

Efecto del cobre en las propiedades mecánicas de la fundición nodular al estado de colada y normalizado

Por: Horacio Sierra Restrepo*

ANTECEDENTES

El efecto del cobre en las fundiciones grises ha sido ampliamente estudiado por autores como C.H. Loring y R.R. Adams (1), pero su efecto en las fundiciones nodulares no ha sido tratado de igual forma.

H. Morrogh (5) ha estudiado el efecto del cobre al estado de colada y al estado ferritizado, pero sólo hasta 0.65% Cu. Adicionalmente toca tópicos como la disminución de la resistencia al impacto y el incremento de la sensibilidad al efecto de elementos nocivos, efectos ocasionados por adición de cobre. Autores como W.E. Gruver y G. Dinges (9) quienes han estudiado el efecto de elementos como P, Ni, Mn, Nb, Mo y W, en la fragilidad de la fundición nodular durante la ferritización, omiten el estudio del efecto del cobre.

Otros autores L.A. Neumeier y B.A. Betts (7) han estudiado el efecto del cobre sobre las propiedades mecánicas de la fundición nodular, pero combinado con el efecto de otros elementos como el estaño y el cromo.

Aunque el presente artículo sólo trata dos tópicos: efecto al estado de colada y al estado normalizado, en el estudio que se realiza se tocarán otros como: ferritización, temple + revenido, fragilidad de revenido, etc.

RESUMEN

El cobre en la fundición nodular es un elemento fertilizante y no forma carburos (2,8) lo que posibilita de un lado la obtención de fundición nodular tipo 80-60-03 y del otro no desmejora la maquinabilidad. Adicionalmente uniformiza la dureza a lo largo de toda la sección, lo que permite la obtención de fundición nodular con propiedades mecánicas homogéneas.

En el presente estudio fue evaluado el efecto del cobre como aleante en la fundición nodular, tanto al estado de colada como al estado normalizado.

Su efecto fue evaluado mediante el análisis de las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tracción (Norma ASTM, A-370), (1) mediante la medición de durezas y del estudio de la microestructura, utilizando el microscopio óptico.

* Profesor Asistente
Depto. Tecnología Mecánica
Facultad de Minas - Medellín
Universidad Nacional de Colombia

Los porcentajes de cobre con que se aleó la fundición nodular variaron entre 0.0 y 1.3 y se utilizaron probetas extraídas de bloques en Y. (Norma ASTM, A-536). (1).

INTRODUCCION

La fundición nodular es un material cuya aplicación a nivel de Ingeniería se extiende continuamente, debido a sus excelentes propiedades y a su relativo bajo costo de producción, comparado con el acero.

En nuestro medio se fabrica básicamente fundición nodular no aleada y excepcionalmente se produce algún tipo de fundición nodular aleada.

El conocimiento de los efectos de diversos elementos como aleantes de la fundición nodular permitirá ampliar el uso de las mismas en nuestro país.

Para alea la fundición nodular existen numerosos elementos, siendo en su mayoría importados, lo que implica un incremento en el costo de producción de la fundición nodular. Debido a ello se seleccionó el cobre como aleante que a pesar de ser importado es relativamente barato y posteriormente se estudiará el níquel que ya se está produciendo en Cerromatoso (Córdoba).

El presente estudio, por tanto, servirá de guía para los productores de fundición nodular, quienes podrán seleccionar los porcentajes de cobre requeridos para obtener fundición nodular perlítica sin excederse en la aleación, lo que implicaría mayor costo y algunas dificultades de tipo técnico. (2,8).

MATERIAL

Para el presente estudio se utilizaron cinco composiciones de fundición nodular, tal como aparece en la Tabla No. 1.

