

Refinación microestructural de C-11000 para mejorar sus propiedades mecánicas

Gerardo Rendón Gutiérrez *

Resumen

Este trabajo analizó el comportamiento de la microestructura de soleras de cobre con variación en componentes químicos que se presentan en la materia prima utilizada —que usualmente se denominan impurezas del metal—, en diferentes corridas de producción de lingotes de cobre aleación C-11000. Se determinaron los valores que ayudan a conformar mejor la estructura del cobre y se evaluaron resultados después de los procesos de extrusión en caliente y estirado en frío; se analizó el tamaño de grano generado en cada pieza y se determinaron los rangos de manejo de los componentes que ayudan a refinar el grano, permiten que sea homogéneo y que, al ser fabricado como solera de cobre, cumpla con las propiedades físicas y mecánicas que el producto requiere.

Las propiedades mecánicas relevantes en las soleras de cobre para uso eléctrico se orientan a tener dobleces libres de rugosidad y fracturas potenciales, así como asegurar una superficie lisa y sin deformaciones.

Se analizó el impacto de dos componentes químicos (hierro y oxígeno) que, bajo contenidos controlados, ayudan a conformar mejor la estructura granular de las soleras.

Palabras clave: Cobre, microestructura, refinación de grano, contenidos de oxígeno, nivel de hierro, procesos de doblez, extrusión y estirado en frío.

*Estudiante de posgrado CIATEQ, A.C. en convenio con la empresa Industrias Unidas S.A. de C.V.

Fecha de recepción:
28 de junio de 2018

Fecha de aceptación:
29 de octubre de 2018

Abstract

The behavior of bus-bar grain size is analyzed related to different chemical components, commonly called impurities, that were added in the melting process to produce copper billets of alloy C-11000, those components were used in controlled amounts in the mix and formed the metal structure, the reaction in the metal's structure after the extrusion and drawing process, the microstructure improve substantially and the appearance in the bending process obtain a better and smooth surface of the product processed and meet with the properties required by norms for electrical use, free of rugosity and potential fractures.

The use of controlled levels of iron and oxygen in the melting process were tested to evaluate the impact of bus bar's grain size.

Keywords: Copper, microstructure, grain refining, oxygen content, iron level, bending process, extrusion and cold drawing processes

I. Introducción

“El cobre es un metal no ferroso caracterizado por su excelente conductividad eléctrica y buena resistencia a la corrosión”. Se puede fabricar de distintas formas y su resistencia mecánica a la fatiga es ideal en muchas aplicaciones, tales como elaboración de alambres, cables eléctricos, barras, soleras, perfiles especiales y otros artículos empleados en sistemas de transmisión, distribución y conducción de electricidad a través de estos [1].

Es un metal duradero, con alto nivel de reciclaje a través de procesos de fusión, se reintegran sus propiedades físico-mecánicas, las cuales se determinan para cada tipo de producto.

En este trabajo, se analizó el comportamiento del producto ya procesado como solera de cobre de uso eléctrico, con rangos variables de contenidos de oxígeno y hierro. Se evaluó microscópicamente la conformación de los tamaños de grano, sin dejar de lado la temperatura empleada para los procesos de fusión del producto primario y su posterior evaluación, mediante la extrusión en caliente y la conformación final del producto a través de

procesos de estirado en frío y los niveles de aceptación en función de las propiedades.

La conformación de la microestructura del grano, desde el primer proceso de fusión para el proceso de formado de lingotes, trae consigo primordialmente un 99.9% de contenidos de cobre; en el resto de la composición se manejan proporciones menores de impurezas y no todas son perjudiciales, debido a que proporcionan diferente comportamiento en las propiedades mecánicas del material fabricado. Tal es el caso de elementos químicos como zinc (Zn), silicio (Si), hierro (Fe), níquel (Ni), fósforo (P), estaño (Sn), entre otros, además de la influencia de contenidos de oxígeno (O), nitrógeno (N) e hidrógeno (H).

II. Marco teórico

El cobre comercialmente puro se representa por números UNS C10100 a C13000. Los diversos tipos dentro de este grupo tienen diferentes grados de pureza y diferentes características. La aleación designada como C11000 es la más común de todas las llamadas “cobre eléctrico”; tiene un contenido de oxígeno de 0.0005 a 0.0400% (5 a 400 ppm) [1].

En procesos de extrusión, donde la fabricación del lingote requiere bajo costo y no se cuenta con cobre electrolítico o sistema de colado *up-cast* bajo oxígeno, es necesario determinar otros componentes que usualmente vienen como impurezas en materiales reciclados, los cuales permitan a los fabricantes —por medio de procesos metalúrgicos tradicionales— generar conformaciones de grano con tamaño reducido que aseguren la maleabilidad y calidad en procesos de doblado, sin presentar deformaciones, agrietamientos y pérdida de sus propiedades físico-mecánicas, así como una reducción en la conductividad especificada.

