

EFEECTO DEL COBRE EN LA FERRITIZACIÓN DE LA FUNDICION NODULAR

HORACIO SIERRA RESTREPO

*Profesor Titular
Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín*

RESUMEN

Fundiciones nodulares con contenidos de cobre entre 0 y 1.31% fueron ferritizadas, utilizando el denominado ciclo de doble etapa que contempla una austenización y luego un temple isotérmico a temperaturas entre 550 y 750°C durante un cierto tiempo. El propósito del estudio fue evaluar la estabilidad de la perlita a temperatura elevada cuando la fundición contiene cobre. El estudio permitió establecer que contenidos de cobre por encima de 0.50 y hasta 1.31% retardan la globulización de los carburos de la perlita y prácticamente no afectan la tasa de descomposición de la cementita globular en ferrita + carbono.

PALABRAS CLAVES

Fundición nodular aleada con cobre, ferritización, transformación isotérmica.

ABSTRACT

Ductile iron castings alloyed with copper between 0 and 1.31% were annealed, using the two stage annealing cycle which consists of an austenitization and then, an isothermal quenching at temperatures between 550°C and 750°C. The purpose of this study was to evaluate the stability of the pearlite at elevated temperatures when the castings contain copper. It was concluded that amounts of copper, over 0.5% and up to 1.31%, delay the spheroidization process of the carbides of pearlite and do not affect the rate of decomposition of spheroidized cementite in ferrite + carbon.

KEY WORDS

Ductile iron castings alloyed with Copper, ferritization process, isothermal transformations.

1. INTRODUCCION

La ferritización es un tratamiento térmico que se realiza en las fundiciones grises o nodulares para transformar microestructuras perlíticas en ferríticas. Básicamente, existen cuatro ciclos térmicos¹ que permiten realizar esta transformación a saber: ciclo de alta temperatura (900-950°C), ciclo de media temperatura (820-900°C), ciclo de baja temperatura (730-790°C) y ciclo de doble etapa. Los dos primeros involucran austenización completa y bajas velocidades de enfriamiento para propiciar la transformación: austenita en ferrita + grafito.

El primero se utiliza cuando es necesario disociar carburos primarios existentes en las fundiciones y promovidos por elementos como Cr, Mn, Mo, y V. El segundo es usado en fundiciones no aleadas. El tercer ciclo se usa cuando la fundición no contiene carburos masivos y su microestructura es una mezcla de ferrita más perlita. El cuarto ciclo es una combinación de los dos anteriores pues involucra austenización a 900°C y luego un temple en sales a temperaturas entre 550°C - 750°C y sostenimiento durante tiempos variables, dependientes de la temperatura.

En este ciclo, al temprar las muestras en el rango de temperatura indicado, se facilita la transformación isotérmica de austenita en perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), la cual se nuclea a tiempos cercanos a los 10 segundos y toma unos 90 segundos en transformar plenamente. Luego de un tiempo se inicia la descomposición de la perlita recién formada, transformación que toma un cierto tiempo, tal como se ilustra en la Figura 1. La transformación de la perlita en ferrita se da por la disolución de las láminas de carburo de hierro de la perlita en ferrita más grafito.

Esta disolución ocurre en dos etapas.² Primero se da un proceso de esferoidización que conlleva un engrosamiento de las láminas de cementita, seguido de un angostamiento en algunas zonas de ellas y su posterior rompimiento para formar las denominadas patas de perro³, que finalmente adquieren la forma esferoidal. En la segunda etapa se da la disolución del carburo esferoidal siguiendo la reacción: $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C(g)}$ donde el carbono es depositado en los nódulos de grafito preexistentes o precipitado en algunas impurezas dando lugar a una grafitización secundaria².