TABLA No. 1

COMPOSICION QUIMICA DE LAS FUNDICIONES NODULARES UTILIZADAS

Colada No.	% C	% Si	% Ni	% Cu	% Mn	% S	% Cr	% Mg
1	3.52	2.83	0.02	0.08	0.31	0.01	0.01	0.039
2	3.52	2.83	0.02	0.28	0.31	0.01	0.01	0.039
3	3.55	2.69	0.01	0.50	0.33	0.01	0.01	0.041
4	3.56	2.71	0.01	1.02	0.27	0.01	0.01	0.043
5	3.70	2.95	0.01	1.31	0.31	0.01	0.01	0.043

PROCEDIMIENTO

- Obtención. Para la obtención del hierro base se utilizó un horno eléctrico de inducción, utilizándose temperaturas de fusión entre 1510°C y 1540°C , las cuales se controlaron con pirómetro óptico.

La composición del metal base se controló por medio de copas eutéctométricas. El tratamiento de nodulización se realizó en una cuchara precalentada a 1150°C y se utilizó el método Pour Over Process (8).

La aleación con cobre se realizó en la cuchara de tratamiento de nodulización, simultáneamente con la inoculación de ferrosilicio requerida para la producción normal, (8) El aleante y el inoculante ($\text{Fe} - \text{Si } 75^{\circ}/\text{o}$) se adicionaron cuando los 2/3 de la cuchara habían sido vaciados con metal fundido, adicionándose el 1/3 restante posteriormente (2). Una vez la cuchara estuvo llena, se agitó el baño con una varilla para homogenizar la aleación con cobre. Posteriormente se vaciaron 2 bloques en Y por cada colada y una probeta chiliada para determinar composición química, mediante espectometría.

De los bloques en Y se extrajeron probetas de tracción y probetas metalográficas. Se realizó metalografía y dureza sobre el material al estado de colada y posteriormente se determinaron sus propiedades mecánicas mediante el ensayo de tracción (Norma ASTM-A-370). Posteriormente se realizaron diversos ciclos de tiempo-temperatura, con el propósito de estudiar la respuesta del material al normalizado. La temperatura de normalizado se seleccionó mediante la conjugación de los diagramas estables y metaestables (4). Las muestras se calentaron a 870°C con tiempos variables entre 15 minutos y una hora, con el propósito de establecer el tiempo mínimo requerido para austenizar $100^{\circ}/\text{o}$ el material.

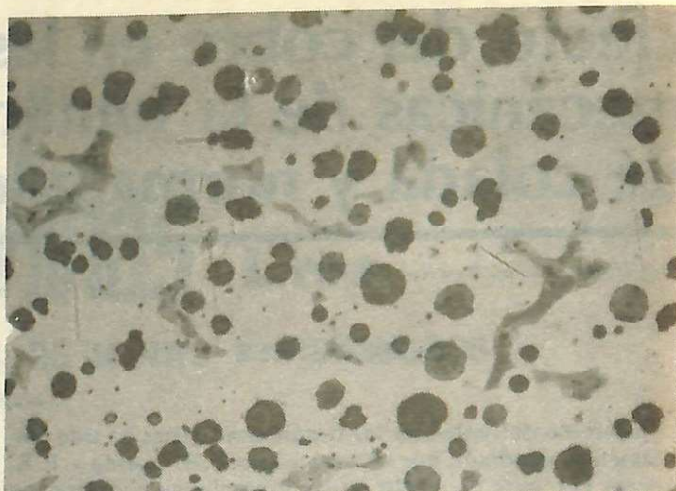
Este tiempo se determinó mediante el control de durezas y microestructuras. Una vez determinado el tiempo requerido para garantizar $100^{\circ}/\text{o}$ de transformación se trataron térmicamente probetas de tracción de las diferentes composiciones. Estas probetas fueron ensayadas para determinar sus propiedades mecánicas.

