

# Mejora de la resistencia al desgaste por abrasión moderado del hierro fundido gris aleado al cobre 3,5% austemperado a 300 °C

RESISTANCE INCREASE TO ABRASIVE WEARING BY MODERATE ABRASION OF GREY CAST IRON ALLOYED WITH 3.5% AUSTEMPERED COPPER TO 300 °C

Samuel Rosario F.\* , Héctor Villacorta A.\* , Víctor Falconi\* , Walter Rengifo S.\*

RECIBIDO: 05/03/2013 – APROBADO: 15/05/13

## RESUMEN

El hierro fundido gris aleado con cobre así como la muestra inicial no aleada fueron tratadas por austempering a 300 °C durante diferentes tiempos después de haber sido austenizadas a 800 °C durante 20 minutos. Los cambios en la microestructura fueron evaluados mediante la medición de dureza y metalografía cualitativa y cuantitativa. De los resultados se desprende que la muestra aleada con cobre presenta una estructura diferente en bruto de colada y después del austempering la dureza muestra un pequeño incremento. En cuanto a la resistencia a la abrasión presenta una mejor resistencia que la no aleada aunque con menor resistencia al impacto, siendo esta superior a la establecida por la norma ASTM A 897M.

**Palabras clave:** hierro fundido gris, austemperado, resistencia a la abrasión, resistencia al impacto

## ABSTRACT

Grey cast iron alloyed with copper as well as the non-alloyed initial sample were treated by austempering at 300 °C at various times after being austenized at 800 °C in a period of 20 minutes. Microstructure changes were evaluated through hardness measurement, qualitative and quantitative metallography. Results show that alloyed sample with copper presents a different raw batch structure. After austempering sample hardness increases slightly. Similarly, resistance to abrasion also shows some improvement as compared to a non-alloyed sample but the resistance to shock decreases some. All these resistances however are higher than the level given by the ASTM A897 M norm.

**Keywords:** grey cast iron, austempered, abrasion resistance, shale resistance

\* Docentes de la EAP de Ingeniería Metalúrgica - UNMSM. E-mails: syfrosario3@hotmail.com, hlv3@hotmail.com, victorafalconi@hotmail.com, walterengifo@hotmail.com

## I. INTRODUCCIÓN

La fabricación de piezas en hierro fundido ocupa un campo muy extenso de la industria de maquinaria. Estos materiales son aleaciones de hierro-carbono, con altos porcentajes de carbono y que se denominan bajo el nombre de fundiciones por ser este el procedimiento industrial de fabricación de las mismas. El mayor porcentaje de carbono hace que la temperatura de fusión de estas sea menor que la de los aceros y además se logra una mayor fluidez del material líquido, lo que permite el llenado de piezas de espesores menores y de formas complicadas, tienen una mejor colabilidad. Por otra parte, la menor temperatura de fusión permite que la interacción metal-molde sea menos agresiva y en consecuencia se pueden obtener piezas de mejor calidad superficial.

Su bajo costo, y esta excelente colabilidad, han dado lugar a un extenso desarrollo de estas aleaciones en aplicaciones como: bloques de motor, camisas de pistón, engranajes, cuerpos de válvula, autopartes y otras muchas piezas para maquinaria de uso industrial.

La elección de un material se basa en las propiedades que puedan conseguirse en cada caso. En las fundiciones de alta resistencia buscamos los mejores valores en sus propiedades mecánicas, y estas derivan de la estructura constitutiva de las mismas. La ingeniería metalúrgica en el área de materiales estudia los caminos para conseguir la estructura más adecuada para lograr esas propiedades, utilizando técnicas, aleaciones y de procedimientos de fabricación adecuados. Hacemos hincapié en este último aspecto porque las propiedades mecánicas no son el producto de formulaciones de composición química más o menos sofisticada. La técnica de fabricación es tan importante y más que la adición de los elementos de aleación, o mejor dicho, la combinación de ambos aspectos es el camino para lograr los mejores resultados.

El hierro fundido gris es una aleación hierro carbono (*Cyberbuzz gatech*) compuesto estructuralmente de un constituyente matriz y de un material disperso. La matriz puede considerarse de tipo ferrítico, perlítico o ferrito-perlítico. El material disperso es la parte del carbono que no está disuelto en la matriz y que toma la forma de grafito (flecós-lamellas) (Figura N.º 1). Este grafito aparece como pequeñas partículas o láminas insertas en la matriz metálica. Si la estructura matriz es de tipo ferrítico, será mayor la cantidad de grafito, puesto que la ferrita apenas disuelve carbono. Si por el contrario es de tipo perlítico entonces será menor la cantidad de carbono libre puesto que habrá una parte del carbono que se une a otra de hierro formando la cementita que constituye el conjunto perlítico (Figura N.º 2). La cantidad, la forma y el tamaño del grafito, y por otra parte el tipo de estructura matriz que resulte serán los elementos determinantes de las propiedades que tenga esa fundición.

El grafito presente en la estructura hace que las fundiciones grises tengan alta maquinabilidad y buena resistencia al desgaste. El grafito las hace autolubrificantes y a la vez amortigua las vibraciones. Además se obtiene una buena conductividad térmica y buena resistencia a temperaturas altas. Por el contrario, tendremos una baja tenacidad puesto que esas láminas de grafito son incipientes microfisuras.



Figura N.º 1. Hierro fundido gris, flecos o lamellas de grafito.



Figura N.º 2. Hierro fundido gris, matriz perlítica.

Estos materiales son fabricados como productos fundidos y en ese proceso es donde se dan las condiciones que dan lugar a la estructura final. Por tanto, el mejor conocimiento de los mecanismos de nucleación y solidificación, así como los de transformación en estado sólido nos darán las bases para estudiar los caminos que nos llevarán a obtener la estructura más adecuada al uso que se busque. Aquí también se cumple el principio que rige en el caso de los aceros al carbono aleados: los elementos de aleación son factores que permiten obtener las mejores propiedades del acero en cuanto a conseguir las condiciones en que el carbono se manifiesta como el verdadero elemento de aleación. Es decir, los aleantes son elementos acondicionadores de la acción del carbono en el acero.

El diagrama hierro-carbono (Figura N.º 3) indica que, en la zona de altos porcentajes de carbono, se puede presentar dos formas: una de tipo estable hierro-carbono y otra de tipo metaestable: hierro-cementita (Pero-Zans, 1994). En el diagrama estable la reacción eutéctica tiene lugar a 1153 °C y para una composición de 4.2%, produciéndose austenita de 2,1% de C y grafito, mientras que la reacción metaestable se da a 1147 °C para una composición líquida de 4.3% y produciéndose austenita de 2,14% y cementita –o carburo de hierro.