Un elemento químico que usualmente viene en los reciclados de cobre en bajo contenido como impureza del metal es el hierro, el cual se forma como resultado de procesos metalúrgicos en los que hubo reacciones de compuestos aleantes, procesos de oxidación de materiales o elementos residuales generados por el mismo proceso de fusión.

Si el hierro se emplea en la fusión del cobre y se utiliza con baja concentración y controlado, permitirá que la conductividad no disminuya y que, en la microestructura de la aleación, el tamaño de grano no crezca, lo que permitirá obtener, en la extrusión de soleras y su estirado en frío, una conformación granular uniforme.

El hierro, por ser un metal de transición, tiene la propiedad de electronegatividad, con la capacidad de atraer electrones hacia su órbita y crear enlaces covalentes que permitan alcanzar una estructura estable de los cristales [3].

Este trabajo es un conjunto de ensayos y muestreo de materiales con variación en los contenidos de hierro y oxígeno (atrapado estructuralmente), en el que se demuestra el manejo controlado de estos elementos; además, ayuda a que tengamos tamaño de grano reducido y, en esta aplicación, deja de ser impureza para ser catalogado como elemento refinador del grano o nucleante.

El refinador de grano, en diversas aleaciones, proporciona un diámetro de grano menor, ya que se reducen las fracturas en la micro-estructura de las barras y soleras, lo cual proporciona una estructura más homogénea, así como buenas propiedades físico-mecánicas [1].

Al momento de hablar de una refinación de grano a través de procesos de enfriamiento en la fabricación de aleaciones no-ferrosas (Cu, Al, Zn, etc.) donde se producen lingotes cilíndricos; en cuerpos con esta forma, el proceso de solidificación inicialmente se expresará en la transferencia de temperatura; el gradiente o la rapidez de esta transferencia ocurre desde las paredes externas hacia el centro del lingote y se establece en función del volumen y del tiempo de enfriamiento.[2].

Posteriormente, en el proceso de extrusión en caliente de la solera eléctrica, la conformación microestructural adquiere un tamaño de grano en función de la temperatura y el tiempo de enfriamiento del producto. La microestructura, en esta etapa, tiene tamaño de grano “x”; al ser sometido a un segundo proceso de deformación en frío, es importante que ese tamaño de grano no sufra alteraciones significativas y que, como

propiedad adicional, adquiera un nivel de dureza generado por la reducción de dimensiones a la cual fue sometido para obtener su dimensión final, especificada como producto terminado. Si no se tiene una forma de refinar o mantener granos uniformes, este producto presentará defectos potenciales en su microestructura, lo cual añadirá dislocaciones o pérdida de unión entre capas del material, vacancias o rompimiento de las uniones entre los átomos que conforman la estructura y átomos intersticiales que se alojan entre los átomos de la estructura; eso, a su vez, favorecerá la conservación de energía, la cual, al momento de la deformación en frío, será liberada y generará calor interno en la estructura, que será capaz de reacomodar la red cristalina [3].

Existen otros procesos para liberar estos defectos en la red o microestructura, como el recocido a cierta temperatura y en tiempo controlado, lo cual genera un relevado de esfuerzos internos de las soleras que permitirá la reconfiguración del tamaño de grano, así como que las aplicaciones posteriores den el resultado de manera uniforme.

En el proceso metalúrgico, al agregar refinadores de grano, se reducen considerablemente las dislocaciones posibles y se consigue bajar la resistencia del material; así, aumenta la ductilidad y esto ayuda a reducir el llamado fenómeno “piel de naranja” que ocasiona en la solera ranuras, rugosidad, áreas con agrietamiento y huecos irregulares que pueden derivar en un reventamiento o provocar fisuras en los dobleces.

El presente estudio considera los aspectos anteriormente mencionados para observar el comportamiento de la microestructura; para ello, se consideran diferentes porcentajes de contenido de fierro (refinador de grano presente en la aleación) y la presencia de oxígeno en las soleras.

Posterior a este desarrollo, la información obtenida permitirá establecer valores o parámetros de trabajo a los procesos de fusión que aseguren la calidad del producto y sus propiedades físico-mecánicas.

III. Desarrollo experimental

El trabajo realizado parte de los principios del Método de Montecarlo, el cual, a base de muestreos con parámetros predefinidos de contenidos de fierro y oxígeno, genera un comportamiento diferente en la estructura del material y los valores de tamaño de grano, de manera que ayudan a asegurar resultados favorables en las pruebas de doblez y conductividad.

