

Recibido 09/12/2011, aprobado ....

## **INFLUENCIA DEL COBRE EN LA TRANSFORMACIÓN GAMMA-ALFA EN LA FUNDICIÓN GRIS Y NODULAR – TEMPLABILIDAD**

### **INFLUENCE OF COPPER IN THE GAMMA-ALPHA TRANSFORMATION IN THE GRAY AND NODULAR MELTING - HARDENABILITY**

**Samuel Rosario F.<sup>1</sup>, Héctor Villacorta A.<sup>1</sup>, Víctor Falconi R.<sup>1</sup>, Walter Rengifo S.<sup>1</sup>, Miguel J. Martínez C.<sup>2</sup>**

#### **RESUMEN**

Este trabajo se refiere a la Fundición de Hierro Gris grafito laminar y Fundición de Hierro Nodular, ambas contienen porcentajes variables de cobre hasta un máximo de 4%, enfriadas en moldes de arena en la que la “solubilidad aparente” del cobre es limitada, para obtener piezas fundidas resistentes al desgaste, mejorando la templabilidad del hierro fundido gris y del hierro fundido nodular por el efecto de estabilizar la austenita.

**Palabras claves:** Hierro Fundido Gris laminar – Hierro Fundido Nodular – Solubilidad

#### **ABSTRAC**

This research refers to the Grey Iron Lamellar Graphite Casting and Nodular Cast Iron Casting. Both contain variable percentages of copper to a maximum of 4%, cooled in sand molds in which the "apparent solubility" of copper is limited, to obtain wear-resistant castings, improving the hardenability of gray cast iron and nodular cast iron by the effect of stabilizing the austenite.

**Keywords:** Lamellar Gray Cast Iron - Nodular Cast Iron - Solubility

<sup>1</sup>Docentes de la EAP de Ing. Metalúrgica, UNMSM. Emails: [syfrosario3@hotmail.com](mailto:syfrosario3@hotmail.com), [hlym3@hotmail.com](mailto:hlym3@hotmail.com), [victorafalconi@hotmail.com](mailto:victorafalconi@hotmail.com), [walterengifo@hotmail.com](mailto:walterengifo@hotmail.com)

<sup>2</sup>Estudiante de Ingeniería Metalúrgica, UNMSM.

## I. INTRODUCCIÓN

La solubilidad de cobre en el hierro  $\gamma$  de acuerdo con el diagrama de fases Hierro-Cobre de la Figura 1 es aproximadamente 8,0% a 1094°C y disminuye al 3,0% a la temperatura eutéctica de 835°C aproximadamente,

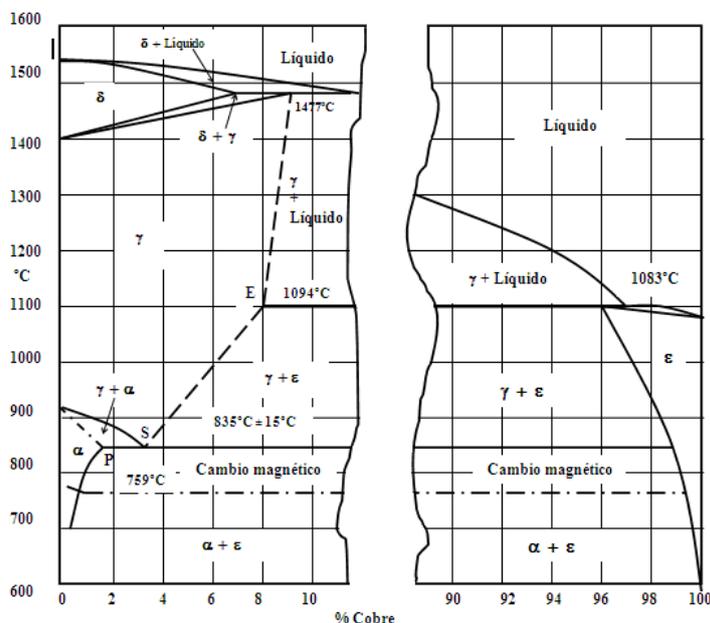


Figura 1. Diagrama de fases Hierro – Cobre (<sup>1</sup>)

No obstante, y debido a la baja velocidad de difusión del cobre, este elemento es fácil de retener en forma de solución sobresaturada en la austenita y en la ferrita.