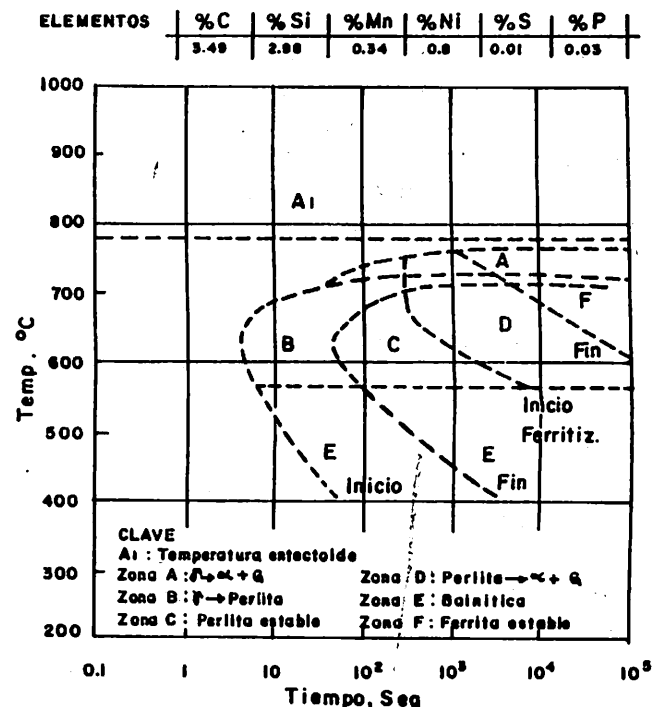


Figura 1 Diagrama isotérmico para fundición nodular no aleada²

Los procesos que involucran austenización requieren de un precalentamiento lento a 500°C (sin exceder 100°C/h) de las piezas cuando éstas tienen secciones gruesas y delgadas para aliviar los gradientes térmicos. De igual forma, una vez la temperatura de austenización sea alcanzada, se requiere sostener las piezas por un tiempo mínimo de 2 horas más 1 hora por pulgada de espesor¹ para lograr la homogeneización de la austenita y la disociación de los carburos primarios si estuviesen presentes.

En los dos primeros ciclos, la velocidad de enfriamiento posterior a la austenización debe hacerse a 50°C por hora hasta llegar a temperaturas por debajo de la temperatura crítica o eutéctico, la cual esté dada por:⁴

$$TA_1 = 730 + 28\%Si - 25 (\%Mn - 1.8\%S) \quad (2)$$

El tratamiento de ferritización en la fundición nodular tiene varios propósitos, a saber:

- Obtener una microestructura blanda y fácil de maquinar.
- Obtener una microestructura estable, sin cambios dimensionales producto de transformaciones, hasta temperaturas por debajo de la temperatura eutéctico, indicada por la expresión 2.
- Estudiar la estabilidad de perlita, pues algunas piezas que requieren mayor resistencia pueden perder ésta cuando ocasional o periódicamente se ven expuestas a temperaturas de 550°C a 750°C, produciéndose esferoidización y a veces hasta disolución de la cementita. Para aumentar esta estabilidad se pueden usar elementos perlitizantes como Mn, Mo, Sn que pueden formar carburos primarios o elementos como Cu y Ni que no los forman.

Algunos autores han abordado el estudio de la ferritización de la fundición nodular cuando algunos elementos están presentes. Glover⁵ presenta alguna información sobre el efecto de Cobre hasta 0.31%, del Sn hasta 0.031%, del V en cantidades de 0.01% y 0.03, Ni de 0.068% y 0.43%, Mn de 0.44 y 0.59%. Como puede verse no hace un barrido amplio de cada uno de los diferentes elementos y por tanto, las conclusiones en la mayoría de los casos, sólo indican tendencias. Chakraborty⁶ estudió el efecto combinado de Cu y Ni, no permitiendo extraer conclusiones acerca del efecto del Cobre, ya que parece ser que estos dos elementos tienen efectos sinérgicos⁷. Ikhef⁸ y otros, presentan el diagrama isotérmico para una fundición nodular con 0.6% Cu, indicando el inicio de la ferritización pero no reportan nada sobre el efecto de diversos contenidos de cobre en la cinética de la transformación.

Miller and Company en su publicación The Ductile Iron Process⁹ presentan información acerca del efecto del Cobre entre 0 y 0.7% en las propiedades mecánicas de fundición nodular ferritizada.