RESULTADOS

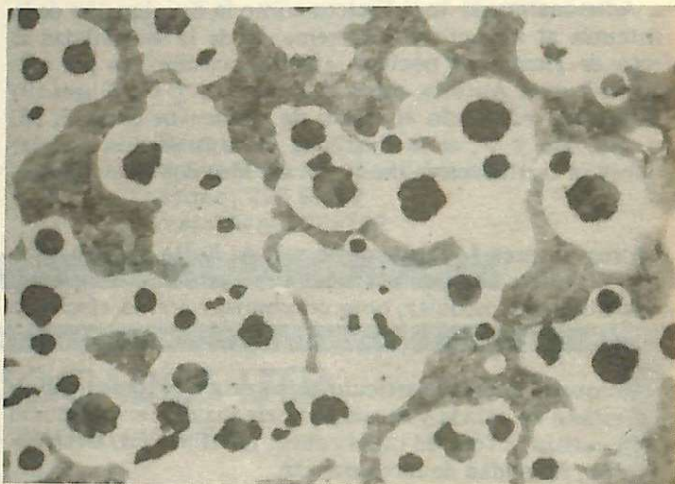
ESTADO DE ENTREGA

— Estructura. Al observar microscópicamente la estructura de las fundiciones nodulares aleadas con cobre se observó que a medida que se incrementa el porcentaje de cobre de $0^{\circ}/\text{o}$ a $0.5^{\circ}/\text{o}$ se va desde una estructura de $90^{\circ}/\text{o}$ de ferrita y $10^{\circ}/\text{o}$ de perlita hasta una estructura de $85^{\circ}/\text{o}$ de perlita y $15^{\circ}/\text{o}$ de ferrita. Para adiciones superiores a 0.5 no hay un incremento considerable de la cantidad de perlita en la estructura de la matriz (fig. 1). Esto lo corroboró la medición de dureza que varió de 163 HB para $0^{\circ}/\text{oCu}$ hasta 255 HB para $0.5^{\circ}/\text{oCu}$. A partir de $0.5^{\circ}/\text{o Cu}$ y hasta $1.31^{\circ}/\text{o Cu}$ no hubo variación en los valores de dureza, los cuales permanecieron del orden de 258 HB, valores que según los standards están de acuerdo con las estructuras observadas (6). Los valores de dureza se dan en la figura No. 2.

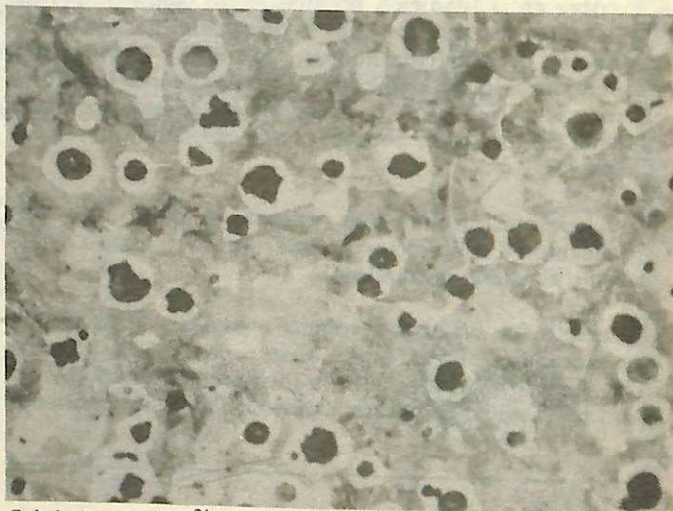
— Propiedades mecánicas. La resistencia a la tracción se incrementa de 68070 PSI, para $0^{\circ}/\text{oCu}$ a 104782 PSI, para