Con base en estas pruebas estadísticas, se usaron experimentalmente 5 vaciadas de prueba y se muestrearon 2 lingotes para cada una.

Vaciada	# Lingote	% Fe	% O
A	1	0.0010	0.0175
	2	0.0010	0.0247
B	3	0.0005	0.0558
	4	0.0005	0.0522
C	5	0.0005	0.0086
	6	0.0005	0.0134
D	7	0.0058	0.0136
	8	0.0058	0.0101
E	9	0.0030	0.0135
	10	0.0030	0.0163

Tabla 1. Contenido de vaciadas de prueba

Para la elaboración de las soleras de prueba, se tomaron como medidas a estudiar las que se presentan en la tabla 2.

Vaciada	Medida de solera
A	1/4" x 4" CV
B	3/8" x 6" CV
C	1/4" x 3" CR / 1/4" x 4" CR
D	1/4" x 4" CR
E	1/4" x 4" CR / 1/4" x 5" CV

Tabla 2. Medida de solera de cada vaciada

Las temperaturas utilizadas en el proceso de extrusión se muestran en la tabla 3.

Vaciada	Muestra	Temperatura de extrusión (°C)
A	1	936
	2	934
B	3	953
	4	941
C	5	951
	6	937
D	7	952
	8	953
E	9	948
	10	932

Tabla 3. Temperaturas en cada una de las muestras de las distintas vaciadas

Los lingotes se calientan por inducción en un horno eléctrico y, al alcanzar la temperatura prefijada, salen del horno y esperan un lapso de tiempo corto. Posteriormente, son transportados, mediante un mecanismo hidráulico, al brazo portador de lingotes que se alinea con el contenedor de la prensa; después, con un pistón, se introducen dentro de este para realizar el proceso de extrusión. El metal es presionado con el ram dentro del contenedor y el material sale del extremo opuesto, el cual tiene un dado con la forma y las dimensiones de la solera requerida.

Al salir la solera, pasa a través de una cámara de vacío para evitar oxidación y entra a una tina colocada en línea que contiene líquido refrigerante, para el proceso de enfriamiento.

La tina está conformada por tres zonas de enfriamiento, que se presentan esquemáticamente en la figura 1.

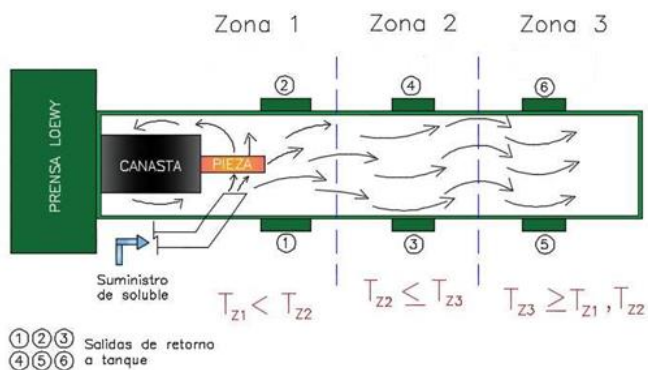


Figura 1. Esquema de tina de enfriamiento.

Para el muestreo, se considera evaluar el resultado con dos valores de temperatura (alta y baja), como se muestra en la tabla 4, y determinar la conformación de la microestructura bajo estos parámetros de temperatura.

Vaciada	Muestra	Temperatura de enfriamiento (°C)
A	1	14
	2	30
B	3	17
	4	31
C	5	15
	6	27
D	7	5
	8	28
E	9	10
	10	31

Tabla 4. Temperaturas de enfriamiento de las vaciadas de prueba

Al extraer la solera de la tina de enfriamiento, se hace una punta para ayudar a que pase por el dado y sea estirada (deformación en frío). Posteriormente, las piezas se llevan al proceso de tensionado, en donde cada una es sujeta de los extremos (mordaza y cola) para después ser sometida a una presión de elongación y darle total rectitud. Después de este proceso de deformación, la pieza es cortada en su longitud final.

De cada una de las piezas finales se cortó un tramo de 60 cm de longitud con el que se realizaron pruebas de doblez para revisar la piel de naranja, así como otro tramo de 7 cm de longitud para realizar las pruebas metalográficas. Este proceso se realizó para cada una de las muestras (ver figura 2).



Figura 2. Ejemplo de muestras para pruebas metalográficas.

Las muestras se enviaron, para su análisis, al laboratorio físico, en donde son pulidas, hasta dejarlas en acabado espejo para su análisis.