En condiciones normales, estos materiales dan lugar a las llamadas fundiciones blancas donde el carbono está todo combinado bajo la forma de cementita y por tanto son materiales muy duros y frágiles, no aptos para piezas de maquinaria sin el tratamiento térmico adecuado. Será necesario establecer unas condiciones adecuadas para que en lugar de generar cementita, en esa zona de solidificación primaria, aparezca el grafito en forma libre. Los dos parámetros principales que hacen posible esa reacción son la presencia de silicio y una lenta velocidad de enfriamiento. Tanto uno como el otro factor permiten la formación del grafito y evitan por tanto que aparezca la cementita.

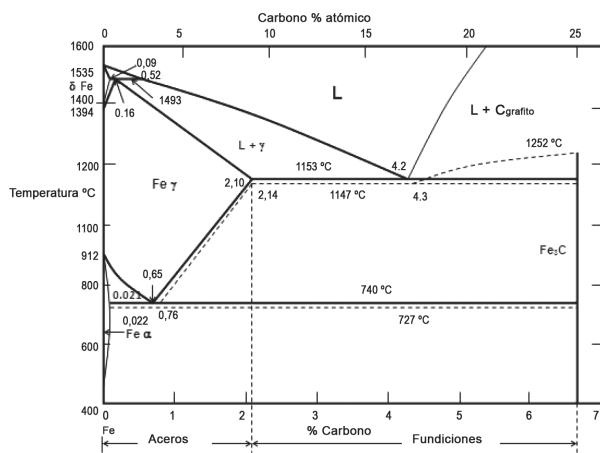


Figura N.º 3. Diagrama hierro-carbono (estable). Hierro-carburo de hierro (metaestable). Adaptado del Binary Alloy Phase Diagrams, 2.ª ed., Vol. 1. T. B. Massalski (Editor in Chief) 1990. ASM International, Materials Park. OH.

Tenemos por tanto dos etapas bien definidas: la estructura primaria de solidificación, donde se define la forma y cantidad del grafito y la producida por la transformación de la austenita en estado sólido que da lugar a la matriz de la fundición.

Las propiedades mecánicas finales del material serán la conjunción de ambos aspectos: la matriz y el grafito. Estos materiales son muy sensibles a la velocidad de solidificación requieren de un diseño adecuado por parte del fundidor para minimizar o evitar los efectos de sensibilidad al espesor. La formulación de la composición viene dada por la estructura final deseada y por los espesores que tenga la pieza en las distintas zonas.

Hay una cierta correlación entre el porcentaje de carbono y las propiedades de resistencia, se indica esa relación para fundiciones perlíticas, esto se consigue porque estas fundiciones de menor porcentaje de carbono son las que tienen menor cantidad de láminas de grafito (ASTM Handbook, 1992).

Por otra parte, en cuanto a la formación de una matriz más o menos perlítica será función de la combinación de la cantidad de carbono y de silicio, y por supuesto del espesor de la pieza.

En estas aleaciones suele establecerse un parámetro llamado **carbono equivalente**, que se define como la suma del carbono real presente más la influencia que tienen

los elementos silicio y fósforo, llamados grafitizadores, en cuanto favorecen la formación de grafito.

$$C_{equivalente} = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

$$CE = \%C + 0.3 (\%Si) + 0.33 (\%P) - 0.027 (\%Mn) + 0.4 (\%S)$$

Cuando el carbono equivalente es igual a 4,3% el modo de solidificación es esencialmente 100% eutéctico (ASTM Handbook, 1992). Se da una cierta relación entre el valor del CE y la resistencia que se puede estimar en una aleación de hierro concreta (Figura N.º 4), como se ve en el gráfico adjunto. También se ve la influencia de la velocidad de enfriamiento en relación a de los diferentes espesores de la pieza.

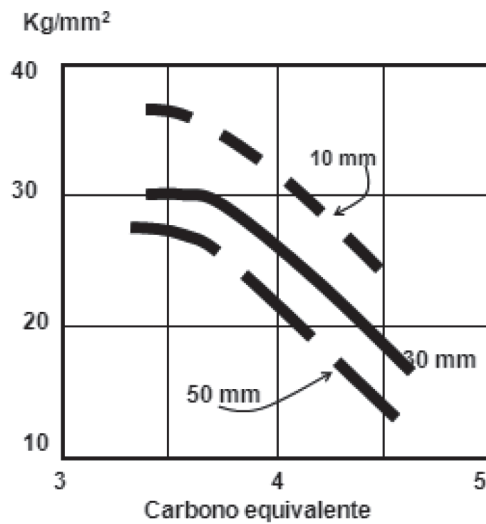


Figura N.º 4. Relación entre el carbono equivalente y la resistencia a la tracción en el hierro fundido gris.

El contenido de manganeso varía en función de la matriz deseada, típicamente, puede ser tan bajo como 0,1% para hierros fundidos ferríticos y tan alto como 1,2% para hierros fundidos perlíticos, ya que el manganeso es un fuerte promotor de la perlita.

La cantidad de silicio presente será por tanto determinante del tipo de estructura que queremos obtener. La definición de la cantidad será un balance del carbono equivalente resultante y del espesor de las piezas. El efecto grafitizador del silicio se puede explicar observando cómo modifica las temperaturas eutécticas en los diagramas estable y metaestable (Figura N.º 5). La separación de ambas temperaturas da lugar a que la curva de solidificación típica de las aleaciones hipoeutécticas permita completar la solidificación sin que se haya atravesado la línea eutéctica metaestable y así obtener una estructura ausente de cementita. Es evidente que la velocidad de enfriamiento juega un papel fundamental en este proceso, y eso puede llevar al fundidor a variar el contenido de silicio en el caso de tener espesores delgados o bien a utilizar otras técnicas localizadas para minimizar las velocidades en esos puntos.

