dureza es explicada por la presencia de mayores cantidades de austenita estabilizada.

El valor de dureza superior obtenido en el material revenido a 570°C ha sido atribuido por Murayama et al. (1999) a la formación de precipitados de Cu en algunas aleaciones ferrosas aleadas con Cu cuando son sometidas a tratamientos de revenido de la martensita a temperaturas del orden de 580°C.

3.2.4 Energía de Impacto

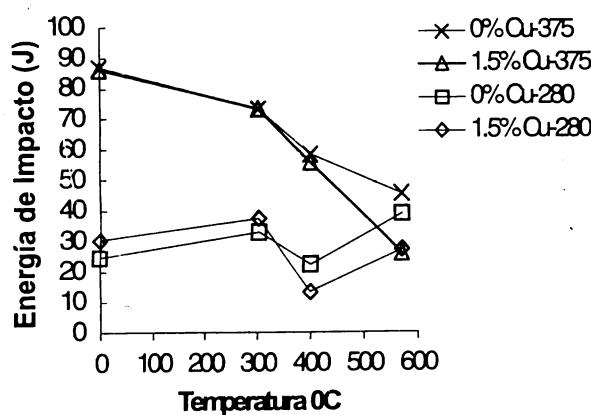


Figura 4. Variación de la energía de impacto con la temperatura de revenido para las muestras austemperadas a 375°C y 280°C; tiempo de revenido 2 horas.

La figura 4 muestra el cambio de la energía de impacto con la temperatura de revenido. Para la gráfica se utilizó la media de los tres datos tomados durante el ensayo.

Puede observarse que las muestras austemperadas a 375°C presentan una disminución continua en la energía de impacto para todas las temperaturas de revenido (300°C a 570°C) y tiempo de sostenimiento de 2 horas. La descomposición de la austenita en ferrita y carburos es responsable por este comportamiento, como lo evidencia la curva de variación de

austenita con la temperatura de revenido (Figura 2) que tiene gran similitud con la curva de energía de impacto. Es importante destacar que la observación al microscopio óptico no reveló los cambios de tenacidad detectados con el revenido a bajas temperaturas (200°C y 300°C), sin embargo es necesario estudiar el efecto en la tenacidad de tiempos de tratamiento superiores a 2 horas.

Las muestras austemperadas a 280°C, mantienen su nivel de Energía de Impacto hasta la temperatura de 300°C. El tratamiento a 400°C produjo una fuerte caída de la energía de impacto, que puede ser explicada por la disminución de la fracción volumétrica de austenita estabilizada, coherente con la descomposición de la microestructura observada para ese tiempo de revenido. El revenido a 570°C de estas muestras produjo un aumento sensible de la Energía de Impacto acorde con el proceso de ferritización ocurrido en el material.

Las muestras sin alejar austemperadas a ambas temperaturas y revenidas a 400°C y 570°C, presentaron mayor energía de impacto que las aleadas con Cu, resultado de una mayor descomposición de la estructura austemperada. Esto sugiere la existencia de un efecto del Cu en la estabilidad de la microestructura que retarda la ferritización del material.

3.3 Efecto del Tiempo de Revenido

3.3.1 Variación Microestructural

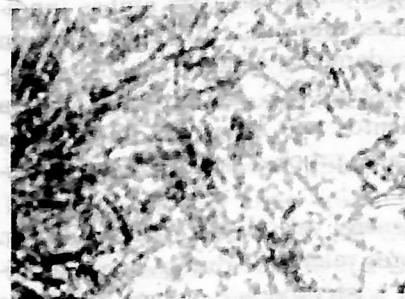
El tratamiento de revenido a temperaturas de 200°C y 300°C, aun para tiempos largos de tratamiento (100 horas) no produjo una modificación de la microestructura para ambas composiciones y condiciones de austemperado. La figura 5 muestra las microestructuras de la fundición base en estado austemperado y revenidas a 300°C durante 100 horas. La fundición aleada con 1,5% de Cu presentó un comportamiento similar.

Este resultado sugiere que calentamientos a temperaturas inferiores a 300°C no producen deterioro del componente, sin embargo debe hacerse estudios de variación de austenita y de la tenacidad para esos tiempos de tratamiento. Aunque no fue medida la fracción de austenita para tiempos largos, y para tiempos de 2 horas se observó una pequeña disminución, Nadgarki et al. (1996) no encontraron una reducción significativa de dicha fracción para materiales revenidos a 200°C y 300°C, en tiempos de hasta 94 horas, lo que ratifica la estabilidad de la austenita estabilizada en tiempos largos para dichas temperaturas.