Después de desbastar las piezas, se atacaron químicamente con ácido nítrico (HNO₃), a fin de revelar la microestructura: fueron sumergidas en la solución por un tiempo de 10-15 segundos y, posteriormente, se analizaron en el microscopio óptico para la determinación del tamaño de grano, con base en lo especificado por la norma ASTM E112-10

Los equipos empleados para la determinación del tamaño de grano fueron:

Para identificar en tamaño de grano promedio se empleo un Microscopio Invertido marca Carl Zeiss GmbH Mod. Axio Vert. A1, que consta de lentes 5X, 10X y 20X (50, 100 y 200 aumentos respectivamente), generando el tamaño de grano en sus 3 modalidades, automático por intersección, comparación. Con este equipo se realizó el muestreo a 100 aumentos para evaluar las muestras.

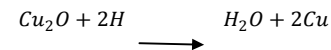
Con el tamaño de grano promedio, se obtuvo la medida promedio en mm. de la Tabla 2 Microscopically Determined Grain Size using Plate III at various magnifications, y la Tabla 4 - Grain Size Relationships computed for Uniform, Randomly Oriented de la Norma ASTM E112-10 y posteriormente también se hizo comparación y fotografía mediante el Microscopio Olympus BH2-UMA, este con 75 aumentos para dar equivalencia en los muestreos y valoración de ambos equipos.

IV. Resultados y análisis

Los resultados obtenidos de las pruebas, en cada una de las soleras extruidas por cada lingote, con distintos contenidos de fierro, respectivamente (0.0010, 0.0005, 0.0005, 0.0058 y 0.0030), así como con variación en ppm de oxígeno, al ser sometidas a diferentes temperaturas arrojan datos muy específicos de cada una, debido a que el comportamiento del metal es muy distinto tanto en las pruebas mecánicas como en la microestructura.

Los lingotes extruidos, ya procesados como solera, disminuyen su contenido de oxígeno debido a la

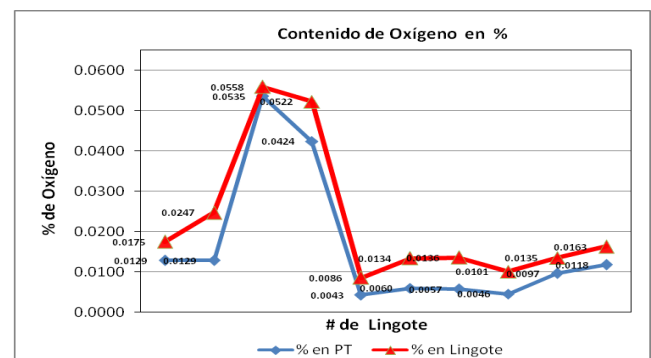
presión ejercida en el lingote, además del efecto de la reacción química entre el óxido de cobre (presente en el lingote) y el hidrógeno (disuelto en el lubricante que se emplea en los dados de extrusión a través del que pasa el metal); al estar expuestos a temperaturas de 927 a 954 °C, originan una formación de partículas de agua que se evapora y disipa en el medio como se muestra en la siguiente reacción:



Otra parte del contenido de oxígeno se pierde y queda atrapado (en forma de burbujas de aire, denominadas *porosidades internas*) en la camisa y el remanente del lingote durante la extrusión; el producto en el proceso de extrusión, a la salida del contenedor, no queda expuesto al aire, sino que entra en una cámara inerte libre de oxígeno y de inmediato pasa al proceso de enfriamiento, con lo cual reduce porosidades y oxidantes.

CONTENIDO DE OXÍGENO			
Vaciada	Lingote	% en Lingote	% en PT
A	1	0.0175	0.0129
	2	0.0247	0.0129
B	3	0.0558	0.0535
	4	0.0522	0.0424
C	5	0.0086	0.0043
	6	0.0134	0.0060
D	7	0.0136	0.0057
	8	0.0101	0.0046
E	9	0.0135	0.0097
	10	0.0163	0.0118

Tabla 5. Contenidos de oxígeno del producto terminado



Gráfica 1

En la gráfica 1, se observa la disminución de los porcentajes de oxígeno en las pruebas realizadas en cada una de las vaciadas, con lo cual se corrobora

una pérdida de este elemento durante el proceso de fabricación.

En cuanto al análisis a nivel microestructural, los resultados se observan en la figura 3. Del primer par de muestras de la vaciada “A” con 0.0010% Fe, se obtuvieron tres imágenes: orilla1, centro y orilla2. El tamaño de grano se presenta más homogéneo con la temperatura menor, a diferencia de la figura 4, donde se observa que, con un enfriamiento de temperatura mayor en la tina, tenemos un mayor tamaño de grano y se aprecian porosidades en la orilla de la muestra.