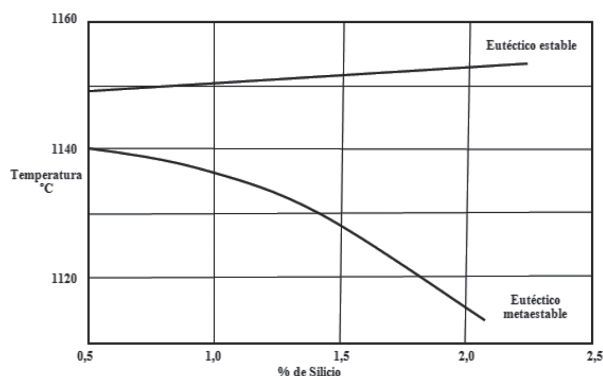
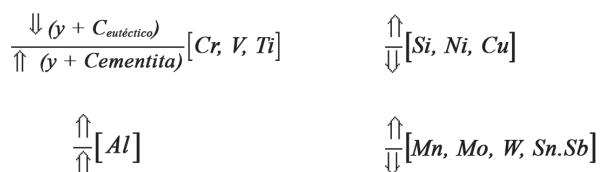


Figura N.º 5. Influencia del contenido de silicio en la variación de la temperatura del eutéctico.

La influencia de los elementos de aleación comunes en las transformaciones en el estado sólido es individual y única. Algunos elementos son más efectivos en evitar la presencia de ferrita libre, mientras que otros son más efectivos en el afinamiento de la perlita. El cromo, cobre, manganeso, vanadio y níquel son efectivos en ambos casos: como inhibidores de la formación de ferrita libre, así como en obtener una perlita más fina. El molibdeno y el vanadio son los más poderosos en este segundo objetivo, y no tienen prácticamente influencia sobre inhibir la formación de ferrita libre. Por tanto una combinación de varios elementos de aleación puede tener un efecto sinérgico para conseguir una alta resistencia con la menor cantidad de aleantes.



- La flecha superior se refiere a la forma de desplazar la temperatura eutéctica del diagrama estable
- La flecha inferior se refiere a la forma de desplazar la temperatura eutéctica del diagrama metaestable

En esta transformación de la austenita hay algunos elementos que facilitan la formación de perlita como son: el **cobre**, el níquel y el manganeso. El **cobre** es interesante porque además de gammageno, retrasa la ferritización antes mencionada por un efecto barrera en la difusión del carbono. Hay otros elementos que actúan de la misma forma como son el bismuto, el plomo y el estaño, este último resulta más efectivo que el cobre pero le da fragilidad a la fundición; en cuanto a promotor de la perlita se debe usar en pequeñísimas cantidades, algunos recomiendan del 0,04 al 0,1%.

Se puede concluir que el objeto de los elementos de aleación en las fundiciones es conseguir las mejores condiciones estructurales para su comportamiento. Pero estas formulaciones o recomendaciones de aleación deben acompañar y complementar las características de la pieza a fundir, ya que el componente de la sensibilidad al espesor debe

ser ponderada por el fabricante según las condiciones de fabricación: tipo de molde, diferencia de espesores, dinámica de la solidificación, posición de los alimentadores y entradas de la colada, etc.

También hay dos aspectos a considerar en la conformación de la estructura final: la matriz, sea esta ferrítica, perlítica o mixta, y la forma, tamaño y distribución del grafito. Asimismo, considerar la ausencia de puntos “acoquillados” y de carburos, producidos por zonas de pequeño espesor o de mayor velocidad de enfriamiento, estos carburos serán cementita o bien según los elementos añadidos pueden ser de cromo o de manganeso. Todo ello lleva a que sea corriente hacer una formulación que contemple la adición de dos aleantes para considerar el efecto sobre los dos aspectos considerados.

También se pueden producir fundiciones de alta resistencia con una muy baja cantidad de aleantes cuando estos han sido elegidos en forma adecuada. Quizás el camino más económico de conseguir un hierro fundido gris resistente sea reducir el contenido de silicio manteniendo un CE adecuado. Asimismo esta reducción debe ir balanceada por la influencia que puedan tener los otros posibles elementos de aleación elegidos.

Del total de piezas metálicas producidas en los principales países productores a nivel mundial, la fabricación de piezas de hierro fundido representa el 70% según datos reportados por la Turkish Foundry Industry, 2000.

Al analizar el modo de satisfacción de la demanda de piezas de hierro fundido, en talleres de fundición pequeños y medianos; se observa que en su plan de producción para una etapa dada, se encuentran diversas piezas en cantidades discretas. Además en la producción de las mismas se emplea un metal de composición única. Este metal es generalmente no aleado o de muy baja aleación, con una estructura típica de un hierro gris; por lo que no resulta una opción adecuada para la producción de piezas resistentes al desgaste. En este trabajo se recomienda el empleo de la aleación en cuchara con cobre para obtener el número de piezas requeridas, con la composición química que las hace más aptas para un uso específico, especialmente en cuanto a los requisitos que tienen que ver con la **resistencia al desgaste**.

## II. EL DESGASTE

La vida útil de la mayoría de los productos manufacturados tales como partes móviles de máquinas y herramientas depende de la condición de sus superficies y del deterioro de ellas debido al uso. Este daño que se provoca en una superficie sólida se denomina “desgaste” y suele ser el factor principal que limita la vida y el desempeño de los componentes de una máquina.

Un hallazgo temprano en la historia de la técnica fue el del proceso de abrasión. Mediante el simple frotamiento de dos piedras con la interposición de un abrasivo –arena en suspensión acuosa–, se obtuvieron las hachas pulidas típicas del Neolítico. Hoy, con esmeril ( $Al_2O_3$ ), carburo de silicio (SiC), diamante y otros abrasivos, pueden erosionarse, en minutos, varios milímetros de material, por duro que sea.



El abrasivo consta, por lo común, de pequeños granos, poliedros minúsculos e irregulares con aristas que se clavan en el material tratado. En esos puntos se originan grietas y microfracturas (Figura N.º 6), que terminan si el sustrato es vítreo y duro, en formaciones concoideas; si el abrasivo opera sobre un metal, en cambio, se arrancan las finas virutas características de los sólidos plásticos y fluentes.

Los tipos de desgaste más importantes son:

- Desgaste abrasivo.
- Desgaste adhesivo.
- Desgaste por erosión.
- Desgaste por fricción (*Fretting*).

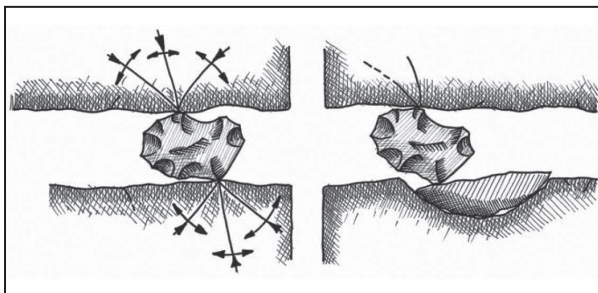


Figura N.º 6. Acción abrasiva de las partículas duras sobre el material base. Según J. Strong.