Es de notar que en el sistema ternario, hierro – carbono – cobre, la línea binaria eutéctica de hierro – carbono aparece a una temperatura notablemente inferior, ya que dicha línea comienza a 723°C sobre la horizontal binaria eutéctica de hierro – carbono, alcanzando el punto ternario eutéctica a una temperatura ligeramente inferior.

Así, pues, durante el enfriamiento, la disolución sólida de carbono y cobre en hierro  $\gamma$ , se transforma en perlita, y bajo unas condiciones de equilibrio una aleación de hierro – carbono – cobre conteniendo más de 0,7% Cu tendrá tres fases:

- Hierro alfa conteniendo aproximadamente 0,7% Cu, es decir el límite de solubilidad en el hierro alfa a la temperatura bajo consideración.
- Partículas o glóbulos de fase epsilon rica en cobre.
- Cementita conteniendo pequeños vestigios de cobre disuelto o en forma ocluida.

Las partículas de la fase epsilon rica en cobre, la cual precipita de la austenita en la transformación eutéctica, o de la ferrita en un enfriamiento lentísimo, tiende a coagularse al igual que cualquier otro precipitado, formando glóbulos de cobre secundario, el cual forma glóbulos más pequeños que el cobre primario en una fundición gris o nodular conteniendo el 0,7% Cu.

En la fundición gris grafito laminar, enfriada en un molde de arena, “la solubilidad aparente” límite del cobre es 3,5%; esto significa que hasta un 3,5% de cobre no se produce la precipitación de glóbulos primarios de cobre durante la solidificación y no se forman glóbulos secundarios de cobre en las condiciones de enfriamiento normales a la temperatura ambiente.<sup>(2)</sup>

## II. EFECTOS METALURGICOS DEL COBRE EN LA FERRITA

Los efectos del cobre disuelto en la ferrita son:

- Aumento de la resistencia a la corrosión contra los agentes atmosféricos y a muchos agentes químicos, especialmente ácido sulfúrico.
- Endurecimiento de hierro alfa por efectos de la disolución del cobre en la red cristalina, aumentando la resistencia y dureza, al igual que ocurre con otros elementos. Figura 2.
- Un efecto de endurecimiento por precipitación, cuando la solución sobresaturada ( $\text{Cu} > 0,7\%$ ) de cobre en hierro alfa se calienta durante intervalos apropiados a temperaturas entre  $400^\circ$  a  $600^\circ\text{C}$ .
- Importante, adiciones de cobre por encima del límite aparente de 3,0 a 3,5% no tiene efecto adicional sobre las propiedades mecánicas de las aleaciones.

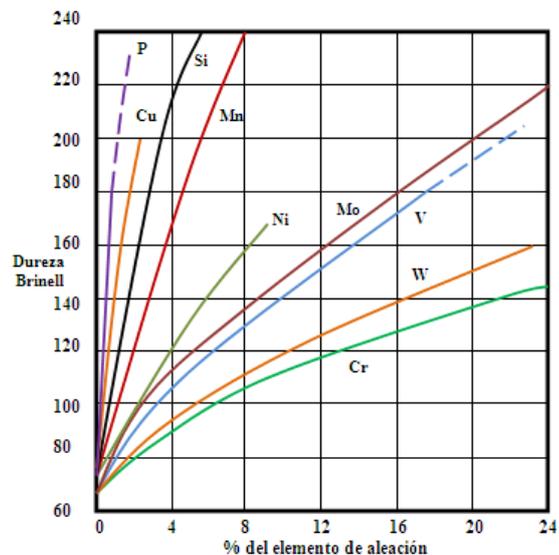


Figura 2. Efecto de endurecimiento de la solución sólida de Diferentes elementos en el hierro puro. E.C. Bain