Para el segundo par de muestras de la vaciada “B” con 0.0005% Fe, en condiciones similares de enfriamiento, el tamaño de grano presente en toda el área analizada de la figura 5 es demasiado uniforme en el centro de la pieza y difiere con el mostrado en la figura 6, que es aún más heterogéneo. Además, se observan granos grandes en orillas y al centro.

Estudiando minuciosamente el tercer par de muestras de la vaciada “C”, se observa que el grano se incrementó de manera considerable en la figura 7, en comparación con los anteriores análisis. Estos son granos bimodales —es decir, granos de tamaño grande y pocos granos pequeños en medio de estos—, pero existe diferencia con los mostrados en la figura 8. El crecimiento de estos granos es demasiado acelerado y aquí es casi nula la presencia de granos pequeños, lo cual da la apariencia de una microestructura desordenada o heterogénea, además de la presencia de porosidades en la parte central y a orillas de la pieza. Para este análisis, la temperatura está estrictamente relacionada con el aumento exagerado del tamaño de grano.

El análisis del cuarto par de muestras (vaciada “D”) se observa en la figura 9: los granos están más equiaxiales, homogéneos y constantes, y el tamaño es relativamente más pequeño.

Si valoramos este grano, en comparación con la figura 10, vemos que presenta un ligero aumento del tamaño en la parte central de la pieza; esto se debe a un aumento de temperatura, pero no tiene afectación alguna sobre la estructura granular.

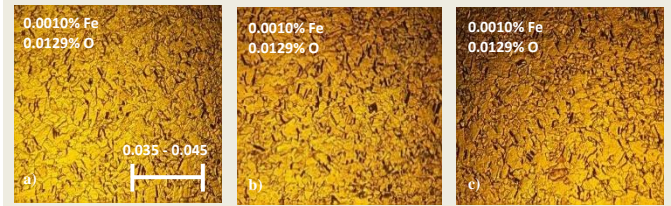


Figura 3. Microestructura a 14°C (temperatura de enfriamiento).

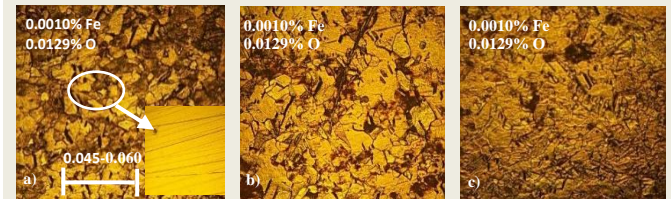


Figura 4. Microestructura a 30°C (temperatura de enfriamiento).

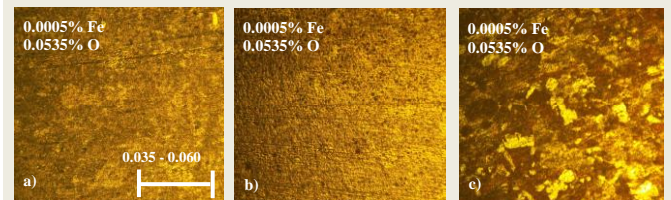


Figura 5. Microestructura a 17°C (temperatura de enfriamiento).

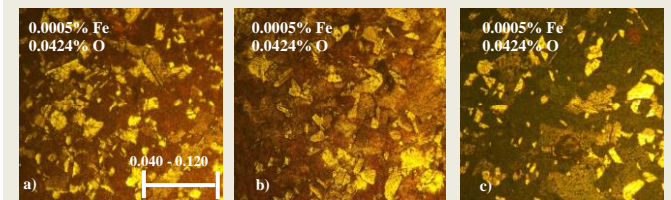


Figura 6. Microestructura a 31°C (temperatura de enfriamiento).

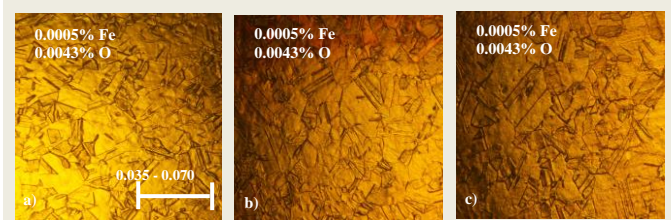


Figura 7. Microestructura a 15°C temperatura de enfriamiento.

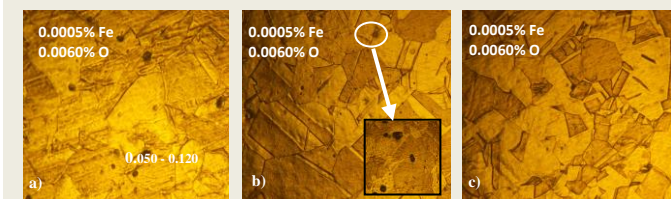


Figura 8. Microestructura a 27°C temperatura de enfriamiento.