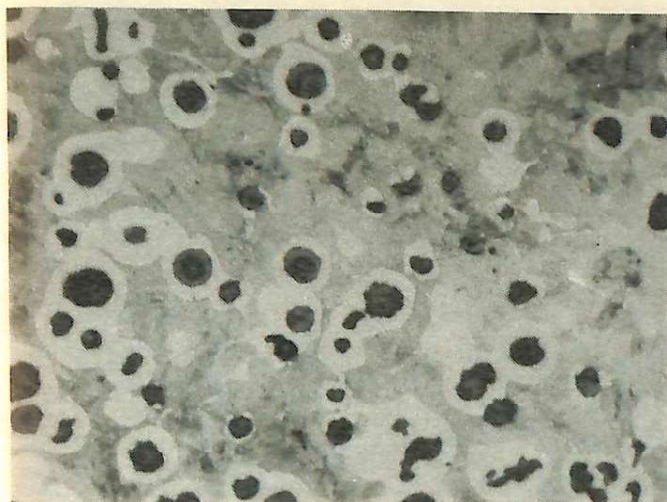
Colada No. 1 (0.08% Cu)
Estado de Colada
Matriz: Ferrita 90%, Perlita 10%
Grafito: Tipo I, tamaño entre 5 y 6.
100 X



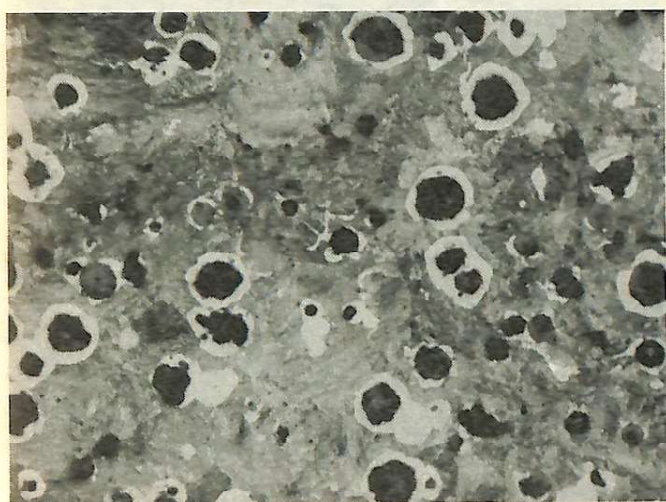
Colada No. 2 (0.28% Cu)
Estado de Colada
Matriz: Ferrita 75%, Perlita 25%,
Grafito: Tipo I, tamaño 6
100X



Colada No. 3 (0.50% Cu)
Estado de Colada
Matriz: Perlita 85%, Ferrita 15%
Grafito: Tipo I, tamaño entre 5 y 6.
100X



Colada No. 4 (1.02%Cu)
Estado de Colada
Matriz: Perlita 85%, Ferrita 15%
Grafito: Tipo I, tamaño entre 5 y 6
100X



Colada No. 5 (1.31%Cu)
Estado de Colada
Matriz: Perlita 87%, Ferrita 13%
Grafito: Tipo I, tamaño 6
Presentó grafito vermicular entre 5 y 8%
100X

Fig. 1 Estructuras al Estado de Colada

0.5%Cu, lo que implica un incremento neto del 54%, mientras que entre 0.5 y 1.31%Cu, sólo presenta un incremento del 7%.

El límite elástico se incrementa entre 0 y 0.5% Cu en un 34.3% y entre 0.5 y 1.02 (donde se estabiliza), se incrementa en 21.5%.

Pero al contrario de lo que ocurre con la resistencia a la tracción y el límite elástico, la elongación disminuye de 21% para 0% Cu a 6% para 0.5% Cu, permaneciendo constante hasta 1.31% Cu.

Los valores de resistencia a la tracción, límite elástico, elongación y dureza se presentan en la Tabla No. 2 y se grafican en la figura No. 2.

DYNA No. 103 MAYO/84 MEDELLIN

TABLA No. 2.