## 2.1 Desgaste abrasivo

El desgaste abrasivo (el tipo de nuestro interés) ocurre cuando partículas duras suspendidas en un fluido o incrustadas en otra superficie ruedan o deslizan bajo presión contra otra superficie. Las partículas duras pueden estar atrapadas entre dos superficies deslizantes y producen abrasión sobre ambas o sobre una de ellas como se muestra en la Figura N.º 7. Otra característica importante del desgaste abrasivo es el calor que es generado por la fricción entre los dos materiales.

La Figura N.º 7(a) representa la acción cortante o de arado de una partícula que está bajo presión. Es decir, la partícula no está libre pero está bajo presión de otras partículas o de un objeto sólido. Lo que es característico de abrasión por esmerilado cepillado o rectificado, en los cuales partículas duras son forzadas a rasgar o cortar la superficie del metal.

La Figura N.º 7(b) representa la acción cortante o de arado de partículas libres a través de la superficie de un metal después de impactar sobre la superficie. Esto es característico del desgaste erosivo, en la cual partículas libres chocan con la superficie en un ángulo, entonces se deslizan a través de la superficie. Un ejemplo típico de desgaste por abrasión es el que ocurre entre la superficie de las ruedas y el riel de un tren debido a las partículas de polvo, lubricante o residuos de desgaste, la Figura N.º 8 muestra el aspecto de una superficie fracturada por abrasión de un riel de ferrocarril.

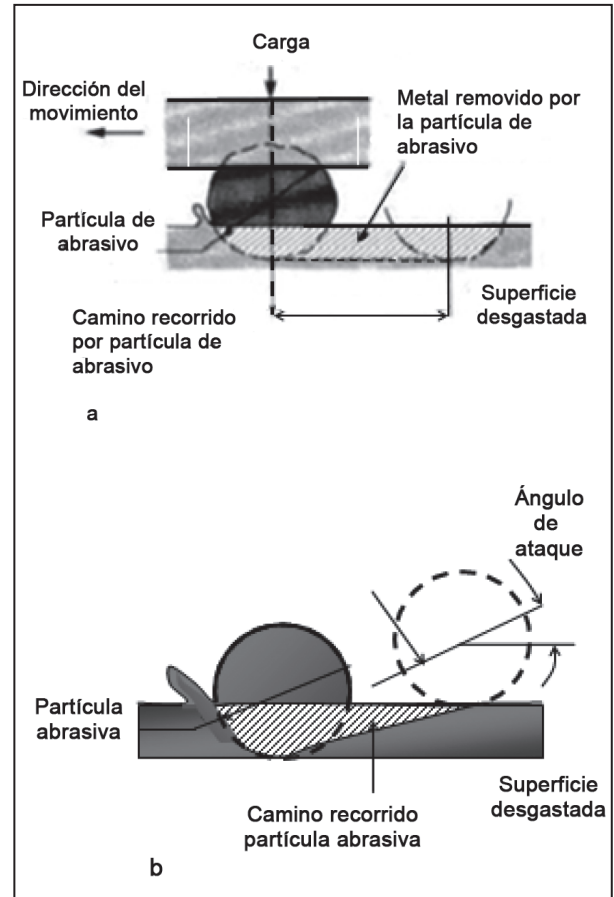


Figura N.º 7. Modelo esquemático de dos modos de aplicaciones de fuerzas por partículas abrasivas.

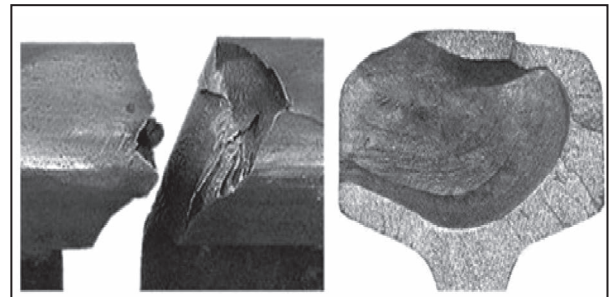


Figura N.º 8. Desgaste abrasivo en un riel producido por las ruedas. (Fotos reimprimadas con autorización del KTH – Royal Institute of Technology, Sweden).

En general, el desgaste abrasivo puede algunas veces ser reducido o tratado por uno de varios métodos: aumentar la dureza superficie, remover partículas extrañas o reemplazar la parte desgastada.

En este trabajo se muestran algunas tendencias actuales de empleo de hierros fundidos en la obtención de piezas resistentes al desgaste, así como se presentan en particular algunas experiencias autores en el empleo de hierros fundidos de bajo nivel de aleación, para producir piezas de repuesto, cuya vida útil se incrementa producto a ser más resistentes.

### III. EFECTOS METALÚRGICOS DEL COBRE EN LA FERRITA

La presencia de elementos disueltos en las fases líquida y sólida del hierro cambian la temperatura de equilibrio del diagrama Fe-C; esto resulta en un incremento o decremento de las fases hierro "α" y hierro "γ".

#### 3.1. 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 efecto similar y bajo precio es muy empleado para sustituir al níquel, aunque por su solubilidad limitada en el hierro γ es imposible alcanzar la misma estructura martensítica.
- Se suele utilizar para fabricar fundiciones perlíticas de alta resistencia a la tracción.
- Se agrega para aumentar la capacidad de templado.
- Crea una barrera para la difusión del carbono, por lo que retarda el tiempo de austenización.
- No se ha reportado que altere el inicio de la transformación en el austemperizado, pero se cree que retarda la aparición de carburos y por ende retarda la segunda etapa, por lo que amplía el intervalo de tiempo donde se tiene la máxima ductilidad y resistencia al impacto.
- La acción grafitizante baja hasta 0,05 cuando los contenidos en carbono son mayores de 3%.

La solubilidad de cobre en el hierro gamma de acuerdo con el diagrama de fases hierro-cobre de la Figura N.º 9 es aproximadamente 8,0% a 1094 °C y disminuye al 3,0% a la temperatura eutectoide de 835 °C, aproximadamente.