## III. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para verificar la acción del cobre en los hierros fundidos: hierro gris laminar y hierro nodular se estableció el siguiente método experimental:

1. Establecer los rangos de composición de carbono y cobre, con silicio fijo en

- 2,0% en muestras de hierros fundidos.
2. Fundir barras de 25 mm de diámetro en horno con crisol de grafito.
  3. Análisis químico de las muestras fundidas.
  4. Tratar térmicamente: Normalizado y temple
  5. Ensayos mecánicos de las muestras fundidas.
  6. Análisis metalográfico, en bruto de colada y tratados térmicamente, preparación de muestras de acuerdo a las normas ASTM E 3 – 01 ; ASTM E 407 – 99 y observación
  7. Ensayos de dureza Brinell.
  8. Establecer composición óptima y temperaturas de tratamiento adecuadas.
- El proceso de fusión se muestra en la figura 3.



Figura 3. a) Barras en molde de arena. b) Fusión en horno de crisol, verificando la temperatura del metal. c) Preparando el vertido en moldes metálicos. d) Vertido en moldes metálicos. Laboratorio – Taller de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica. UNM. San Marcos

#### IV. MÉTODOS Y RESULTADOS

##### 4.1 INFLUENCIA DEL COBRE EN LA TRANSFORMACIÓN GAMMA – ALFA ( $\gamma - \alpha$ ) EN LA FUNDICIÓN GRIS. TEMPLABILIDAD

En la fundición gris no es tan fácil como en los aceros la transformación  $\gamma - \alpha$ , a menos que estén presentes elementos perlitizantes, no ocurre por la presencia de silicio y su efecto ferritizante y grafitizante.

En el hierro fundido gris debido a la presencia del silicio, la transformación  $\gamma - \alpha$  tiene

lugar a una temperatura apreciablemente mayor y sobre una gama de temperaturas, en lugar de la temperatura eutectoide  $\gamma$  –  $\alpha$  en los aceros.

Estos dos factores favorecen la formación de la ferrita y del grafito, es decir las fases del equilibrio. La mayor temperatura de transformación es favorable debido al régimen de difusión de los átomos de carbono que es más rápido, y a la existencia de una gama de temperaturas de transformación que suministra más tiempo para el proceso de las reacciones.

El efecto del silicio sobre el diagrama hierro-carbono se ilustra en la Figura 4, diagramas pseudobinarios, que corresponden a secciones del diagrama ternario hierro-carbono-silicio para contenidos de 3% de carbono (a) y 2% de silicio (b)

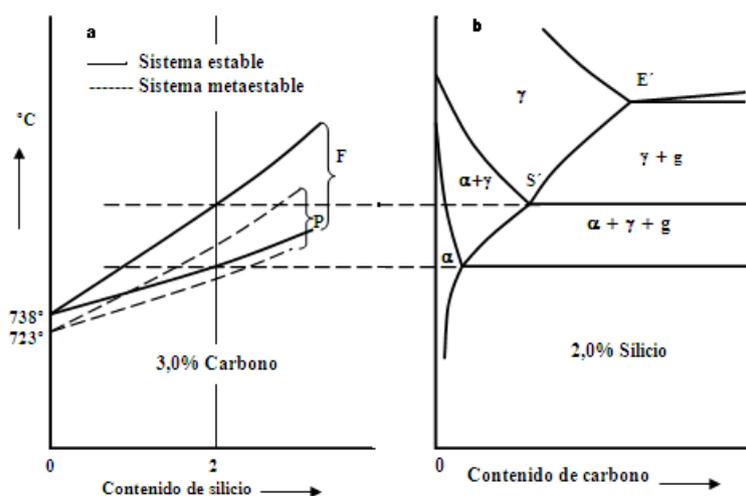


Figura 4. Sistema Hierro – carbono – Silicio (<sup>1</sup>)

En la Figura 4b el diagrama es similar al del hierro – carbono, las diferencias consisten en la presencia del silicio que ha sido sustituido en la horizontal eutectoide a 723°C, por un campo de tres fases conteniendo alfa + gamma + grafito, y además porque los límites superior e inferior tienen lugar a temperaturas por encima de los 723°C.