PROPIEDADES MECANICAS AL ESTADO DE COLADA

Colada	Dureza HB	Límite Elástico P.S.I.	Resistencia a la tracción P.S.I.	Elongación %
1	163	46.201	68.070	21
2	175	49.689	74.224	17
3	255	62.058	104.782	6.0
4	258	75.430	112.050	5.0
5	255	76.000	112.000	5.0

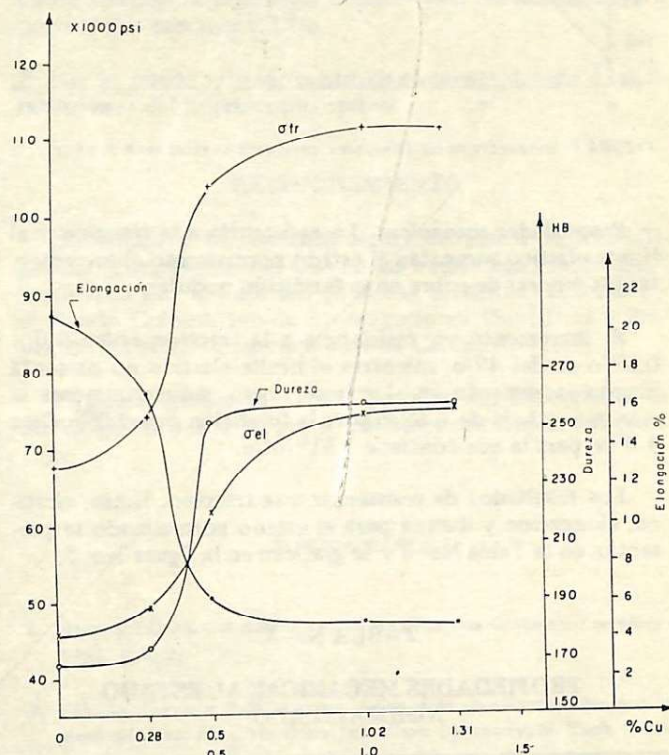


FIGURA 2 Propiedades mecánicas al estado de colada.

NORMALIZADO

Estructura. Después de realizar ciclos de temperatura constante (870°C) y tiempos variables entre 15 minutos y una hora, se encontró que para todas las composiciones a los 45 minutos de sostenimiento se obtiene una estructura perlítica 95% y 5% de ferrita. Por esta razón, las probetas de tracción fueron tratadas a 870°C durante una hora. La respuesta de las diferentes composiciones al normalizado, se ilustra en la figura No. 3, donde se grafica dureza Vrs. tiempo de sostenimiento a 870°C y las estructuras obtenidas después de una hora de sostenimiento a dicha temperatura, se dan en la figura No. 4. Para la fundición con 0% Cu, la dureza después de normalizarse una hora a 870°C es de 282 HB, aumentando a medida que se incrementa el porcentaje de cobre hasta 0.5%. A partir de 0.5%Cu, la dureza permanece estable en un valor de 308 HB. Esta situación se ilustra en la figura No. 5.

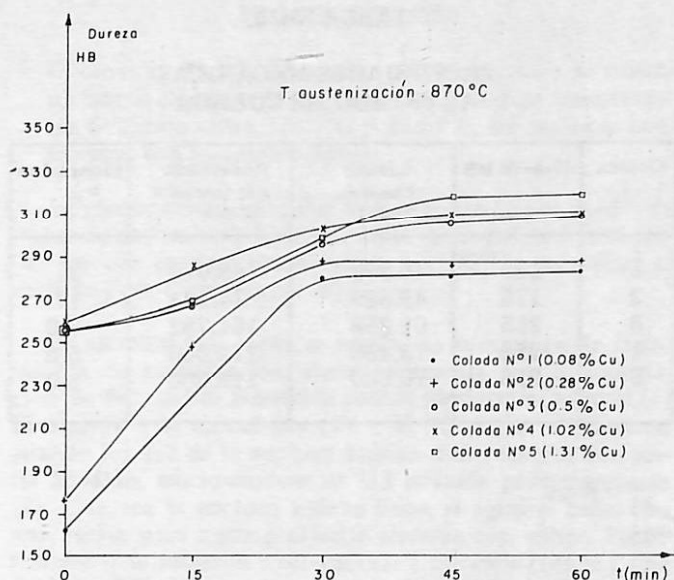


FIGURA 3 Respuesta de las diferentes composiciones al normalizado

— Propiedades mecánicas. La resistencia a la tracción y el límite elástico aumentan al estado normalizado al incrementar los tenores de cobre en la fundición nodular.

