

Bronce al aluminio con plomo, una alternativa de material antifricción

Primera parte: distribución del plomo en los bronce al aluminio

Tito Zegarra Verástegui
Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales
Universidad Mayor de San Andrés
titozegarra@yahoo.com

Resumen

En esta parte del trabajo, se presentan resultados del estudio de la distribución de plomo en bronce al aluminio, los resultados muestran cualitativamente que es posible la introducción y distribución adecuada de cantidades suficientes de plomo dentro la estructura del bronce al aluminio, que permitiría desarrollar en esta aleación, características antifricción.

Se estudia la influencia de la cantidad de plomo, cantidad de aluminio y velocidad de enfriamiento.

Palabras clave: bronce, material antifricción, aleaciones.

Aluminum bronze with lead, an alternative antifriction material

Part I: distribution of lead in aluminum bronzes

Abstract

In this part of the work, results of the study of the distribution of lead in aluminum bronze are presented. The results show qualitatively that the introduction and the adequate distribution of sufficient amounts of lead in the aluminum bronze structure is possible. This would develop antifriction characteristics in this alloy.

The influence of the amount of lead, aluminum amount and rate of cooling are studied in this paper.

Keywords: Bronze, antifriction materials, alloys.

Bronze de alumínio com chumbo, uma alternativa de material antifricção. Parte I: distribuição de chumbo em bronzes ao alumínio

Resumo

Nesta parte do trabalho, são mostrados os resultados do estudo da distribuição de chumbo em bronze ao alumínio, os resultados mostram qualitativamente que é possível uma introdução e uma apropriada distribuição de quantidades suficientes de chumbo na estrutura de bronze ao alumínio, as quais iriam desenvolver características de antifricção nesta liga.

Estuda-se a influência da quantidade de chumbo, a quantidade de alumínio e de velocidade de arrefecimento.

Palavras chave: bronce, antifricção materiais, ligas.

Introducción

Un material o aleación, para ser considerado con características antifricción, debe reunir condiciones tribológicas generales, tales como:

- Conformabilidad; habilidad del material a adaptarse a cargas por deformación elástica o plástica sin que el comportamiento de deslizamiento sea afectado permanentemente.
- Coeficiente de rozamiento en seco reducido.
- Adaptabilidad o asentamiento; habilidad del material de adaptarse fácil y rápidamente al eje o al árbol.
- Buena conductividad térmica; debe transmitir bien el calor producido por rozamiento.
- Mojabilidad; tener la capacidad de ser mojado y mantener con tenacidad la película de lubricante.
- Características de funcionamiento en emergencia (funcionamiento en seco); habilidad del material de asegurar deslizamiento durante un periodo limitado de tiempo, si ocurre un imprevisto corte en la lubricación.
- Características de arranque; habilidad del material de reducir la alta fricción inicial y el alto desgaste inicial en un corto espacio de tiempo, por adaptación a las superficies deslizantes.
- Embebilidad; habilidad del material de absorber o asimilar partículas duras
- Tener suficiente resistencia estática y dinámica.
- No expandirse o hincharse desigualmente.
- Tener resistencia a la corrosión contra ácidos, producto de la descomposición del lubricante.

Diferentes materiales antifricción se han ido incorporando, a lo largo del tiempo, para fabricar cojinetes lisos o de desplazamiento lineal a nivel mundial, cada uno de ellos aportó un nivel superior de rendimiento respecto a los precedentes, en la medida que la investigación y el desarrollo tecnológico lo permitieron.

Una de las aleaciones, que al momento tiene una aplicación marcada a nivel industrial, es la que está compuesta básica y principalmente por Cu-Sn- Pb, conocido como bronce al estaño con plomo, el que es considerado como un típico material antifricción.

Para entender el aporte del plomo en este material, en primera instancia se debe conocer el comportamiento del plomo en presencia de cobre. En la figura 1, se muestra el diagrama de equilibrio cobre - plomo.

Observando el diagrama se evidencia que el plomo no forma solución sólida con el cobre en todo el rango de composiciones. Entonces los bronce al estaño plomo, no son otra cosa que bronce al estaño al cual se le añade plomo, elemento que

durante la solidificación se separa de la estructura del bronce, formando nódulos de plomo.