Inmediatamente después de la solidificación el hierro comprende dos fases: grafito y austenita saturada de carbono. En una aleación al 2,0% de silicio enfriándose en condiciones de equilibrio, la austenita tendría un contenido en carbono representado por E' en la figura 4b, todo ello inmediatamente a la solidificación. En el enfriamiento el contenido de carbono desciende a lo indicado en S', es decir, se reduce virtualmente a la mitad, precipitándose el carbono sobre el grafito existente formado durante la solidificación. Por debajo de S', la aleación pasa al campo de las tres fases, en donde la ferrita y el grafito se separan de la austenita. Esta transformación, denominada ferritización directa, determina en gran parte la estructura final y las propiedades de la fundición gris.

El mecanismo físico de la separación se ilustra en la figura 5, en la cual se considera un nódulo de grafito esferoidal, aunque el mecanismo se aplica por igual al grafito laminar. Antes del comienzo de la ferritización, las partículas de grafito están rodeadas

completamente por austenita, figura 4a. Los precipitados de ferrita se forman en la intersección de grafito/austenita, formando una capa que separa estas dos fases.

En la práctica es deseable, en general, el obtener una fundición gris completamente perlítica, puesto que esta estructura proporciona mejores propiedades mecánicas, así como una mejor resistencia al desgaste que una estructura parcialmente ferrítica. Por tanto, vale la pena afrontar la supresión de las reacciones de ferritización directa, por uno de los tres métodos siguientes.

- Disminuyendo el contenido en silicio.
- Por el control del régimen de enfriamiento a través del intervalo de las tres fases
- Por la adición de uno o más elementos formadores de perlita.

Siendo este último el método práctico y absolutamente confiable, aplicado en esta investigación.

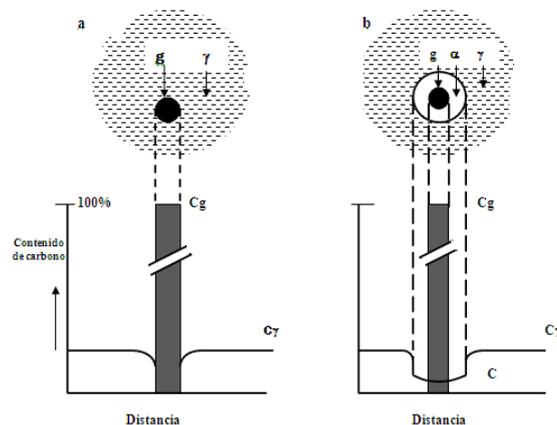


Figura 5. Mecanismo de ferritización directa.

Solo algunos Metales pesados de bajo punto de fusión son eficientes en la formación de perlita, pero el único que puede ser usado es el estaño hasta 0,1%. El Pb, Bi, y Sb son igual o más efectivos aunque son extremadamente peligrosos debido a que promueven la formación de grafito “Widmanstätten”, muy perjudicial fragilizando el material, incluso estando en algunas milésimas por ciento.

El Cu, Ni y Mn son elementos antiferritizantes o formadores de perlita. El Níquel y Cobre son ambos grafitizantes durante la solidificación, siendo además valiosos elementos de aleación, sin embargo el Ni, no es muy efectivo en la formación de perlita. La acción grafitizante del cobre baja hasta 0,05 cuando los contenidos en carbono son mayores de 3 %.

El cobre favorece ligeramente la grafitización y endurece y aumenta la resistencia de la matriz. Mejora la resistencia al desgaste y al choque de las fundiciones, proporcionándoles cualidades de antifricción muy interesantes. También mejora la resistencia a la corrosión atmosférica y a la acción de agentes corrosivos relativamente débiles. Por su bajo precio es muy empleado para sustituir al níquel. Se suele utilizar para fabricar fundiciones perlíticas de alta resistencia a la tracción.