Para el revenido durante 40 horas a 400°C, en los dos materiales austemperados a ambas temperaturas



a) Material base, austemperado a 375°C, revenido a 300°C durante 100 horas.



b) Material base, austemperado a 280°C, revenido a 300°C durante 100 horas.

Figura 5. Microestructuras de las probetas de material base. Revenidas a 300°C. 700x

la microestructura comienza a presentar formación de ferrita, proceso más acentuado en la fundición austemperada a baja temperatura. La fundición base presenta una descomposición más acelerada que en la fundición con Cu.

A 570°C se observa un proceso de ferritización a partir de 2 horas de tratamiento, para tiempos largos la ferritización está muy avanzada y se observan carburos globulizados muy finos. Resultado semejante fue encontrado por Massone et al. (1996).

3.3.2 Variación de la Dureza

Las figura 6 muestra el cambio de la dureza con el tiempo y la temperatura de revenido para ambas fundiciones austemperadas a 375°C. La figura 7 muestra el mismo resultado para el tratamiento a 280°C.

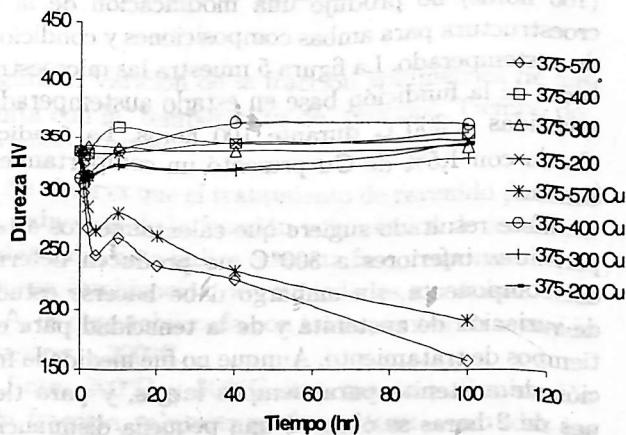


Figura 6. Variación de la dureza con el tiempo de revenido para ambas fundiciones austemperadas a 375°C, para todas las temperaturas de revenido.

Los tratamientos de revenido de baja temperatura (200°C y 300°C) para ambas temperaturas de austemperado produjeron poca variación de la dureza en el

tiempo, resultado consistente con la estabilidad detectada en la microestructura. Los resultados de variación de dureza y microestructura en este rango de temperatura sugieren que no hay grandes cambios en la fracción volumétrica de austenita, debido a que la descomposición de esa fase implicaría cambios microestructurales. La estabilidad de esa propiedad puede resultar, sin embargo, de una compensación de caída de dureza de la matriz con la precipitación de carburos.

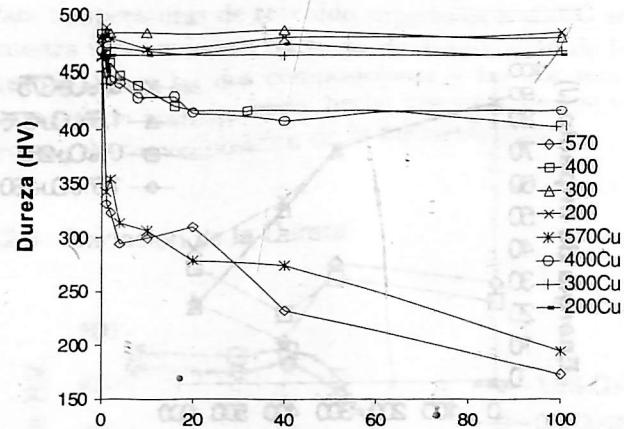


Figura 7. Variación de la dureza con el tiempo de revenido para ambas fundiciones austemperadas a 280°C, para todas las temperaturas de revenido

El revenido a 400°C produjo una caída continua de la dureza en las muestras austemperadas a 280°C para ambas fundiciones, mientras que las muestras austemperadas a 375°C manifiestan un incremento de esa propiedad inclusive para tiempos de sostenimiento hasta de 100 horas. Este aumento puede atribuirse a la precipitación de carburos a partir de la austenita estabilizada, como fue afirmado por Chobaut (1988), este suceso no se evidenció durante la observación en el microscopio óptico. Para esta temperatura de revenido, el material aleado con Cu presentó menor dureza en las muestras austemperadas a baja temperatura, mien-

tras que en las austemperadas a 375°C la dureza del material con Cu fue mayor a partir de 20 horas de tratamiento.

En el revenido a 570°C puede observarse claramente una caída fuerte en la dureza para todas las condiciones estudiadas. En las muestras aleadas con Cu se obtuvieron durezas mayores que en el material base en este tratamiento de revenido.