El incremento en resistencia a la tracción entre 0.0 y 0.5% es del 4%, mientras el límite elástico no presenta ningún incremento en el mismo rango. Adicionalmente la elongación baja de 6.5% para la fundición con 0.0% Cu a 4.0% para la que contiene 1.31% Cu.

Los resultados de resistencia a la tracción, límite elástico, elongación y dureza para el estado normalizado se presentan en la Tabla No. 3 y se grafican en la figura No. 5.

TABLA No. 3.

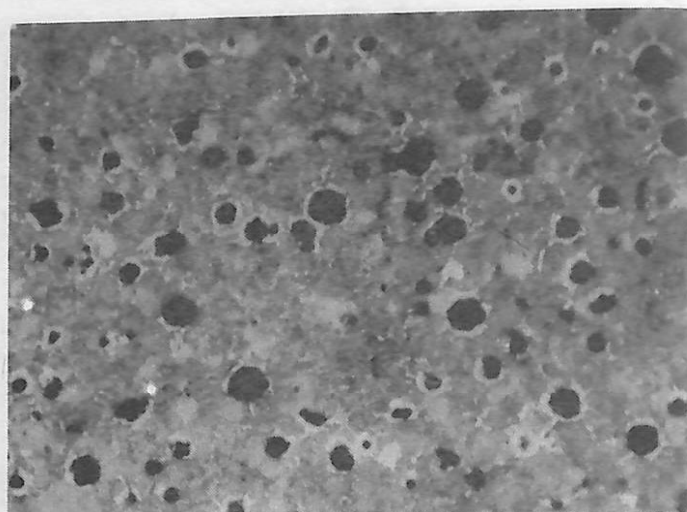
PROPIEDADES MECANICAS AL ESTADO NORMALIZADO*

Colada	Dureza HB	Límite Elástico P.S.I.	Resistencia a la Tracción P.S.I.	Elongación %
1	282	92.168	139.726	6.5
2	286	92.332	140.517	5.5
3	308	92.542	145.528	6.5
4	308	98.676	146.640	5.5
5	318	98.563	142.608	4.0

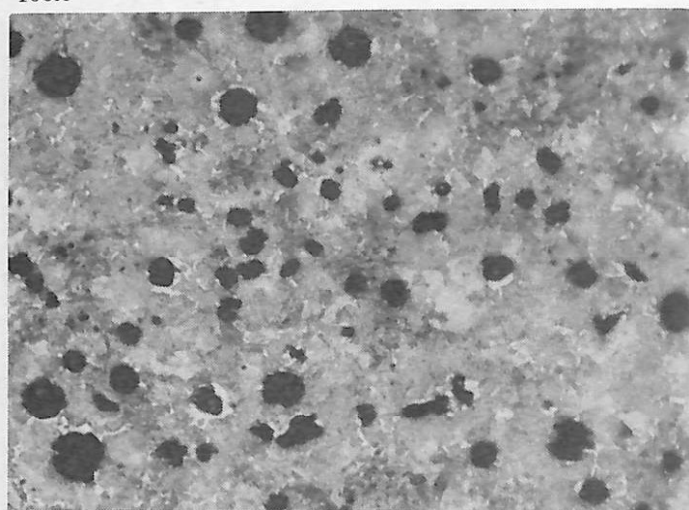
*Austenización de una hora a 870°C, enfriamiento en aire.