El manganeso se opone al igual que el azufre a la grafitización del carbono y favorece la formación de cementita. Tiende a blanquear las fundiciones y a aumentar su dureza dificultando la mecanización. Normalmente las fundiciones suelen contener de 0,4 a 1 % de manganeso. El manganeso con el azufre forman inclusiones de sulfuro de manganeso y el principal papel del manganeso es neutralizar el azufre, evitando la formación del sulfuro de hierro. En general se recomienda que el contenido en manganeso sea 1,7 veces el del azufre (que es la cantidad teóricamente necesaria para neutralizarlo) más un 0,30 %. Este pequeño exceso de 0,30 % de manganeso se suele emplear, por considerar preferible un ligero exceso de manganeso y no de azufre, que es perjudicial ( $\%Mn \geq 1,7 \%S + 0,3 \%$ ).

## 4.2 EFECTOS DEL COBRE SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

### 4.2.1 EN EL HIERRO FUNDIDO GRIS-GRAFITO LAMINAR

Las propiedades mecánicas de la fundición gris con grafito laminar se ven mejoradas con el agregado de cobre por las razones que explicamos anteriormente, especialmente la resistencia y la dureza sin perjudicar la maquinabilidad.

La Tabla 1, muestra los resultados de composición química de las fundiciones de hierro fundido gris.

Tabla 1: Composición química - Fundición gris, grafito laminar*							
Muestra	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cu	%Cr
A - 0	3,18	1,61	0,34	0,19	0,12	0,10	0,10
A - 1	3,00	2,0	0,254	0,202	0,08	0,12	0,101
A - 2	3,10	2,05	0,52	0,15	0,10	0,75	0,120
A - 3	3,10	2,03	0,49	0,18	0,12	1,05	0,10
A - 4	3,15	2,0	0,55	0,20	0,10	1,52	0,08
A - 5	3,12	1,98	0,51	0,15	0,12	2,08	0,45
A - 6	3,18	2,08	0,45	0,15	0,14	2,52	0,24
A - 7	3,10	2,10	0,50	0,19	0,12	2,98	0,12
A - 8	3,10	2,05	0,45	0,14	0,10	3,52	0,15

(\*)Análisis químico en Espectrofotómetro de emisión a la chispa de lectura directa. Cortesías de la Fundición FUMASA.

La Tabla 2, presenta los resultados de los ensayos mecánicos de resistencia a la tracción y ensayo de dureza Brinell.

Las propiedades mecánicas mejoran pero no linealmente.

Por encima del 3,0% de cobre la resistencia a la tracción comienza a disminuir, estos resultados ya nos dan un indicio y confirman el límite de solubilidad aparente. Figura 6

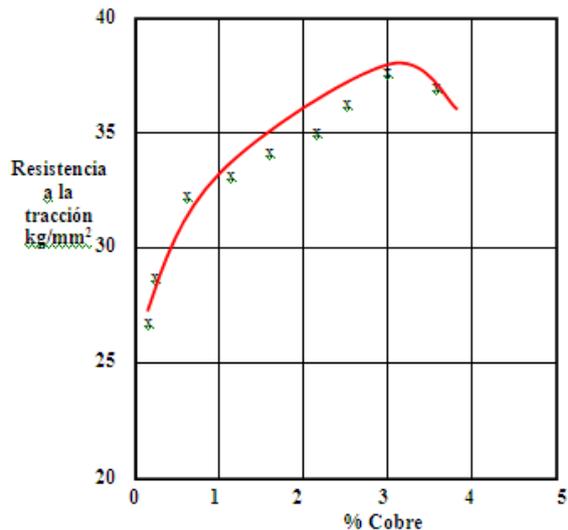


Figura 6. Resistencia a la tracción del Hierro Fundido gris laminar en probetas estándar maquinadas de 20mm de diámetro, influencia del contenido de cobre con Carbono ~ 3,0% y Silicio ~ 2,0%. Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UNM San Marcos

La influencia del cobre en la dureza (Brinell) en el hierro fundido gris grafito laminar es muy similar a la influencia sobre la resistencia a la tracción, no obstante los resultados son menos regulares que los correspondientes a la resistencia a la tracción. Sin embargo habrá que realizar ensayos con probetas de mayor diámetro, para ver su variación en piezas de mayor espesor.