4 CONCLUSIONES

Del estudio realizado en el presente trabajo acerca de la estabilidad de la microestructura y de la variación de las propiedades mecánicas obtenidas en tratamientos de austemperado a 280°C y 375°C de dos fundiciones nodulares, sometidas a tratamiento de revenido a diferentes tiempos y temperaturas, pueden plantearse las siguientes conclusiones:

Sobre la Estabilidad de la Microestructura. Los revenidos a temperaturas inferiores a 300°C no produjeron variación de la microestructura, independiente de la composición química y de la temperatura de austemperado, aun en tiempos largos de tratamiento. Temperaturas mayores produjeron descomposición microestructural a partir de 2 horas de revenido.

Sobre el Efecto de la Adición de Cu. Se presentó un aumento de la fracción volumétrica de austenita con la adición de 1,5% Cu, que produjo menor dureza de los materiales en condición de austemperado.

La dureza de las fundiciones aleadas con Cu fue menor que para el material base a todas las temperaturas de revenido, excepto en las muestras revenidas a 570°C y en las austemperadas a 375°C y revenidas a 400°C. Además el proceso de descomposición microestructural fue siempre más lento para la fundición aleada con Cu.

Sobre la Variación de las Propiedades Mecánicas Medidas. Las fundición nodular austemperada a altas temperaturas presentó disminución de la energía de impacto para todas las temperaturas de revenido, indicando que este tratamiento produce deterioro de las propiedades mecánicas.

El revenido hasta 300°C del material austemperado a baja temperatura no produjo variación de la energía de impacto. A partir de 400°C hubo una caída brusca de esa propiedad. Este resultado sugiere un buen comportamiento del material en esa condición cuando sufre calentamiento a temperaturas inferiores a 300°C.

Las fundiciones austemperadas a 375°C mostraron poca variación de la dureza con el tiempo de revenido para temperaturas inferiores a 400°C, aún para los

tiempos de 100 horas.

Las fundiciones austemperadas a 280°C presentaron estabilidad de la dureza con el tiempo de revenido hasta 300°C.

Conclusión General. Puede concluirse que el tratamiento de revenido a temperaturas inferiores a 300°C produce una mejora de las propiedades de la fundición nodular austemperada a baja temperatura. La fundición nodular austemperada a alta temperatura disminuye sus propiedades con el tratamiento de revenido en todo el rango de temperaturas estudiado.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Caracterización Tecnológica de Materiales de la Escola Politécnica de la Universidad de São Paulo (Brasil) por su colaboración en la realización de la pruebas de Difracción de Rayos X.

REFERENCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF METALS (ASTM). Annual Book of ASTM Standards. Baricco, M., Franzosi, G., Nada R. y Battezzati, L., Thermal Effects due to Tempering of Austenite and Martensite in Austempered Ductile Irons. En: Materials Science and Technology. V15, Junio 1999.
- Chobaut, J. P., Brenot, P. y Schissler, J. P., Secondary Martensite Formation During Tempering of Bainite S. G. Irons. AFS Transactions, Ch. 10, pag. 475-480, 1988.
- Gundlach, R.B. y Janowak, J.F., Austempered Ductile Iron Combines Strength With Toughness and Ductility. Metal Progress, pag. 19, July 1985.
- Liu, Y. C., Schissler, J. M. y Munteanu, A., Étude de la Cinétique de la Transformation au Cours du Vieillissement de la Fonte G.S. Bainitique entre 360 et 420°C. En: La Revue de Métallurgie-CIT/Sciente et Génie des Matériaux. Mayo 1994.
- Massone, J. M., Boeri, R. E. y Sikora, J.A., Decomposition of High-Carbon Austenite in ADI. En: AFS Transactions, pag. 133, 1996.
- Murayama, M., Katayama, Y. y Hono, K., Microstructural Evolution in a 17-4 PH Stainless Steel after Aging at 400°C. Metallurgical and Materials Transactions A. Vol 30, pag. 345-353, February 1999.
- Nadkarni, G., Godkhale, S. y Boyd, J. D., Elevated Temperature Microstructural Stability of Austempered Ductile Irons. En AFS Transactions, pag. 985-994, 1996.
- Porter, D. A. y Easterling, K. E., Phase Transformations in Metals and Alloys. 2 Edition, London, Chapman & Hall, 1992.
- Reed-Hill, R., Physical Metallurgy Principles. New York, 1964.

Sierra Restrepo, H., **Efecto del Cobre en las Transformaciones Isotérmicas de la Fundición Nodular.** Trabajo presentado como requisito parcial para promoción a Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, 1997.