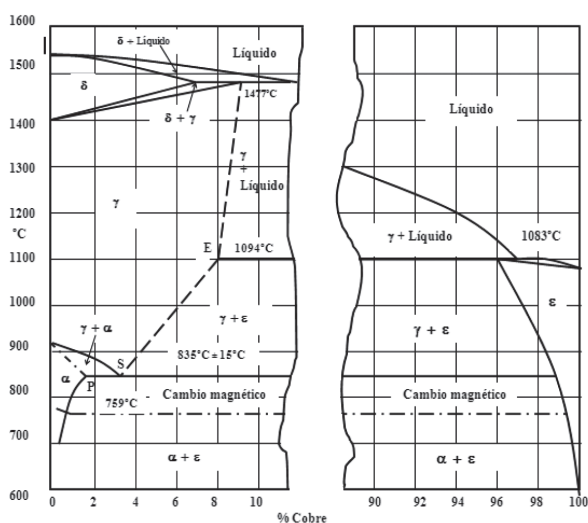


Figura N.º 9. Diagrama de fases hierro-cobre (Svensson, 2003).

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.

### IV. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para verificar la acción del cobre en el hierro fundido gris con grafito laminar se estableció el siguiente método experimental:

1. Establecer la composición de hierro fundido gris carbono, cobre 3,5%, con silicio fijo en ~ 3,0%.
2. Fundir Probeta bloque en Y, ASTM E 8, moldeo en arena y fusión en horno a gas con crisol de grafito.
3. Análisis químico de las muestras fundidas.
4. Tratar térmicamente: *Austempering*.
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. Evaluación de resultados.

El proceso de moldeo y fusión se muestra detalladamente en la Figura N.º 10b.

### V. MÉTODOS Y RESULTADOS

#### 5.1. Proceso de preparación para la obtención de la aleación

##### Metal base

Para la obtención de las probetas representativas de cada aleación, se eligió la aleación en cuchara, partiendo del metal base obtenido en un horno de crisol con una composición química característica de un hierro fundido gris (Tabla N.º 1).

La caracterización química del metal base utilizado, para la obtención de las aleaciones se realizó por espectroscopía de emisión atómica, mediante el empleo de un *Spectrocast*.

Tabla N.º 1. Composición del metal base sin cobre\*

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Cu%
3,44	2,78	1,21	0,358	0,0478	0,357	0,423

(\*). Análisis químico en Espectrofotómetro de emisión a la chispa de lectura directa. Cortesías de la Fundación FUMASA. Dureza: 131 HB



**Figura N.º 10.** a) Preparación del molde de arena. b) Fusión en horno de crisol, verificando la temperatura del metal. c) Preparando el vertido en moldes de arena y metálicos. d) Probeta de hierro fundido gris con cobre. Laboratorio-Taller de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, UNMSM.

**5.2. Efectos del cobre sobre las propiedades mecánicas**

Según el esfuerzo a la tracción en PSI, el hierro fundido gris aleado con Cu 3,5% clasifica con la Norma ASTM A 48 Grado 41. Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM (Tabla N.º 2).

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.

**Tabla N.º 2.** Características mecánicas del Hierro Fundido Gris con 3,5% Cu

Área mm <sup>2</sup>	Carga máxima		Esfuerzo máximo			Fluencia 0,2% kN	Dureza HB
	kN	N	MPa N/mm <sup>2</sup>	kg/mm <sup>2</sup>	PSIlb/pulgada <sup>2</sup>		
113,097	32,1718	32 171,8	284,36	28,997	41 247,71	20,1093	278

**VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN**

**6.1. Fusión y obtención del hierro fundido gris**

Para la fusión y obtención del hierro fundido gris con la composición razón de estudio, se utilizó un horno a gas con crisol de grafito, como el que se muestra en la (Figura N.º 10b); posteriormente a la fusión del material se realizó los siguientes procesos metalúrgicos: inoculación y vaciado en moldes, los cuales se detallan a continuación:

**6.1.1. Inoculación y vaciado**

El proceso de inoculación tiene por objeto sembrar las semillas para que se aglomeren a su alrededor el carbón en exceso. El proceso de inoculación se llevó a cabo en el crisol, empleando como inoculante ferrosilicio (Tabla N.º 3).

Terminada la fusión, se vertió el metal fundido en moldes de arena sílice, los cuales tienen forma de bloque en Y, lo que permite que las porosidades, rechupes e heterogeneidades queden en la superficie del molde, permitiendo a la parte inferior permanecer lo más libre posible de defectos. En la Figuras N.º 12 y 13 se muestra un esquema de los bloques Y.

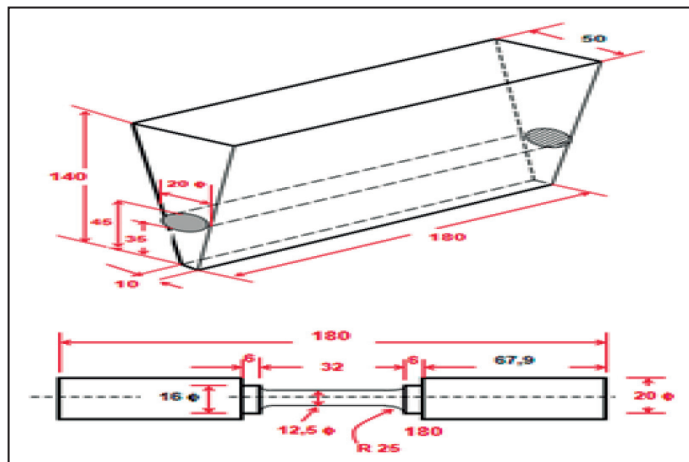
**Tabla N.º 3.** Composición química de los inoculantes (% en peso)

Inoculante	Si	Ca	Al	Ba	Fe	Mn	Zr	Ti	Cu
FeSi	78,7	1,56	0,85	1,31	16,2	0,47	0,55	0,05	0,03

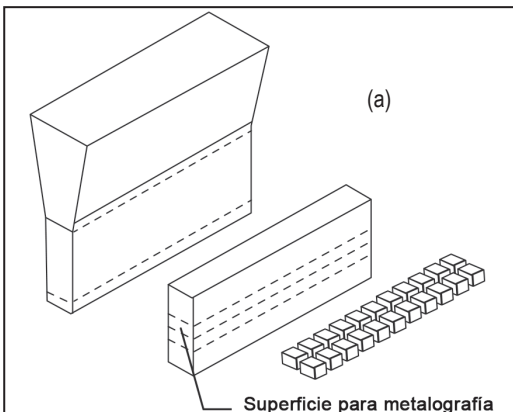
Suministrado por Italmagnésio S.A, (Minas Gerais, Brasil) a través de Insumos Metalúrgicos Ltda. (Medellín, Antioquia, Colombia).