La figura 7 muestra el efecto del cobre en la dureza en el hierro fundido con grafito laminar con un contenido de silicio ~ 2,0%. Algunas informaciones señalan que el cobre tiene poca o ninguna influencia sobre la resistencia a la tracción de las fundiciones con un contenido de silicio igual o mayor que el 2,0% pero no es confirmada.

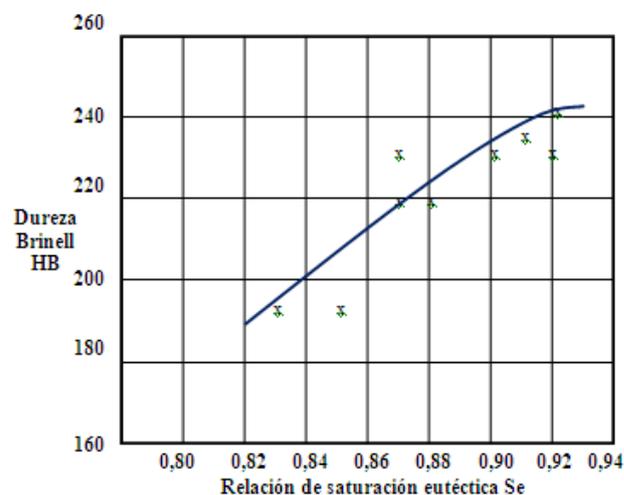


Figura 7. Valores de dureza en barras de Hierro Fundido Gris Laminar botones estándar de 30 mm de diámetro. Laboratorio de Ensayos Físicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UNM San Marcos

Tabla Nº 2 PROPIEDADES MECÁNICAS Y DUREZA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS LAMINAR NO ALEADO Y ALEADO CON COBRE Y PRESENCIA DE CROMO			
Muestra	Se*	Resistencia a la tracción	Dureza Brinell
		kg/mm <sup>2</sup>	HB
A - 0	0,85	28,4	195
A - 1	0,83	28,6	195
A - 2	0,87	32,8	220
A - 3	0,88	32,6	220
A - 4	0,90	33,4	228
A - 5	0,87	35,4	230
A - 6	0,92	36,2	230
A - 7	0,92	37,5	240
A - 8	0,91	37,0	236

$$*Se = \frac{\%C}{4,26 - 0,31 \times \%Si - 0,27 \times \%P - 0,074 \times \%Cu + 0,312 \times \%Cr}$$

El cobre tiene alguna influencia grafitizante durante la solidificación, permitiendo este efecto añadir pequeños porcentajes de cromo y obtener propiedades mejores de resistencia. Pero debemos tener en cuenta que el cromo tiene la tendencia a formar carburos por lo que se recomienda que su contenido debe estar limitado al 0,5% como máximo con el fin de evitar la formación de carburos ledeburíticos durante la solidificación, es decir una fundición atruchada; en realidad la presencia de tales carburos libres perjudicaría la maquinabilidad del hierro.<sup>(3)</sup> La presencia del cobre facilita una estructura con matriz perlítica como se muestra en la figura 8

Además, el contenido en cromo y cobre deberá estar equilibrado de acuerdo con una relación 1 a 4; esta relación asegura en la práctica un equilibrio entre la tendencia formadora de carburos de cromo y la influencia grafitizante del cobre.