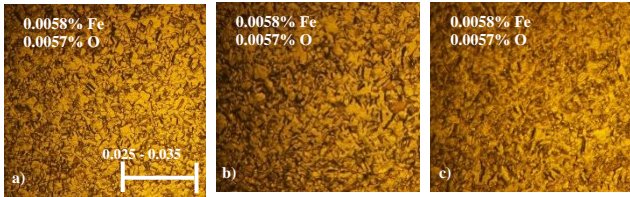


Figura 9. Microestructura a 5°C (temperatura de enfriamiento).

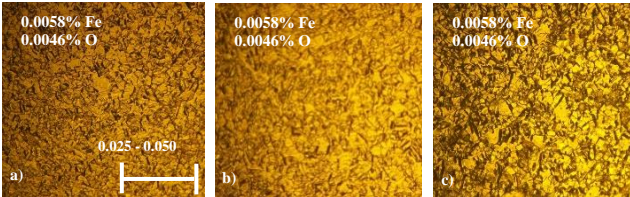


Figura 10. Microestructura a 28°C (temperatura de enfriamiento).

En el quinto análisis realizado de la vaciada “E”, se observa en las figuras 11 y 12 que la tendencia de compactación de estos cristales y el enlace más fuerte se han formado entre los límites, lo que da como resultado esta homogeneidad, además de una disminución del grano. Es importante resaltar que el grano es más estable, pese a la variación de temperaturas a las que fueron sometidas cada una de las muestras; además, la medida entre estas es muy similar y el crecimiento fue más controlado.



Figura 11. Microestructura a 10°C temperatura de enfriamiento

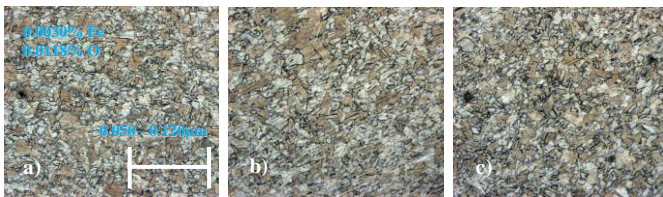
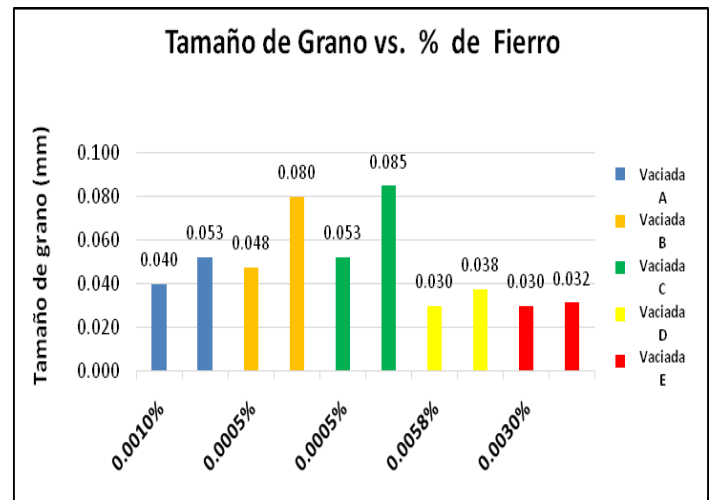


Figura 12. Microestructura a 31°C temperatura de enfriamiento.

Los resultados de la medición del tamaño de grano en las distintas vaciadas se muestran en la tabla 6 y en la gráfica correspondiente.

% Fe	Vaciada	Orilla 1	Centro	Orilla 2	Promedio
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0.0010%	A	0.035-0.045	0.035-0.045	0.035-0.045	0.040
		0.045-0.060	0.045-0.060	0.045-0.060	0.053
0.0005%	B	0.035-0.060	0.035-0.060	0.035-0.060	0.048
		0.040-0.120	0.040-0.120	0.040-0.120	0.080
0.0005%	C	0.035-0.070	0.035-0.070	0.035-0.070	0.053
		0.050-0.120	0.050-0.120	0.050-0.120	0.085
0.0058%	D	0.025-0.035	0.025-0.035	0.025-0.035	0.030
		0.025-0.050	0.025-0.050	0.025-0.050	0.038
0.0030%	E	0.025-0.035	0.025-0.035	0.025-0.035	0.030
		0.026-0.037	0.026-0.037	0.026-0.037	0.032

Tabla 6. Tamaño de grano de los cristales en relación con el porcentaje de Fe



Gráfica 2

En la gráfica 2, se observa la variación que existe entre los porcentajes de hierro (Fe) y oxígeno (O), y vemos que el tamaño de grano presentó mayor variación a menor contenido del hierro utilizado como elemento refinador.