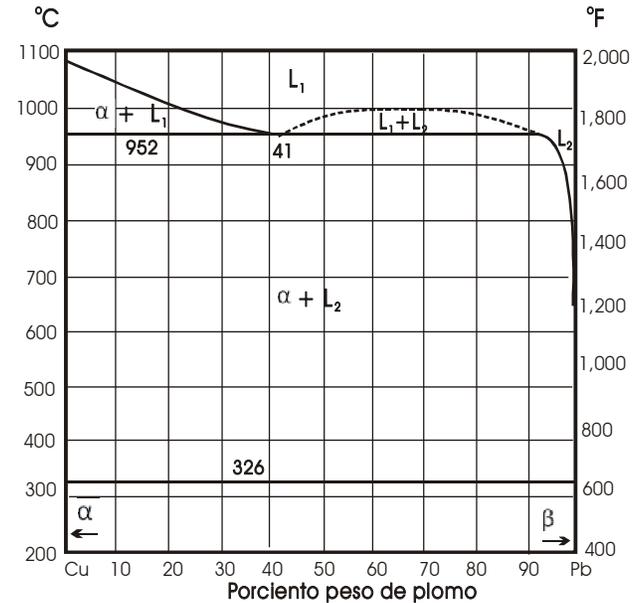


Figura 1. Diagrama de equilibrio Cu – Pb

La presencia del plomo tiene particular importancia en el desarrollo de las características antifricción del bronce, debido a que tiene una excelente capacidad embebedora; o sea, encerrar o enclavar dentro de sí las partículas extrañas y/o partículas (virutas) que se producen en caso de que el cojinete trabaje donde existen frecuentes arranques y paradas. Además por su bajo punto de fusión, tiene la ventaja de que en caso de calentarse el cojinete por una elevada fricción no haya desgaste, sino que este elemento se funde y actúe como lubricante entre el eje y el cojinete. Por otro lado, el plomo mejora la conformabilidad del cojinete, o sea su capacidad para la deformación plástica y compensar las irregularidades en el cojinete.

Para que el bronce al estaño con plomo cumpla efectivamente su función antifricción, debe tener el plomo uniformemente distribuido en forma de partículas pequeñas, y esta condición se constituye en una importante dificultad para colar esta aleación.

En resumen, el bronce al estaño con plomo es un material antifricción adecuado para aplicaciones industriales. Sin embargo, esta aleación presenta inconvenientes técnicos y económicos como son, la dificultad de distribuir adecuadamente el plomo en la estructura, la imposibilidad de obtener piezas exentas de micro-rechupes y el precio del estaño. Adicionalmente se debe indicar una limitada libertad para variar la dureza de la aleación con el contenido de estaño, siendo esta propiedad, fundamental para la resistencia al desgaste.

Aleación Cu-Al-Pb como alternativa de material antifricción

La idea de introducir plomo a los bronce al aluminio, para conferirle propiedades antifricción, se basa en el hecho de que con las aleaciones Cu-Al, se pueden obtener “mejores combinaciones” de fases blandas y duras, que las obtenidas con las aleaciones Cu-Sn, por lo que se pueden esperar mejores comportamientos frente al desgaste. Sin embargo, para conferirles propiedades antifricción es necesario la introducción de cantidades importantes de plomo. Esto se evidencia observando la tabla 1, que presenta la funcionalidad de las fases presentes en el bronce al estaño plomo y el bronce al aluminio.

Tabla 1. Funcionalidad de las fases, entre bronce al estaño con plomo y bronce al aluminio.

Requerimiento para desarrollar características antifricción	Fase funcional Cu-Sn-Pb	Fase funcional Cu-Al
Conformabilidad	Fase α y plomo	Fase α
Coefficiente de rozamiento en seco reducido	Plomo	-----
Adaptabilidad o asentamiento	Fase α y plomo	Fase α
Buena conductividad térmica	Cobre	Cobre
Mojabilidad	Fase α	Fase α
Funcionamiento en seco	Plomo	---
Características de arranque	Plomo	---
Embebilidad	Plomo	---
Tener suficiente resistencia estática y dinámica	Fase δ	Fase γ_2
No expandirse o hincharse desigualmente	Fase δ	Fase γ_2
Tener resistencia a la corrosión	Cobre	Cobre y aluminio

Como se puede observar, con la adición de plomo al bronce al aluminio es posible desarrollar, en esta aleación, las características adicionales para que el material pueda considerarse antifricción.