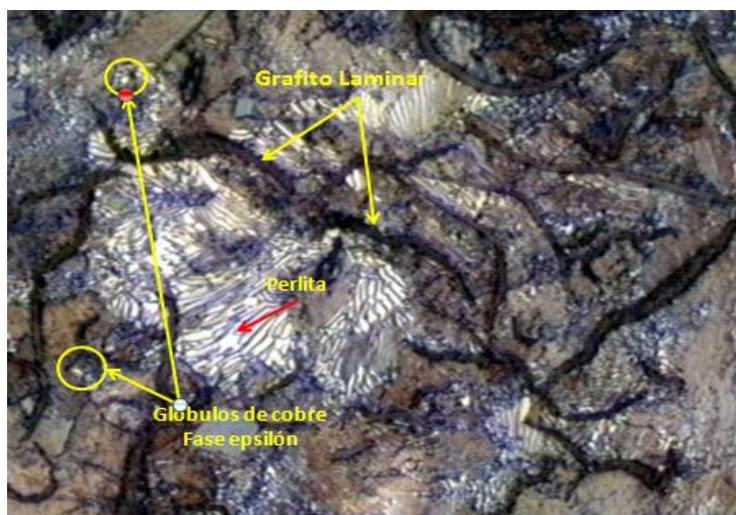


Figura 8. Presencia de glóbulos de cobre fase epsilon, no tan nítidos debido a que el contenido de cobre es < 3%. Matriz perlítica con grafito laminar tipo B. Ataque con nital 3%. X400

Un incremento en 15% de la resistencia a la tracción entre la muestra A-0 y A-3 es de por sí fácil de obtener y puede alcanzarse un incremento mayor al 25% para fundiciones como de la muestra A-5 con una adición ligeramente mayor al 2,0% de cobre y 0,45% de cromo.

#### 4.2.2 EN LAS FUNDICIONES NODULARES

En el estado bruto de colada, la matriz de los hierros nodulares, está normalmente compuesta de perlita y de ferrita, las cuales forman envueltas alrededor de los nódulos de grafito.

La matriz perlítica al 100% de perlita es difícil en piezas con diferentes espesores, se mejora si se agrega un fuerte antiferritizante. El cobre es uno de esos antiferritizantes, en la experiencia desarrollada contenidos de 2 hasta 3% de cobre no efectos adversos. Sin embargo si bien el cobre no es en sí un elemento perjudicial, tiene una correlación especial con los elementos perjudiciales tales como el titanio, plomo, antimonio, bismuto, aluminio, arsénico y estaño; el empleo de nodulizante que contengan cerio y permitan un residuo del orden del 0,005% ayuda a neutralizar los efectos nocivos de los elementos perjudiciales en general, así como su interacción con el cobre en particular.

Por la experiencia de este trabajo se tiene fundiciones nodulares que contienen cobre hasta 2,0% obteniéndose una matriz perlítica casi al 100% como se muestra en la micrografía figura 9 con propiedades de resistencia de 70 a 80kg/mm<sup>2</sup> con alargamientos variables de 16 a 5%.

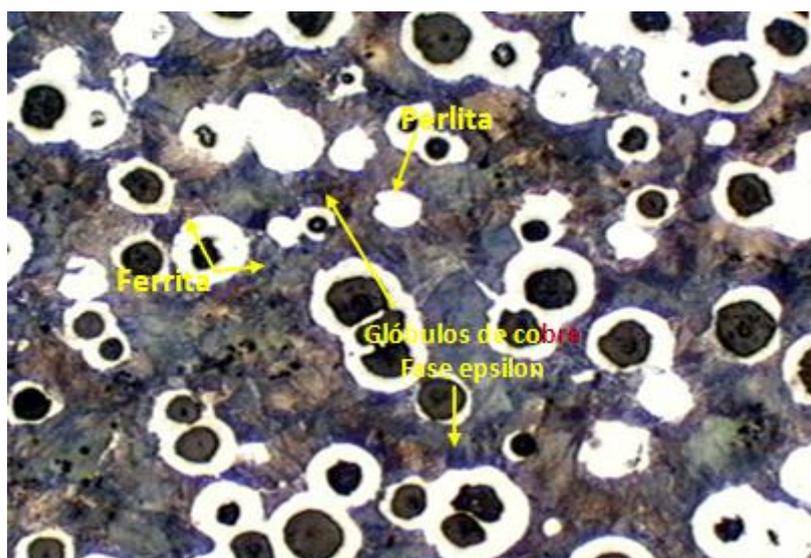


Figura 9 Microestructura muestra A-2 hierro nodular ferrítico – perlítico. Microestructura ferrítico – perlítica en proporción 70/30 y no se observan carburos, pequeños glóbulos de cobre. Aproximadamente 100 nódulos/mm<sup>2</sup>. Microestructura

como resultado de agregar cobre y un mayor contenido de manganeso a lo especificado. Ataque con nital 3%. X 400