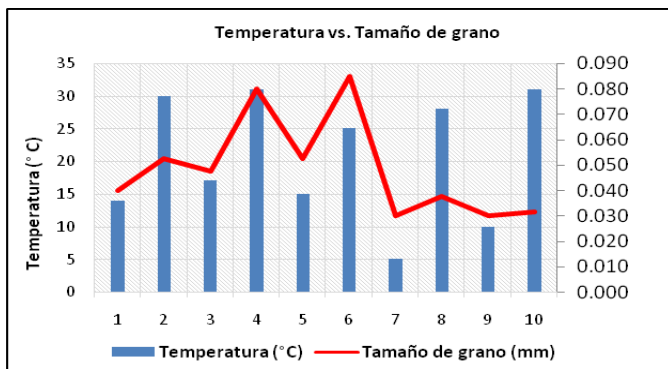
En las muestras de solera con mayor porcentaje de hierro (entre 0.0030 y 0.0060%), con los parámetros normales del proceso de extrusión, el tamaño de grano tuvo menor variación y la uniformidad de la microestructura es más evidente.

Es importante comentar que un mayor porcentaje de hierro ya no debe manejarse, pues generaría inestabilidad en la conformación del grano y pérdida de conductividad en el producto procesado.

Este trabajo también nos mostró que la temperatura de la solución empleada en la tina para el enfriamiento ayuda a que la conformación sea grande o reducida, y que debe controlarse en función del uso de la solera, así como de la especificación solicitada, para ayudar a obtener el rango de grano especificado.

Vaciada	Temperatura °C	# Muestra	Promedio
			(mm)
A	14	1	0.040
	30	2	0.053
B	17	3	0.048
	31	4	0.080
C	15	5	0.053
	27	6	0.085
D	5	7	0.030
	28	8	0.038
E	10	9	0.030
	31	10	0.032

Tabla 7. Temperatura en relación al tamaño de grano



Gráfica 3

En la gráfica 3, se observa la magnitud de la variación del tamaño de grano con base en la temperatura de enfriamiento.

La microestructura se vuelve más homogénea con menor temperatura; se puede tener variación, pero con mayor contenido de fierro. No le afecta en el crecimiento del grano, siempre que no se rebase el valor manejado en el estudio.

El fierro como refinador, actúa inhibiendo el crecimiento del grano, derivado de los procesos de extrusión y enfriamiento, manteniendo la uniformidad estructural.

Eliminar los defectos que estamos buscando en las soleras de cobre de rugosidad (piel de naranja), resultado del doblés de la pieza, implicará una mejora en función de que tendremos un grano reducido y controlado.

Un ejemplo esquemático de la rugosidad de la pieza se hace evidente en pruebas de doblés a 90 y 120°, como se muestra en la figura 13, donde se observa una apariencia muy pronunciada de este defecto.

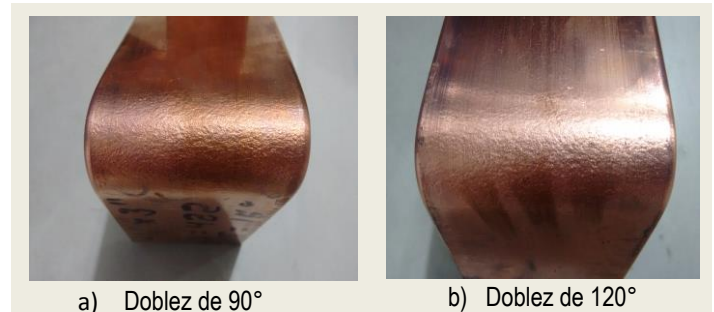


Figura 13. Piel de naranja.

V. Conclusiones

Con base en los resultados de los diferentes ensayos de producción de lingotes, con tres elementos de variación (contenidos de fierro, nivel de oxígeno y temperatura de enfriamiento), en cada uno de los lingotes de las cinco vaciadas de fundición, en la quinta prueba con una conformación de grano más reducido y homogéneo, se observa una mejor apariencia de las soleras y un mejor desempeño en las pruebas de doblés.