El presente trabajo pretende estudiar el efecto de adiciones de Cobre, entre 0 y 1.3%, a la fundición nodular cuando ésta es sometida a procesos de ferritización. Se estudiará el efecto de estas adiciones en la cinética de la transformación $Fe_3C \rightarrow \alpha + \text{grafito}$ y también, se evaluarán las propiedades mecánicas finales en relación con las microestructuras obtenidas.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERISTICAS DE MATERIAL

Fueron utilizadas 5 coladas de fundición nodular obtenidas en horno eléctrico de inducción y fueron vaciados bloques en Y de acuerdo a la norma ASTM-A-395. En la Tabla 1, se dan las composiciones químicas, obtenidas mediante espectrometría, usando un equipo Spectrovac 1000

Tabla 1. Composición química de las fundiciones estudiadas.

Colada	%C	%Si	%Ni	%Cu	%Mn	%S	%P	%Cr	%Mg
A	3.52	2.83	0.02	0.08	0.31	0.01	0.01	0.01	0.039
B	3.52	2.83	0.02	0.28	0.31	0.01	0.01	0.01	0.039
C	3.55	2.69	0.01	0.50	0.33	0.01	0.01	0.01	0.041
D	3.56	2.71	0.01	1.02	0.27	0.01	0.01	0.01	0.043
E	3.70	2.95	0.01	1.31	0.31	0.01	0.01	0.01	0.043

De los bloques en Y se extrajeron numerosas muestras de 20x20x10 mm de cada una de las coladas para realizar los diferentes tratamientos de ferritización. También se fabricaron probetas de tracción de acuerdo a la norma ASTM-A-370.

2.2 TRATAMIENTOS TERMICOS

Sobre diferentes muestras de cada colada, se realizó el ciclo de doble etapa, el cual comprendió:

- **Austenización** Se realizó a 900°C durante una hora en una atmósfera protectora compuesta de una mezcla de virutas de fundición y carbón vegetal para evitar decarburaciones.

- **Temple isotérmico.** Este se realizó, posterior a la austenización, en un baño de sales Duferrit GS-540 a temperatura de 700°C durante diferentes tiempos y enfriamiento final al aire.

Tanto en la austenización como en el temple isotérmico se utilizaron muflas eléctricas marca Solo con capacidad de hasta 1200°C y una precisión de más o menos 5°C.

Una vez determinados los tiempos para obtener una matriz completamente ferrítica, se realizó el ciclo térmico adecuado sobre probetas de tracción de cada una de las cinco coladas.

2.3 MEDICION DE DUREZA Y METALOGRAFIA

Todas las muestras fueron pulidas con papel abrasivo y luego se llevaron a paños con alúmina de 15µm y con diamante de 7 µm y 1µm. A todas las muestras se les tomó dureza Brinell/187,5k/2,5mm en un durómetro Wolpert Universal.

Para el ataque químico se usaron los siguientes reactivos: Nital en concentraciones de 2% y 5%, Picral al 4%.

La observación metalográfica se realizó mediante microscopía óptica en un microscopio Olympus PME con capacidad hasta de 2.000 aumentos.

2.4 MEDICION DE RESISTENCIA A LA TRACCION

Por cada colada se prepararon dos probetas de tracción de acuerdo a la norma ASTM A370., las cuales fueron ensayadas después de ser ferritizadas a 700°C durante diferentes tiempos, garantizándose matriz ferrítica en cada una de ellas. Los ensayos se realizaron en una prensa Universal, marca Amsler con capacidad de 30 ton.

3. RESULTADOS

3.1 DUREZA

En la figura 2, se ilustra la variación de la dureza con respecto el tiempo de ferritización a 700°C durante diferentes tiempos para las diversas fundiciones nodulares con contenidos de cobre, entre 0 y 1,13%.

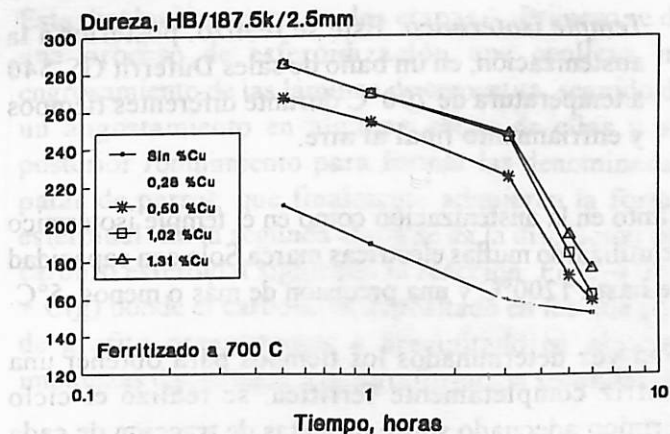


Figura 2. Variación de la dureza con respecto al tiempo de ferritizado a una temperatura de 700°C.