Distribución del plomo en las aleaciones Cu-Al

Un primer análisis de la solidificación de estas aleaciones, señala que debía ser más fácil distribuir adecuadamente el plomo en esta aleación, debido principalmente a su intervalo de solidificación. Para comprender lo mencionado recurriremos a un análisis simple de lo que sucede con la distribución de plomo en las aleaciones Cu-Sn, que es bastante conocido, para luego intentar una hipótesis respecto a la distribución de plomo en las aleaciones Cu-Al.

Al ser el bronce al estaño una aleación que tiene un intervalo de solidificación grande, que oscila entre 150 y 200 °C, tiene un proceso de solidificación equiaxial dendrítico.

Una representación esquemática se presenta en la figura 2.

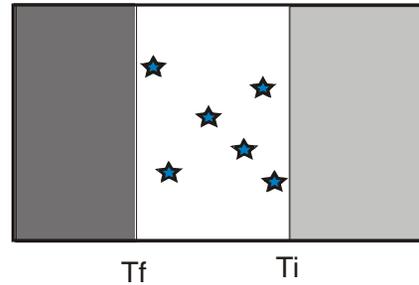


Figura 2. Esquematación de la solidificación equiaxial dendrítico, cuando el intervalo es “largo”.

Como las temperaturas de inicio y fin de la solidificación (T_i y T_f) son muy diferentes, la interfase tiene un “gran” espesor, por lo que el crecimiento del sólido es dendrítico, es decir que los primeros sólidos aparecen simultáneamente en varios puntos, para luego crecer hasta chocar con otro sólido, formando de esta manera una estructura equiaxial dendrítica, como se observa en la figura 3.

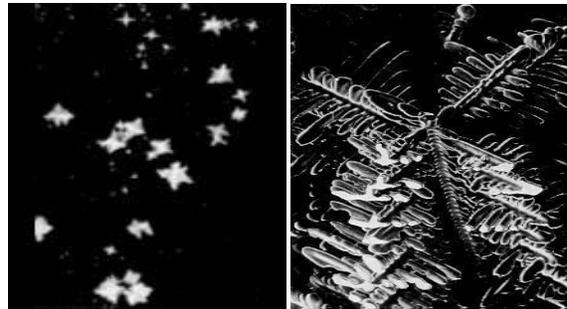


Figura 3. Estructura equiaxial dendrítica.

En el proceso de solidificación, al precipitar los primeros sólidos, se desprende plomo que se adiciona al líquido remanente, de tal manera que, a medida que pasa el tiempo, el líquido remanente tiene cada vez una composición en plomo mayor lo que genera un incremento en su densidad. Este fenómeno ocasiona la flotación de las partículas sólidas debido a que las mismas tienen menor densidad que el líquido. En la figura 4, se presenta una esquematización de lo que nombraremos para fines del presente trabajo “segregación mayor”.



Figura 4. Esquematación de la “segregación mayor”.

La separación de las fases, producida por la diferencia de densidades, requiere de tiempo y caminos que permitan el movimiento del plomo. En estas condiciones el plomo no aportaría en nada a las características de antifricción del bronce. Una micrografía que evidencia este fenómeno es presentado en la figura 5.

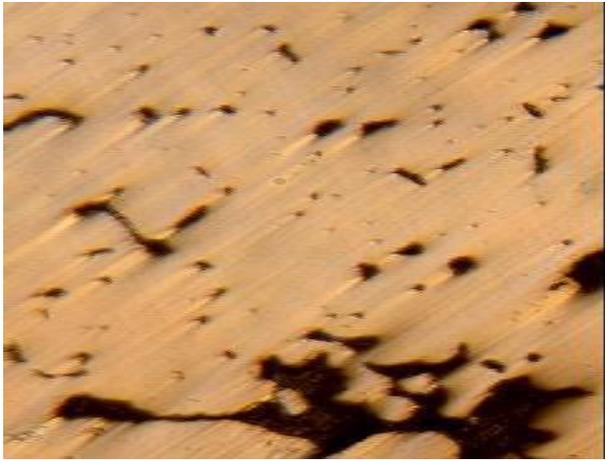


Figura 5. Micrografía de la segregación del Pb en el bronce al estaño. (Fotomicrografía obtenida en el IIMETMAT para un bronce con 7% Sn y 15% Pb).