**Figura N.º 11.** Rotura de probeta, característica del hierro fundido gris. Fractura frágil.



**Figura N.º 12.** Esquema del bloque de Fundición "Y" de donde se maquinaron las probetas de ensayo de tracción. ASTM E8.



**Figura N.º 13.** a) Esquema del bloque en "Y"; y b) Obtención de las muestras para dureza y metalografía.

### 6.2 Composición química utilizada

La composición química utilizada del hierro fundido gris con cobre 3,5%, estudiada (% en peso) (Tabla N.º 4)

**Tabla N.º 4.** Composición del hierro fundido con cobre\*

Colada	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cu%
1	2,902	2,934	0,899	0,292	0,18	2,161
2	3,67	3,27	1,43	0,049	0,18	3,57

(\*) Análisis químico en Espectrofotómetro de emisión a la chispa de lectura directa. Cortesías de la Fundición FUMASA. La muestra (2) se consiguió con inoculación y ajuste del cobre con la que se hace los tratamientos térmicos de austemperizado.



### 6.3. Tratamientos térmicos

El hierro fundido gris austemperizado se obtiene por medio de dos tratamientos térmicos continuos, los cuales se detallan a continuación:

#### 6.3.1. Austenización

El tratamiento térmico de austenización consiste en calentar la aleación dentro de un rango de temperatura entre 815 a 920 °C, con la finalidad de formar estructuras cristalinas de austenita homogénea. La temperatura elegida para este tratamiento depende de la siguiente etapa del proceso, así como del tipo de estructura final buscada. Una vez que se ha seleccionado la temperatura de austenización, la temperatura es controlada con una diferencia de ± 10 °C.

#### 6.3.2. Austemperizado

Una vez la aleación se ha transformado en austenita homogénea, se transfiere rápidamente al horno de austemperizado, en donde se utilizan diferentes tipos de baños de sales o metales para mantener la temperatura en un rango de 230 a 400 °C, en este paso se busca la transformación de la austenita en bainita (ausferrita). De acuerdo con las propiedades requeridas de la aleación, es como se selecciona la temperatura de austemperizado, aquí el control de temperatura y el tiempo del tratamiento térmico es de suma importancia (Figura N.º 14).

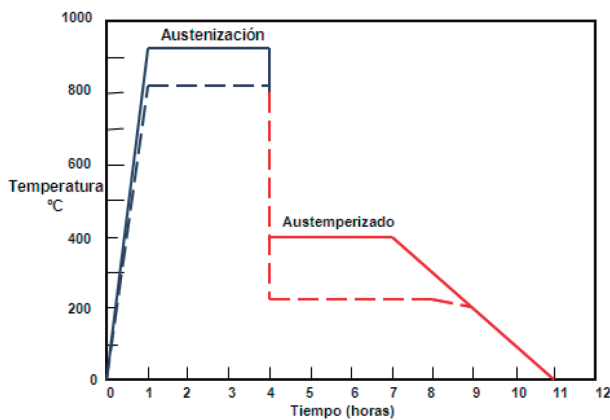


Figura N.º 14. Proceso de austemperizado

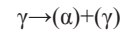
#### 6.3.3. Etapas de la transformación del austemperizado

En la Figura N.º 15, se puede apreciar un ciclo típico del tratamiento térmico de austemperizado, en donde la pieza de fundición es austenizada (formación de austenita) entre 850 y 950 °C, templada posteriormente en un baño de sal, metal o aceite en un rango de temperatura de 300-500 °C y mantenida a esta temperatura por el tiempo necesario para lograr la transformación de la austenita en bainita.

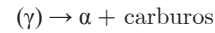
Diagrama de transformación isotérmica, mostrando la trayectoria térmica de un tratamiento térmico de austemperizado típico para el hierro fundido gris.

La transformación isotérmica, en el intervalo de temperatura del austemperizado se realiza en dos etapas:

Etapa 1 (transformación parcial de austenita):



Etapa 2 (descomposición de la austenita metaestable):



Donde:

$\gamma$  : austenita homogénea

$(\alpha)$  : ferrita sobresaturada con carbono

$(\gamma)$  : austenita metaestable con alto contenido de carbono

$\alpha$  : ferrita

$\alpha + \text{carburos}$  : vainita superior o inferior

## VII. TRATAMIENTO TÉRMICO

Con respecto al proceso del tratamiento térmico de austemperizado que se empleó, este se realizó en dos etapas, como se detalla a continuación:

### 7.1. Austenizado

Todas las probetas (2 cm  $\phi$  x 2 cm altura) fueron transformadas en austenita, a una temperatura de 820-850 °C (Figura N.º 15) durante 15-20 minutos en un horno de mufla. Para evitar la descarburación en la superficie por efectos de difusión hacia el exterior, a las probetas se les aplicó una capa de pintura base zirconia y luego se empaquetaron en una caja metálica rellena de rebaba fresca de hierro gris.

### 7.2. Austemperizado

Para la transformación isotérmica de austemperizado, es decir la etapa en que ocurre la transformación de austenita a bainita (ausferrita), se realizó en un baño de plomo fundido, y con temperatura de 300 °C durante 5, 10, 15 y 20 minutos. Una vez transcurrido el tiempo de transformación, las muestras fueron sacadas del baño de plomo y enfriadas con agua. Las temperaturas del tratamiento térmico fueron seleccionadas con el fin de obtener una estructura cristalina del tipo bainítico (ausferrítico).

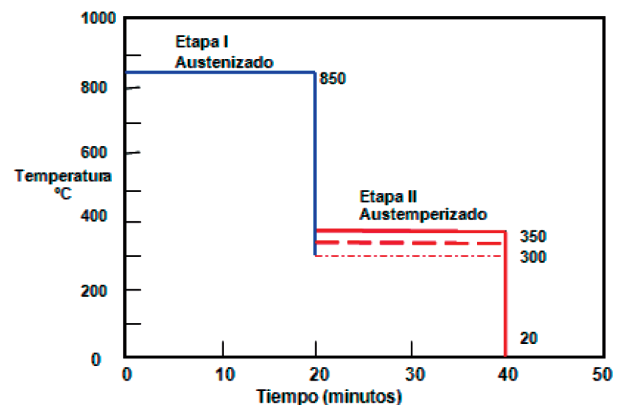


Figura N.º 15. Proceso del tratamiento térmico empleado en el experimento.