3.2 MICROESTRUCTURA

En las figuras 3 a 7 se presentan las microestructuras de probetas de las diferentes composiciones, ferritizadas a 700°C y durante los tiempos requeridos para obtener matriz ferrítica.

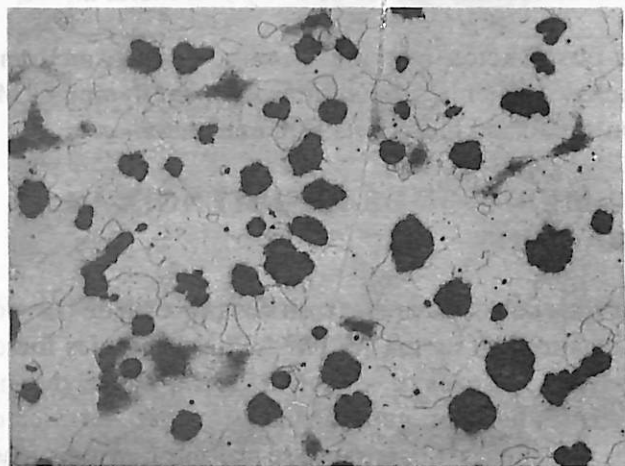


Figura 3. Colada A (%Cu = 0). Ferritizada a 700°C durante tres horas HB = 160 kg/mm². 100x

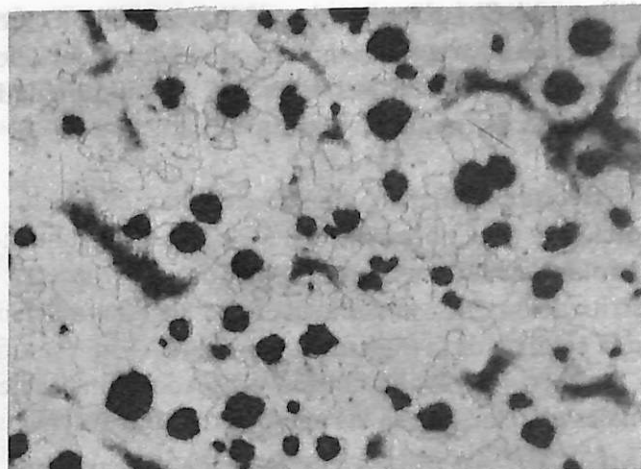


Figura 4. Colada B (%Cu = 0.28). Ferritizada a 700°C durante tres horas. HB = 159 kg/mm². 100x

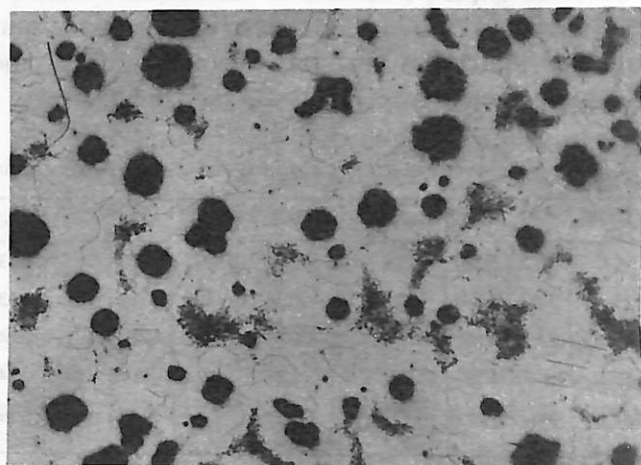


Figura 5. Colada C (%Cu = 0.50). Ferritizada a 700°C durante seis horas. HB = 160 kg/mm². 100x