Se ha demostrado que para la producción de una fundición nodular totalmente perlítica aleada con cobre, es ventajoso introducir el cobre juntamente con el nodulizante que contenga magnesio (10 – 15% Mg) El rendimiento del nodulizante es aproximadamente el 50% y se puede alcanzar hasta el 75% cuando el nodulizante contiene cobre.

## V. ANÁLISIS Y DISCUSION

### 5.1 La fusión

En el proceso de fusión, la selección de la materia prima es un factor importante, arrabio de bajo contenido de azufre y fósforo para la fundición nodular y evitar procesos intermedios de desulfurización.

Cuando se agrega el cobre como aleante y parte de la carga en la fusión de la fundición nodular su acción es menos efectiva que cuando se agrega con el nodulizante y obtener una matriz altamente perlítica y es mejor si el nodulizante contiene cobre en proporción adecuada para ajustar la composición.

Posteriormente es necesaria la inoculación con el objetivo de evitar el blanqueamiento y para aumentar la vida del proceso grafitización y de nodulización.

La colada se debe realizar lo más rápido posible para evitar se pierda el efecto de la nodulización y que el metal pierda temperatura.

La temperatura de nodulización debe estar cerca de los 1500°C o más.

### 5.2 Observación metalográfica

En la fundición gris con grafito laminar se puede observar la presencia abundante de perlita, casi nada de ferrita, mostrando la influencia del cobre como elemento antiferritizante.

En el hierro nodular es más difícil obtener una estructura 100% de perlita, encontramos la presencia de ferrita rodeándolos nódulos de grafito, la manera y el momento de agregara el cobre debe ser materia de más experiencias.

## VI. CONCLUSIONES

- a. La presencia de cobre en las fundiciones gris con grafito laminar y fundición nodular no es tan fácil como en los aceros la transformación  $\gamma$ - $\alpha$ , a menos que estén presentes elementos perlitizantes, no ocurre por la presencia de silicio y su efecto ferritizante y grafitizante.
- b. La presencia de cobre en porcentajes variables hasta cerca al 3,5% da como resultado una variación de la ubicación de los puntos críticos en el diagrama Hierro – Carbono facilitando la transformación  $\gamma$  -  $\alpha$ .
- c. El cobre hasta donde hemos alcanzado en la experiencia de este trabajo, mejora las propiedades mecánicas de resistencia la tracción y la dureza, por lo que este

- material es más resistente al desgaste que las fundiciones que no lo contengan.
- d. Circunstantialmente se observa que la presencia de cromo mejora las propiedades mecánicas hasta cerca del 25% con matrices altamente perlíticas.

## **VII. AGRADECIMIENTOS**

Un especial agradecimiento a los profesores del equipo docentes de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la U.N.M. San Marcos: Ing Víctor Falconí Rosadio, Héctor Luis Villacorta Arévalo, Ing Walter Alex Rengifo Sing cuya experiencia profesional nos llevó a resultados altamente satisfactorios y al estudiante Jorge Alberto Ortíz Barreto por su participación en las pruebas de laboratorio.

## **VIII. BIBLIOGRAFÍA**

1. ASM Metal HandBook Volumen 3 Alloy Phase Diagrams-1992.
2. De Sy A; Vidts J; Van Eeghem J. El mecanismo de ferritización de las fundiciones grises en relación a los elementos Sn y Cu. 1954 p. 196- 207
3. De Sy.A; Dilewijns J. Main results of Research and development carried out at Ghent University” Conference “Copper and cast iron” Aston University, Birmingham 1967.
4. Instituto Latinoamericano del Hierro y el Acero. Fundiciones de hierro, estructuras, propiedades y fabricación. 1990.