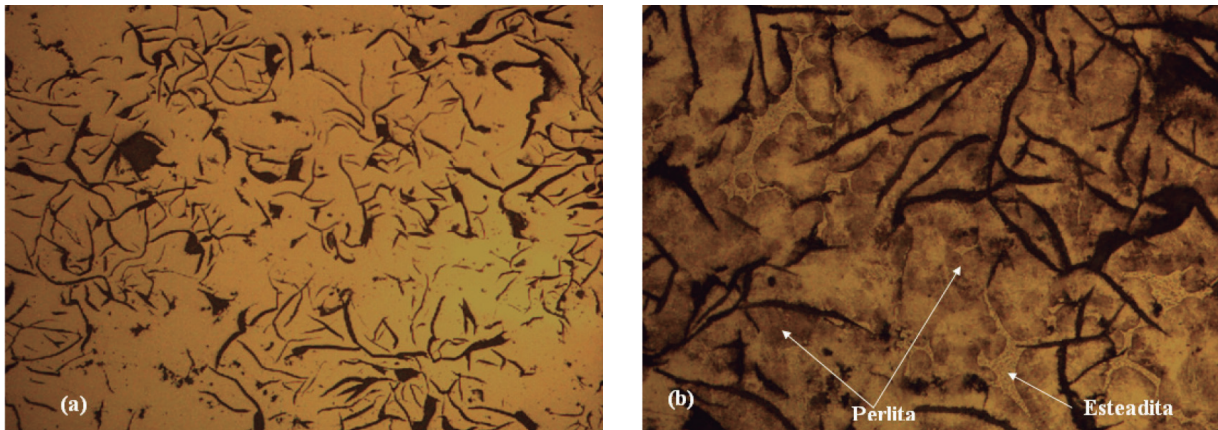
**7.3. Observación metalográfica**

**7.4. Preparación metalográfica**

Con la finalidad de establecer la validez de la prueba y observar las microestructuras de los materiales, en la superficie previamente pulida de las probetas, se realizó

el análisis metalográfico de la microestructura. Después del tratamiento térmico de austemperizado, se realizaron las metalografías en un microscopio metalográfico Olympus Metphot, en campo claro, a 200 y 400 aumentos, la microestructura se reveló mediante ataque químico con una solución de Nital al 2% y ácido pícrico según el caso (Figura N.º 16).

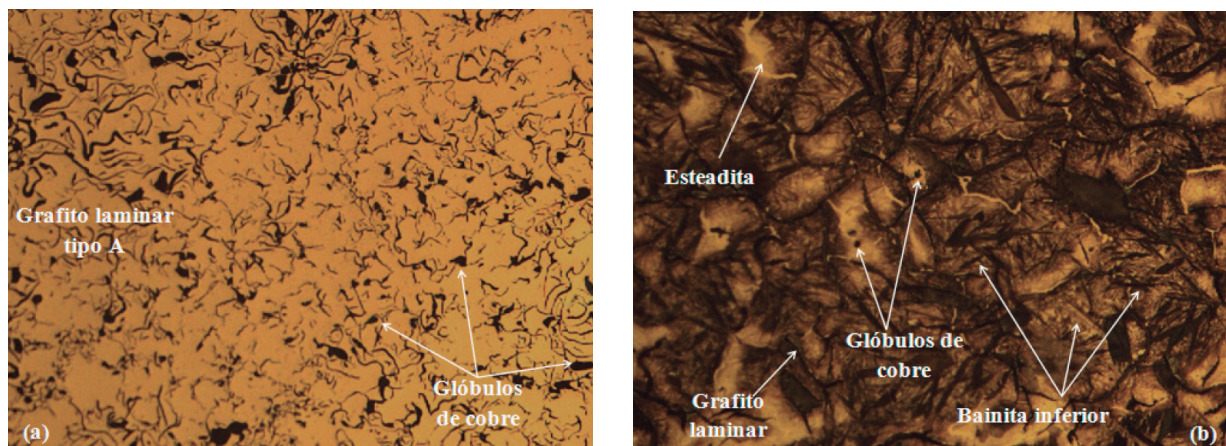
**Muestras de hierro fundido base sin aleación**



**Figura N.º 16:** Muestra de hierro fundido gris base, sin aleación: (a) Sin ataque grafito laminar Tipo A. (b) Con ataque químico, Nital 2% matriz perlítica y presencia de esteadita.

**7.4.1. Resultados metalográficos**

**Muestra de hierro fundido gris con cobre 3,5% en bruto de colada**

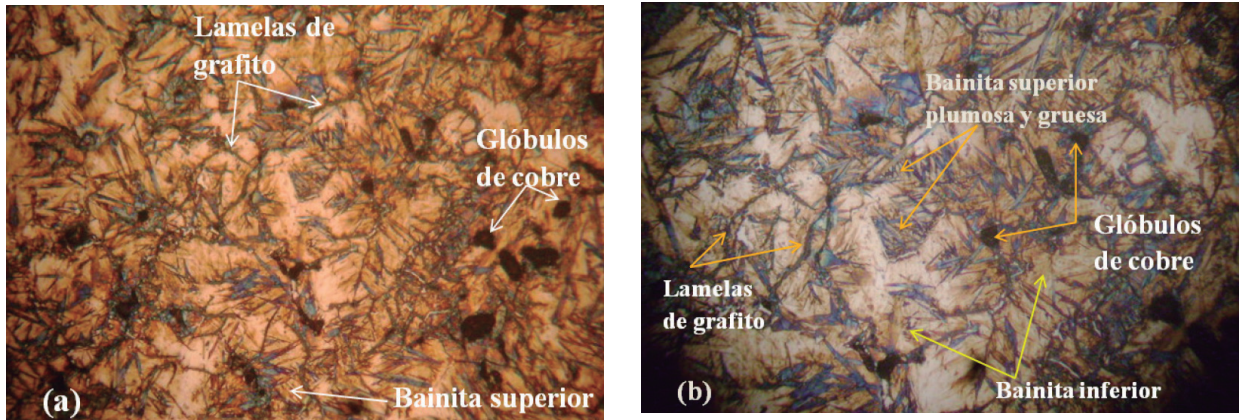


**Figura N.º 17.** (a) Hierro fundido gris con 3,5% de cobre, sin ataque en bruto de colada. (b) La misma muestra ataque con Nital 2%, tiempo 20 segundos, bainita inferior, acicular y fina.