CONCLUSIONES

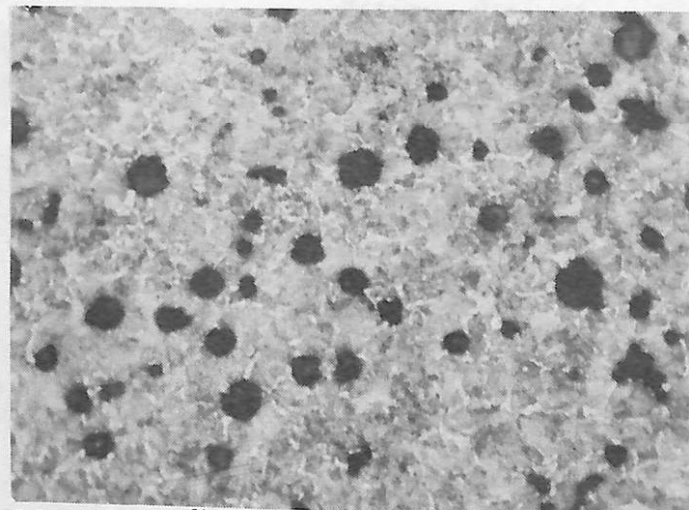
Las adiciones de cobre a la fundición nodular favorecen la formación de la perlita, ubicando la ferrita en el denominado Ojo de Buey (Fig. 1), esto probablemente debido a que el cobre inhibe el crecimiento de la ferrita en la región bifásica $\alpha + \delta$ del diagrama metaestable (7).



Colada No. 1 (0.08% Cu)
Normalizada a 870°C, 1 hora
Matriz: Perlita fina 95%
Ferrita 5%, ubicada alrededor de los nódulos.
100X



Colada No. 2 (0.28% Cu)
Normalizada a 870°C, 1 hora
Matriz: Perlita fina 95%
Ferrita 5% ubicada alrededor de los nódulos
100X



Colada No. 3 (0.5% Cu)
Normalizada a 870°C, 1 hora
Matriz: Perlita fina 95%
Ferrita 5%, ubicada alrededor de los nódulos
100X

Fig. 4 Estructuras al Estado Normalizado

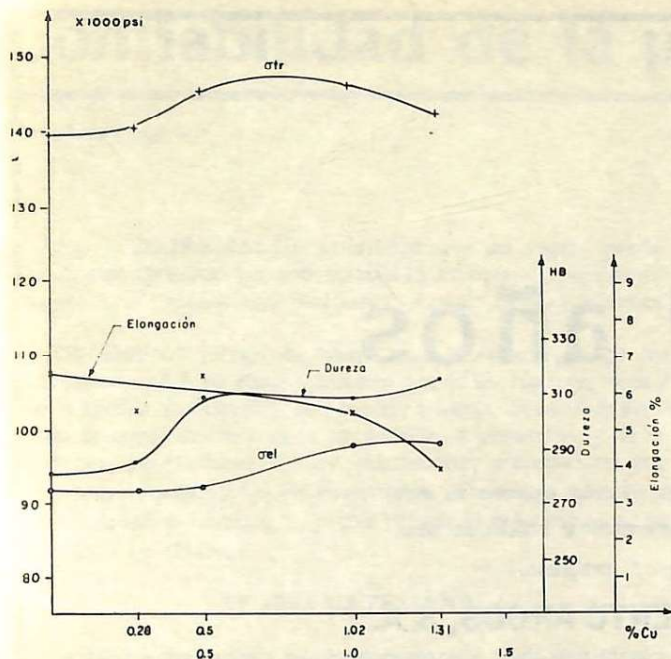


FIGURA 5 Propiedades mecánicas al estado normalizado

— Respecto al efecto del cobre en el gráfita, cuando el cobre no es puro, los elementos nocivos como el plomo juegan un papel importante en la forma del gráfita produciendo malformaciones. Este efecto es muy marcado para tenores de cobre mayores a 0.5^o/o. En estos casos se debe utilizar cobre electrolítico, 99.9^o/o de pureza. En caso de que no se disponga de dicho cobre y se quiera anular el efecto de los elementos nocivos, se deben utilizar ligas nodulizantes que contengan cerio (8).