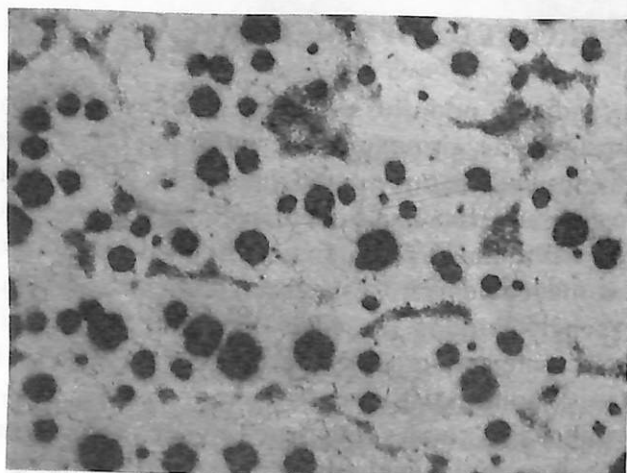


Figura 6. Colada D (%Cu = 1.02). Ferritizada a 700°C durante seis horas. HB = 163 kg/mm². 100x

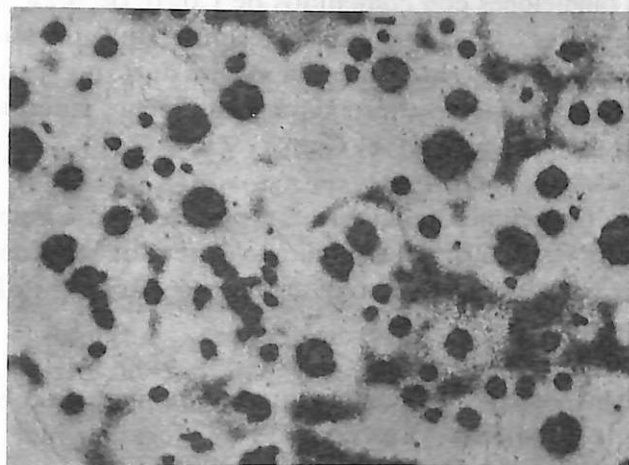
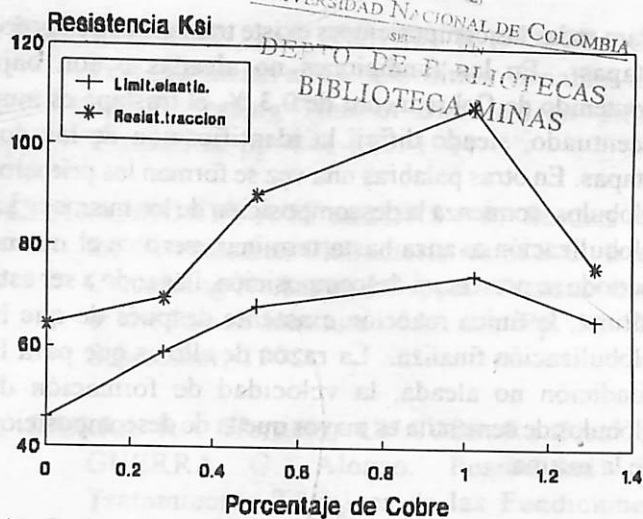
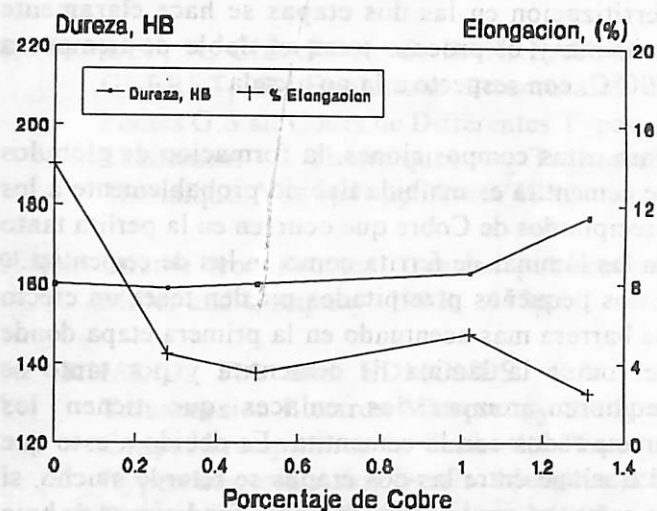


Figura 7 Colada D (%Cu = 1.31). Ferritizada a 700°C durante seis horas. HB = 177 kg/mm². 100x



a)



b)

Figura 8. Propiedades mecánicas a) Resistencia a la Tracción y Límite Elástico b) Dureza y Elongación.