La interrogante que debe responderse es ¿cómo se puede distribuir el plomo en los bronce al aluminio?. Para responder esta interrogante se debe analizar el diagrama Cu-Al, y evidenciar las diferencias con las aleaciones Cu-Sn, ambos diagramas se presentan en la figura 6. En estas diferencias se tendrá que encontrar las explicaciones que conduzcan al planteo de una hipótesis.

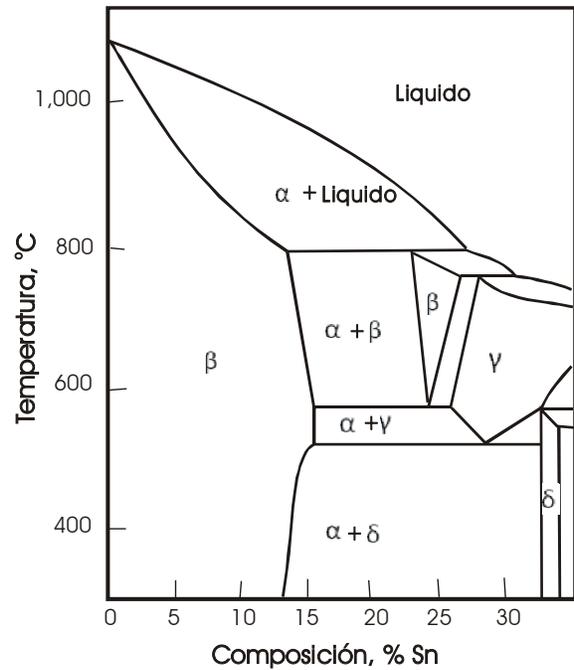
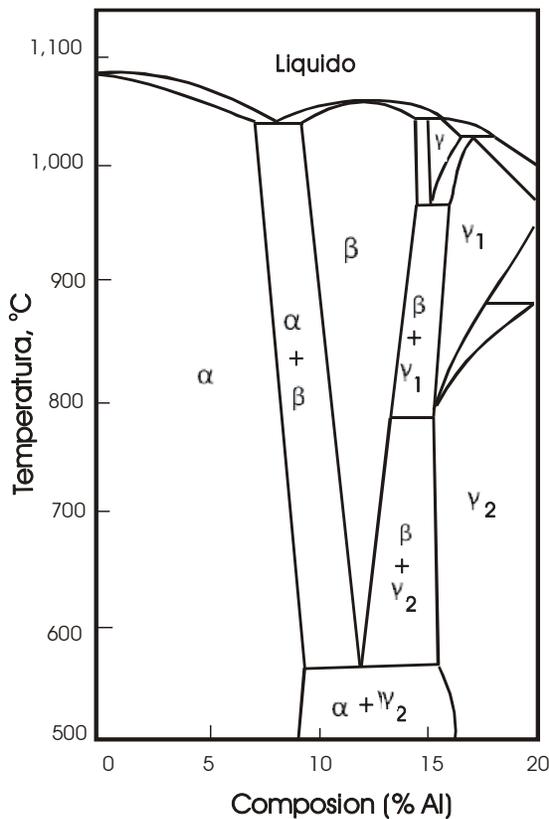


Figura 6. Diagramas de equilibrio Cu-Al y Cu-Sn.

La primera diferencia marcada se encuentra en el intervalo de solidificación que, para el caso de los bronce al aluminio, es próximo a 10 °C, y para el caso del bronce al estaño oscila entre 150-200 °C.

La primera repercusión de esta diferencia es la forma de solidificación. Para el caso del bronce al aluminio, debería ser como se describe seguidamente.

Cuando el intervalo de solidificación es pequeño, la diferencia de temperaturas de inicio y fin de la solidificación es pequeño y por lo tanto, el espesor de la interfase sólido-líquido es también pequeño, como se muestra en la figura 7.

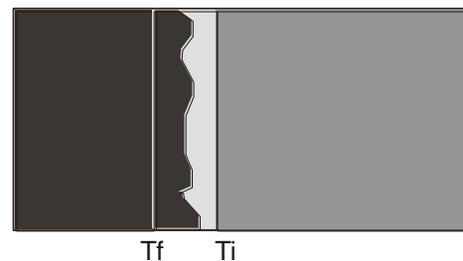


Figura 7. Esquematación de la interfase sólido-líquido de una aleación con intervalo de solidificación "corto".