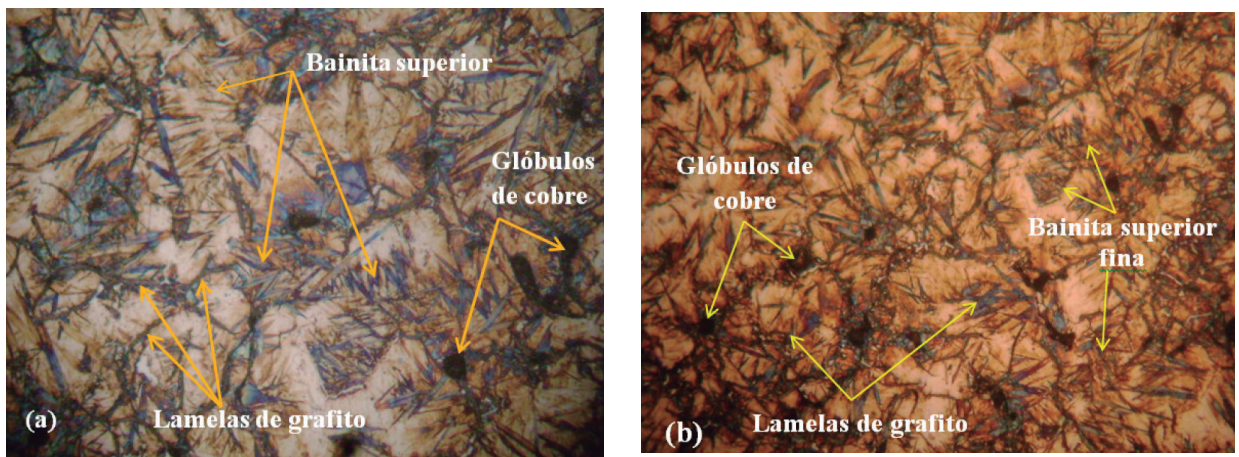
La microestructura presente en estado bruto de colada de la Figura N.º 17 (a) sin ataque muestra el grafito tipo A y glóbulos de cobre, La Figura 17 (b) es la muestra con ataque señala la presencia de bainita inferior, acicular y

fina. Las Figuras N.º 18 y 19 presentan las muestras tratadas térmicamente, austemperizado a 300 °C a 5, 10, 15 y 20 minutos enfriados en agua, mostrando la estructura característica bainita.





**Figura N.º 18.** (a) Muestra con austemperizado a 300 °C durante 5 minutos enfriado en agua, muestra bainita superior, dureza Brinell: 378 HB, presenta glóbulos de cobre. (b) Austemperizado a 300 °C durante 10 minutos, enfriada en agua muestra mezcla de bainita superior plumosa y gruesa, y bainita inferior, presenta glóbulos de cobre, dureza Brinell: 383 HB. Ambas muestras con ataque con ácido pícrico durante 10 segundos. 100X



**Figura N.º 19.** (a) Estructura típica de muestras tratadas a 300 °C durante 15 minutos mostrando vainita superior dureza Brinell: 383 HB. (b) Se muestra bainita superior ligeramente más fina, dureza Brinell 404 HB. Ataque con ácido pícrico durante 10 segundos.

**7.4.2. Resultados de las pruebas mecánicas y físicas**

La Tabla N.º 5 presenta los resultados de las pruebas mecánicas y físicas después del tratamiento de austemperizado a 300 °C en los tiempos indicados. La dureza Brinell de la

aleación ensayada relacionada con el material base sin cobre de dureza 131 HB, muestra el incremento al ser aleado con cobre 3,5% y tratada térmicamente por austemperizado.

**Tabla N.º 5.** Resultados de las pruebas mecánicas y físicas (\*)

Muestra con T. térmico austemperizado a 300 °C	Área mm <sup>2</sup>	Carga máxima		Esfuerzo máximo			Dureza Brinell HB
		kN	N	MPa N/mm <sup>2</sup>	kg/mm <sup>2</sup>	PSI lb/pulgada <sup>2</sup>	
5,0 minutos	12 271,875	43, 7536	43 753,6	386,76	39436	56 096,88	378
10,0 minutos		44, 3224	44 322,4	391, 7574	39, 949	56 826,14	383
15,0 minutos		44, 3224	44 322,4	391, 7574	39, 949	56 826,14	383
20,0 minutos		46, 7601	46 710,1	413, 3941	42, 146	59 951,58	404

(\*) Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM. Los valores de dureza en botones de 30 mm de diámetro. Laboratorio de Ensayos Físicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM.

### VIII. CONCLUSIONES

1. El incremento de cobre 3,5% formando solución sólida, incrementa la dureza del material original sin cobre. Endurecimiento por precipitación.
2. La microestructura bainita, estabilizada por el tratamiento de austemperizado aumenta la dureza del material en la medida que se incrementa el tiempo del tratamiento.
3. El incremento de la dureza es un indicador que se incrementa la resistencia al desgaste por abrasión.
4. La probabilidad que el desprendimiento del grafito acelere el proceso abrasivo al dejar expuesto los bordes de la cavidad que ocupaba, generando pérdida de la matriz metálica.
5. Se observa la aparición de glóbulos de cobre precipitados en las condiciones de enfriamiento normal a la temperatura ambiente.

### IX. AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a los profesores del equipo docentes de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la

UNMSM: Ing Víctor Falconi Rosadio, Héctor Luis Villacorta Arévalo, Ing Walter Alex Rengifo Sing, cuya experiencia profesional nos llevó a resultados altamente satisfactorios, y a los estudiantes, al Sr. Oscar Francisco Cardoza Ramos, por el apoyo en el taller de fundición en el moldeo y fundición de probetas; a la Srta. Maribel Choquepuma Lupo, por la preparación, pulido y ataque de las probetas para el ensayo metalográfico; al Sr. Hyeraldo Osmar Acevedo Basualdo, por su apoyo en el taller de fundición en el moldeo y fundición de probetas.

### X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Diagrama tomado de [http://cyberbuzz.gatech.edu/asm\\_tms/phase\\_diagrams/#Fe](http://cyberbuzz.gatech.edu/asm_tms/phase_diagrams/#Fe)
2. Pero-Sanz, J. (1994). Fundiciones férreas. Ed. Dossat, Madrid.
3. ASTM Metal HandBook (1992). Volumen 3 Alloy Phase Diagrams.
4. Svensson, I. L., Millberg, A., Diószegi, A.(2003). A study of eutectic inoculation in grey iron by addition of Fe-Si-Ca-Al-, Sr, Ba, Zr, Ti, RE and C. Journal of Cast Metals Research, Vol. 16, 29-34.