— La afirmación de H. Morrogh, de que el cobre incrementa la resistencia a la tracción en 1000 PSI por cada 0.10^o/o Cu adicionado (8), es válida hasta 0.5^o/o Cu al estado de colada. Adiciones superiores a 0.5^o/o Cu, no repercuten en incrementos considerables de la resistencia a la tracción. No obstante cuando se requiere mayor límite elástico, la fundición debe alearse con porcentajes cercanos a 1^o/o. Este incremento en el porcentaje de cobre no deteriora la elongación, la cual a partir de 0.5^o/oCu permanece constante. (fig. 3).

— En cuanto al normalizado se puede ver que a partir de los 45 minutos de sostenimiento a 870^oC, se obtiene una estructura 95^o/o perlita en concordancia con las durezas obtenidas. (figs. 3 y 4). Por tanto con un normalizado a 870^oC durante una hora se garantiza la austenización completa y la homogenización de la austenita, que producirá una estructura perlítica mediante el enfriamiento al aire.

— En el estado normalizado la dureza se incrementa debido al afinamiento del grano austenítico y al refinamiento de la perlita. Las fundiciones que contienen cobre en exceso de 0.5^o/o presentan mayor dureza, probablemente debido al mayor refinamiento de la perlita*.

— Los incrementos de resistencia a la tracción y límite elástico obtenidos en la fundición nodular aleada con cobre al estado normalizado respecto a la no aleada no son significativos (fig. 5). Por tanto, para piezas de sección ligera, la aleación con cobre se justifica si dichas piezas van a ser utilizadas al estado de colada. Si van a ser normalizadas, no se justifica la aleación con cobre. Para piezas de sección gruesa que requieran propiedades mecánicas correspondientes a fundición nodular perlítica y vayan a ser utilizadas en el estado de colada o en el normalizado, si se requiere la aleación con cobre, ya que este uniformiza la estructura en toda la sección (2).

— Para porcentajes superiores a 1^o/oCu, la resistencia a la tracción disminuye posiblemente debido a la segregación de cobre al límite de grano*. Esto restringe la aleación de cobre cuando la fundición nodular va a ser normalizada a porcentajes cercanos a 1^o/o.

* No se puede afirmar contundentemente debido a las limitaciones del microscopio óptico.

RECONOCIMIENTO

El estudio se ha realizado dentro del marco de la investigación "Ampliación del Uso de las Fundiciones Nodulares" auspiciada por la Facultad de Minas, Medellín - Colombia y el Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales Francisco José de Caldas.

El autor agradece a todo el personal del Laboratorio de Metalografía y a la empresa Simesa por su amplia colaboración.

BIBLIOGRAFIA

1. Annual BOOK OF ASTM - standards (Ferrous Casting), Ferrolloys 1981. Pat. 2.
2. CH. Loring and R.R. Adams. Copper as an alloying element in steel and cast Iron. Mc Graw Hill Book Company. N. York 1948.
3. CR. Isleib and R.E. Savage. Ductile Iron Alloyed and Normalized AFS. Transactions Vol 65 — 1957.
4. Desy Albert et Vidts Julian. Metalurgie Estructurale. Teoría y aplicada. Editorial Dunod. Primera Edición: París 1962.
5. H. Morrogh. Influence of some residual elements and their neutralization in magnesium — Treated nodular cast Iron, AFS, transactions 1952.
6. Iron Casting Society, Inc, Iron casting Handbook. Edited by Charles F. Walton 1981.
7. L.A. Neumier, B.A. Betts. Ductile Iron containing tin, copper and other contaminants. AFS. Transactions 1976.
8. Miller Corporation. Ductile Iron. Internal Publication. 1981.