En esas condiciones el crecimiento del sólido se produce a partir de la pared del molde y avanza hacia el centro, depositando una capa de sólido sobre otra capa de sólido. Este tipo de crecimiento puede considerarse como planar. Una representación de este crecimiento se muestra en la figura 8.

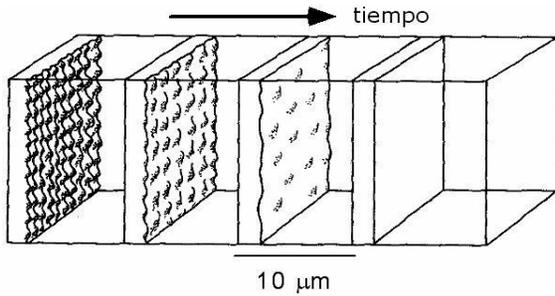


Figura 8. Esquemática de la solidificación planar

Entonces el proceso de solidificación debe ser el siguiente:

- Al momento de aparecer los primeros sólidos (generalmente en las paredes), éstos expulsarán al plomo que tenía disuelto en estado líquido. Este plomo segregado pasará al líquido remanente en las inmediaciones del sólido como se esquematiza en la figura 9, incrementando su densidad.

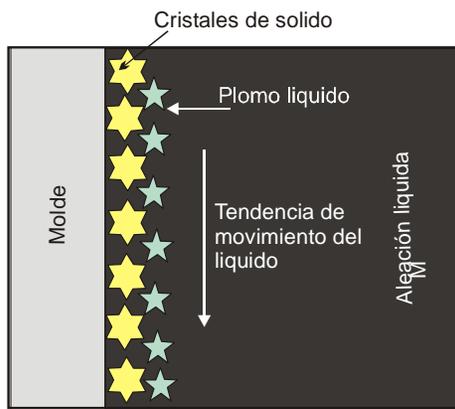


Figura 9. Esquemática de la segregación de plomo del primer sólido.

- El plomo segregado, por su mayor densidad, tenderá a moverse hacia el fondo. Sin embargo por el avance de la solidificación, “rápidamente” se formará otra capa de sólido que atraparé al plomo segregado del primer sólido, como se muestra en la figura 10.



Figura 10. Esquemática del encapsulamiento de plomo.

- En esas condiciones el plomo separado de la aleación, que se

encuentra en estado líquido, queda encapsulado sin posible movimiento.

- Entonces la estructura que se debe esperar, especialmente con velocidades de enfriamiento altas, es la mostrada en la figura 11.

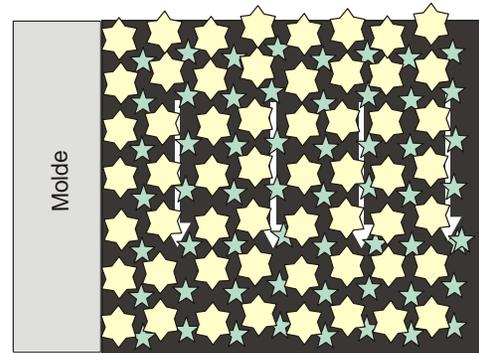


Figura 11. Esquemática de la estructura final del bronce al aluminio con plomo.

Este tipo de estructura es completamente diferente a la que puede aparecer en los bronce al estaño con plomo, y se constituye en la base para sostener que la distribución adecuada de plomo, para desarrollar características antifricción, es más fácil de obtener en los bronce al aluminio que en los bronce al estaño.

Adicionalmente, los bronce al aluminio tienen otras ventajas frente a los bronce al estaño, cuando se piensa en piezas que tengan propiedades antifricción, como ser:

- Los bronce al aluminio tienen un menor costo, debido a la diferencia de los precios del estaño frente al aluminio.
- La posibilidad de obtener piezas completamente macizas es mayor en el caso del bronce al aluminio.
- Con los bronce al aluminio es posible obtener una mayor gama de combinaciones de fase dura y blanda. Con ello se pueden obtener bronce que tienen una mayor dureza, lo que aportaría a un mejor comportamiento frente al fenómeno de desgaste.

Por todo lo mencionado, se puede indicar que las aleaciones Cu-Al-Pb, pueden constituirse en una alternativa de material antifricción con ventajas tanto técnicas como económicas. Para ello es necesario introducir y distribuir adecuadamente el plomo en la estructura del bronce al aluminio.