3.3. PROPIEDADES MECANICAS

En la figura 8a y 8b se presentan los resultados de resistencia a la tracción, límite elástico, porcentaje de elongación y dureza para las fundiciones nodulares de la tabla # 1, ferritizadas a 700°C durante diferentes tiempos.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. DUREZA Y MICROESTRUCTURA

Las variaciones de dureza de la figura 2 tienen explicación en los cambios microestructurales que se presentan durante el proceso de ferritización, así :

En las fundiciones nodulares con contenidos de Cu inferiores a 0.28%, la ferritización ocurre rápidamente a 700°C y es muy difícil identificar las dos etapas descritas en el numeral 1. En la fundición nodular no aleada para tiempos cortos de ferritización, (0.5 hr), la microestructura está compuesta por 30% de ferrita y 70% de perlita, la cual está casi totalmente globulizada. Incrementos de 0.28% de Cobre retardan en algo el proceso de globulización pero su efecto no es duradero. Para estas composiciones en tres horas de sostenimiento isotérmico a 700°C, se obtiene matriz ferrítica.

Para todas las composiciones existe traslape entre las dos etapas. En las fundiciones no aleadas o con bajo contenido de Cobre menor de 0.3 %, el traslape es muy acentuado, siendo difícil la identificación de las dos etapas. En otras palabras una vez se forman los primeros glóbulos, comienza la descomposición de los mismos. La globulización avanza hasta terminar, pero en el mismo periodo se presentará descomposición, llegando a ser esta última, la única reacción existente después de que la globulización finaliza. La razón de ello es que para la fundición no aleada, la velocidad de formación de glóbulos de cementita es mayor que la de descomposición de la misma.

En las fundiciones nodulares con contenidos de Cobre de 0.5% y superiores, la separación del proceso de ferritización en las dos etapas se hace claramente evidente y el proceso toma el doble de tiempo, a 700°C, con respecto a la no aleada.

Para estas composiciones, la formación de glóbulos de cementita es inhibida debido probablemente a los precipitados de Cobre que ocurren en la perlita tanto en las láminas de ferrita como en las de cementita.¹⁰ Estos pequeños precipitados pueden tener un efecto de barrera más acentuado en la primera etapa donde se rompe la lámina de cementita y por tanto se requieren romper los enlaces que tienen los precipitados con la cementita. Es debido a esto que el traslape entre las dos etapas se retarde mucho, si se compara con lo ocurrido en las fundiciones de bajo contenido de Cobre (menor de 0.28 %Cu).

Para fundiciones con contenidos de Cobre superiores a 0.5%, este efecto retardante hace que la dureza varíe ligeramente hasta el momento en que finaliza la primera etapa, la globulización y a partir del comienzo de la segunda etapa, la descomposición de los carburos globulares, la dureza cae rápidamente y el tiempo requerido para obtener durezas de matriz ferrítica es equivalente al requerido en una fundición no aleada para que se de todo el proceso (3 horas).

Finalmente, durante el proceso de descomposición de la cementita globular, el efecto de los precipitados de cobre, aparentemente es nulo.

4.2 PROPIEDADES MECANICAS

La fundición nodular sin Cobre presenta el mayor porcentaje de elongación después de ferritizarse, pudiendo considerarse como una 60.45-14. Respecto a lo esperado para una fundición con matriz ferrítica, se observa una disminución al 4% de elongación. Esto, indudablemente, está asociado con la presencia de conglomerados de cementita globular en las regiones intercelulares en cantidades hasta del 5%. En estas regiones, estos carburos presentan mayor estabilidad y su descomposición en ferrita más carbono es muy lenta, debido, posiblemente, a la acción del manganeso, elemento que se segrega intercelularmente.^{11,12}

En fundiciones con contenidos de Cobre de 0.28% y superiores, la elongación presenta una drástica disminución a pesar de tener la misma dureza y matriz ferrítica. Es factible que exista algún efecto sinérgico entre el Manganeso y el Cobre.

Para fundiciones nodulares con contenidos de Cobre superiores a 0.28%, el tratamiento de ferritización debe descartarse cuando el requerimiento básico es alta elongación.