Este trabajo de análisis de comportamiento de lingotes, con las variaciones en características mencionadas, permite inferir lo siguiente:

- La temperatura es una variable determinante para mejorar una cristalización de la estructura con granos más reducidos, si mantenemos el proceso de enfriamiento a temperatura debajo de los 20° centígrados.
- El porcentaje de oxígeno que se dé al proceso del lingoteado, al realizar el proceso de extrusión, disminuirá su contenido en la pieza final, gracias al proceso de compresión del lingote en función del coeficiente de reducción que sufre el material al hacerlo pasar por una sección transversal menor a la del lingote, con lo cual se elimina oxígeno y porosidad atrapada en la estructura.

- Los porcentajes de oxígeno que se obtuvieron en las muestras nos indican que, en un intervalo redondeado de 0.0100% a 0.0150%, tenemos una mejor conformación de granos reducidos vs. contenidos mayores de 0.0400% a 0.0600%. Por lo tanto, el grano es uniforme, pero de mayor tamaño.

La especificación para barras, soleras, perfiles y alambres de cobre para aplicaciones eléctricas (americana ASTM B-187/B187M - 11 y europea BS EN 1360), establece una conductividad mínima de 98.3 IACS; por lo tanto, se determinaron valores eléctricos de porcentaje de Fe máximo aplicable a las soleras, que es de 0.0060%, el cual nos asegura una conductividad mínima de 98.5 IACS.

Con base en este valor permitido, las muestras se delimitaron dentro del manejo de este nivel máximo de Fe. Por lo tanto, se concluye que:

- El intervalo de porcentaje de hierro, que permite lograr un grano reducido y una microestructura homogénea, debe manejarse entre 0.0030 y 0.0060%. En estos niveles, el hierro se comporta como refinador e inhibidor de crecimiento del tamaño de grano. Se tuvieron muestras con menor porcentaje de hierro (0.0010%) y no influyó el contenido, lo que permitió que el grano creciera.

Finalmente, este trabajo y sus hipótesis planteadas inicialmente, con base en los resultados obtenidos, dan cuenta de la necesidad de fabricar soleras de cobre dentro de las especificaciones mencionadas en la norma ASTM B-187/B187M – 11, en sus apartados 9, 10 y 11. Con base en estas especificaciones, podemos afirmar que:

- Para mejorar y obtener un tamaño de grano reducido que asegure la funcionalidad de las soleras de cobre aleación C-11000, de manera que se obtengan las propiedades físico-mecánicas, deberán ser procesadas con lingotes que, además de la composición química que establecen las normas internacionales, cuenten

con los siguientes niveles de elementos químicos, que deberán incluirse en los parámetros de control, análisis y certificación de productos:

Fierro: 30 a 60 ppm

Oxígeno: 0 a 150 ppm

Lo anterior permitirá que, en los siguientes procesos de extrusión y estirado de las soleras, la conductividad mínima sea del 98.5 IACS y lleguemos a alcanzar una conformación de tamaño de grano promedio de 0.0032 (mm), con un producto en pruebas de doblez sin piel de naranja y libre de defectos superficiales.

VI. Referencias

1. Maffia, Ernesto Gustavo (2013). *Cobre y sus aleaciones: estructura y propiedades de las Aleaciones*. México. Disponible en: www.ing.unlp.edu.ar/catedras/M0624/descargar.php
2. Reyes R, Carlos Arturo (2008). *Efecto del modificador en la microestructura y propiedades mecánicas de la aleación SAE788*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.
3. Silva Franco, Dagoberto (2012). *Laminación en caliente y en frío de aceros al silicio para aplicaciones eléctricas*, tesis de maestría. Universidad de Nuevo León.
4. Conry RR (2011). *Copper: inorganic & coordination chemistry. Encyclopædia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry*, EUA. Disponible en: www.onlinelibrary.wiley.com/access/biblio.Ciateq.mx/doi/10.1002/9781119951438.eibc0050/abstract
5. ASTM International (2016), Norma ASTM B187/B187M-11 Standard Specification for Copper, Bus Bar, Rod, and Shapes and General Purpose Rod, Bar, and Shapes.
6. BSI Standards Publication, Norma Europea BS EN 13601 : 2013 Copper & Copper Alloys for Rod, BusBar, Shapes and Wires for General Electrical purposes, ISBN 978-0-580-74203-3.
7. Kalpakjian Serope y Steven R. Schmid (2008). *Manufacturing processes for engineering materials*. EUA: Pearson Education.
8. Ortiz Prado Armando, O. Ruiz Cervantes y J.A. Ortiz Valera (2013). *Modelado de procesos de manufactura*. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, ISBN 978-607-02-4692-0. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/238809365/Modelado-de-Procesos-de-Manufactura>

Estudio promovido y asesorado por el área de estudios de Posgrado del CIATEQ, A.C., en convenio con la empresa Industrias Unidas S. A. de C. V.