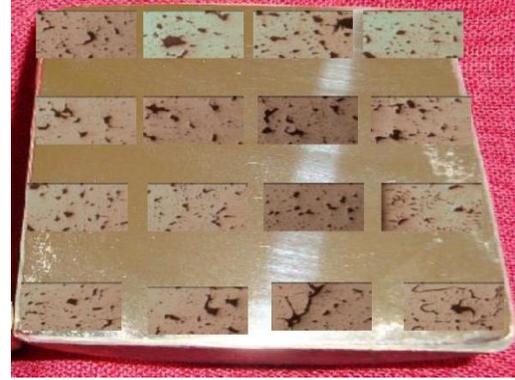
Desarrollo experimental en laboratorio

Variables de estudio

- Contenido de plomo
- Contenido de aluminio
- Velocidad de enfriamiento

Preparación de probetas

Para no tener la influencia de variables de entorno, las probetas se prepararon simultáneamente en moldes cuyo esquema se presenta en la figura 12.



Aleación con 8% Al, 15% Pb.



Aleación con 10% Al y 10% Pb.



Aleación con 10% Al y 15% Pb

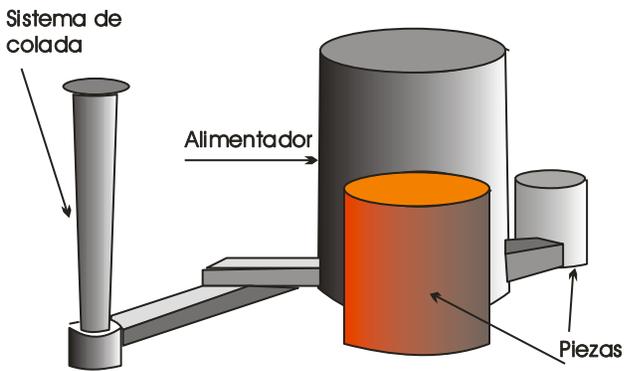


Figura 12. Esquematización de la preparación de probetas.

Resultados obtenidos

Influencia de la cantidad de plomo y aluminio

Seguidamente se presentan las micrografías obtenidas en 16 puntos de probetas de 2" vaciadas en arena, para distintas cantidades de aluminio y plomo.



Aleación con 8% Al, 10% Pb.

Se puede evidenciar que en ninguno de los casos existe una "segregación mayor" lo que confirma la posibilidad de lograr una distribución adecuada del plomo en el bronce al aluminio.

Se puede notar también que la cantidad de plomo y aluminio en la aleación influyen en la distribución y tamaño de nódulos de plomo. A mayor cantidad de plomo se tienen nódulos de mayor tamaño y sucede lo mismo cuanto la cantidad de aluminio se incrementa.

La influencia de la cantidad de plomo es lógica y en consecuencia no requiere de mayor comentario. La influencia de la incidencia de la cantidad de aluminio, se puede explicar con ayuda de la figura 13, que representa el sub-enfriamiento constitucional en las cercanías de la interfase sólido-líquido y la incidencia de la velocidad de enfriamiento.

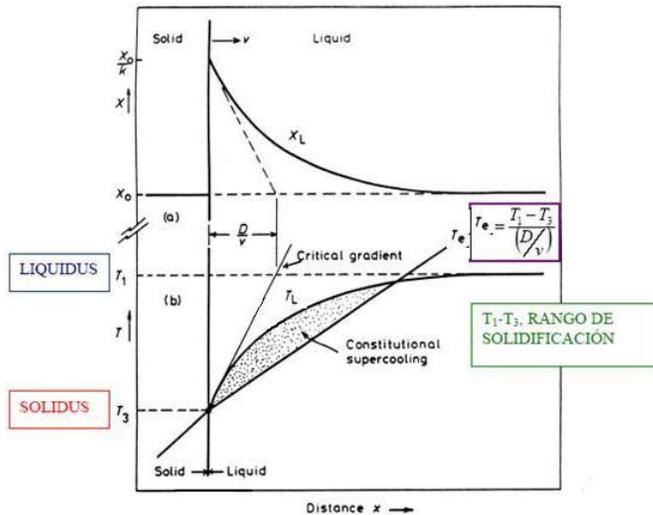


Figura 13. Sub-enfriamiento constitucional.

Como se puede observar, salvo en el punto coincidente de la interfase sólido - líquido, la temperatura de la curva de enfriamiento real T_e , no coincide con la de la curva de enfriamiento constitucional T_L .