Adicionalmente, al incrementar el porcentaje de cobre en la fundición y ejecutando el ferritizado, la resistencia a la tracción y el límite elástico se incrementan en un 68% y 62% respectivamente, hasta contenidos de 1.0%Cu. Para contenidos de cobre superiores a 1.0%, la resistencia a la tracción y el límite elástico sufren un fuerte decrecimiento, debido, posiblemente, a una mayor cantidad de carburos globulares, ubicados en las regiones intercelulares. ;

La disminución de la resistencia a la tracción y del límite elástico a partir de 1% de cobre, concuerda con el estudio realizado por L.A. Neumieier t B.A. Betts)¹³, quienes utilizaron fundiciones nodulares aleadas al cobre, pero conteniendo 0.07% de estaño.

5. CONCLUSIONES

- En fundición nodular no aleada, no existe una separación clara para las dos etapas en que se da la ferritización. Ambas ocurren con simultaneidad pues de un lado se da la globulización de la cementita y por el otro, su descomposición. En fundiciones nodulares con contenidos superiores a 0.3% de cobre, la separación de las dos etapas y su identificación es muy clara.
- El efecto del cobre ($> 0.3\%$) en la ferritización se encontró ser el siguiente: retarda la etapa de globulización de la cementita y prácticamente no tiene ningún efecto en la etapa de descomposición de la misma.
- En las fundiciones nodulares aleadas con cobre en contenidos hasta el 1% y ferritizados presentan un incremento sustancial de la resistencia a la tracción y del límite elástico, obteniéndose valores máximos en 1% Cu., mientras que la elongación se mantiene en valores del 4 a 5% para contenidos de cobre entre 0.3 y 1%. Adiciones mayores de cobre conducen a un fuerte decrecimiento de todas las propiedades de tensión.
- Los bajos valores de elongación obtenidos en las diferentes composiciones de fundiciones ferritizadas obedecen a la existencia de conglomerados de cementita residual, ubicados en el límite de celda.

6. REFERENCIAS

1. IRON CASTING SOCIETY Inc. Iron Casting Handbook. Edited by Charles F Walton. 1982. 831p.
2. SIERRA R., Horacio. Estudio sobre la ferritización de la matriz de una fundición nodular. Universidad Nacional de Colombia. Proyecto de Grado. Medellín, 1978. 102 p.
3. THELNING Karl-Erik. Steel and its Heat Treatment. Bafors Handbook. London 1981. 570p.
4. DESY. Albert et VIDTS, Julián. Metalurgie Estructurale. Teórica y aplicada. Dunod, Paris, 1962. 158p.
5. GLOVER W. D. and WRIGHT R.L. Effect of Trace Elements and Composition Variables on the Annealing Time of Ductile Iron. AFS Transation. pp. 841-860. 1984.
6. CHAKRABORTY A.K. and DAS P.P. Studies on the Ferritisation Characteristics of S.G. Iron Containing Nickel and Copper. Transactions of the Indian Institute of Metals. Pp. 36-41. September, 1972.
7. SIERRA R. Horacio, CHAVES R. César y GUERRA G. Alonso. Posibilidad de Tratamientos Térmicos de las Fundiciones Nodulares Producidas en el Valle de Aburrá. Universidad Nacional Medellín. 1980. 130p.
8. IKHLEF, A, CIZARON, G, BARREAU, G et GUERET, G. Evolutions Structurales de Fontes G.S au Cours de Differentes Types de Traitement Thermiques. Traitement Thermique. Vol 164. pp.31-45. 1982.
9. The Ductile Iron Process. Internal publication. Miller and Company 1982. 418p.
10. KHALID. F.A. and EDMONDS. D.V. A Transmission Electron Microscopy Study of Copper Precipitation in Cementite Phase of Hypereutectoid Alloy Steels. Metallurgical Transactions. Pp 781 - 793. April 1993.
11. GANGE M. Effect of Mn and Si on the Quality of Heavy Section ADI Castings. AFS Transactions. Pp 523-532. 1987.
12. MOORE. D.J., ROUNS T.N and RUNDMAN K.B. Structure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron. AFS Transactions. Pp 705-715. 1985.
13. NEUMIEIR L.A and BETTS B.A. Ductile Iron Containing Tin, Copper and other Contaminants. AFS Transactions p.p 265 - 280. 1976.