También se puede observar que existe un gradiente crítico (que se relaciona con una velocidad de enfriamiento crítico) con la que se puede evitar el efecto del sub enfriamiento constitucional.

Si el gradiente de temperatura T_e , está por debajo de la gradiente crítica, entonces existirán zonas en las cuales el líquido se encuentre a una temperatura inferior de la necesaria para la solidificación, es decir estará sub-enfriada y en consecuencia se producirá la solidificación, obteniendo de esta manera un crecimiento del sólido dendrítico.

En condiciones de crecimiento en estado estacionario, el gradiente crítico se puede escribir cómo $T_e = \frac{T_1 - T_3}{\frac{D}{R}}$ y por lo tanto la condición para que se produzca un frentepiano estable, es decir que no aparezcan dendritas, se dará cuando:

$$T_e > \frac{T_1 - T_3}{\frac{D}{R}}$$

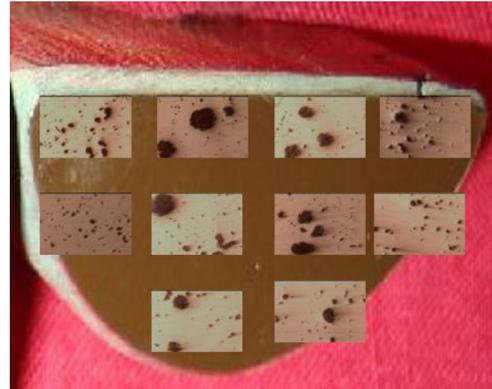
Como $(T_1 - T_3)$ representa el rango de solidificación en equilibrio, entonces cuanto mayor sea este rango es más difícil mantener las condiciones para que el frente de solidificación sea plano a lo largo del proceso de solidificación, por el contrario cuanto menor sea ese rango, las condiciones para que se produzca una solidificación planar son más adecuadas.

Entonces el haber obtenido nódulos de mayor tamaño en las

muestras con mayor contenido de aluminio, tiene su explicación en este fenómeno, debido a que el rango de solidificación también es levemente mayor.

Influencia de la velocidad de enfriamiento

Los resultados se los presenta con las microestructuras obtenidas en probetas coladas con aleación de 10% de aluminio y 10% de plomo, que tienen diferentes velocidades de enfriamiento



Probeta, de 2" colada en arena.



Probeta de 1" colada en arena.



Probeta de 1" colada en matriz metálica.

Como se puede observar, cuanto mayor sea la velocidad de enfriamiento la solidificación tiende a ser planar, y en consecuencia, tiende a impedir que el plomo desplazado durante la solidificación forme nódulos “grandes”.

Conclusiones

Antes de presentar las conclusiones, se debe hacer notar que este trabajo debe considerarse como inicial y de tipo cualitativo, debido a que se trata de un nuevo material del que no se tienen referencias. Con esa aclaración, se puede concluir en lo siguiente:

- Es posible la distribución adecuada de plomo en los bronce al aluminio, para su uso como material antifricción.
- El contenido de aluminio influye en la distribución del plomo.
- La velocidad de enfriamiento, al igual que en los bronce al Sn – Pb, influye significativamente, en la distribución del plomo.
- La cantidad de plomo también tiene una influencia en la distribución del plomo.

Agradecimientos

El autor desea hacer llegar sus agradecimientos al IIMETMAT de la UMSA, por su cooperación fundamental para el desarrollo y el

financiamiento del trabajo. De igual manera a la Empresa SIIF por su apoyo en la obtención de probetas.

Bibliografía

- 1) QUINTERO SAYAGO, Omar. *Solidificación*. Venezuela: Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2003.
- 2) LINARES O., Omar. *Tribología y Mantenimiento Proactivo*. Widman, International S.R.L., Santa Cruz, Bolivia.
- 3) PERO – SANZ ELORZ. *Materiales Metálicos*. Editorial Dossat S.A. 1988.
- 4) BALANZA, Rodny; VELÁSQUEZ, Jorge; LORA, Samuel. *Aplicación de las Aleaciones ZA como Materiales Alternativos para Cojinetes de Deslizamiento. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales*. La Paz – Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés, 2003-
- 5) ZEGARRA, Tito. *¿Por qué seleccionar los bronce para su aplicación industrial? Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales*. La Paz Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés, 2005.
- 6) www.fag.com