



Diseño de horno de fundición de cobre

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

Rino Guajardo¹, alumno de sexto año

Matías Zamorano¹, alumno de sexto año

Álvaro Videla¹, profesor asistente

¹DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINERÍA

INTRODUCCIÓN

La minería constituye una de las actividades más significativas para Chile. El procesamiento del mineral de cobre tiene muchas etapas, donde se obtiene como resultado cobre con un 99,99% de pureza. En la Figura 1 se pueden ver las etapas generales de este proceso. Actualmente las compañías que se dedican a este rubro en el país comercializan el cobre de dos formas, en **cátodos** electrolíticos y **concentrado de cobre**, donde este último es fundido generalmente fuera del país. Dentro de los procesos mineros, la fundición recibe el concentrado con un contenido de aproximadamente 30% de cobre y lo somete a procesos **pirometalúrgicos**, mediante los cuales el cobre es enriquecido para finalmente formar cobre metálico [1]. Este proceso requiere de mucha energía calorífica para generar reacciones a altas temperaturas.



EXTRACCIÓN

CHANCADO Y
MOLIENDA

FLOTACIÓN

FUNDICIÓN Y
REFINACIÓN

CÁTODO

Figura 1. Etapas del procesamiento del mineral de cobre.

En Chile existen cinco fundiciones que obtienen cátodos de alta pureza. Sin embargo, el 80% de la capacidad de fusión del mundo se encuentra en Asia, siendo China y Japón los líderes, lo que se atribuye a sus bajos costos energéticos en este proceso [2]. Frente a esto, debe existir un desarrollo tecnológico en la industria para promover eficiencias que permitan el desarrollo tecnológico en el país. Esta investigación desarrolla un acercamiento inicial a la optimización del diseño de un horno.

El proyecto busca diseñar, fabricar y testear un horno económico, no continuo, seguro y de pequeña escala que alcance la temperatura de fusión del cobre (1250°C) y que permita llegar a la producción de metal blanco (fase sólida de $\sim 65\%$ Cu), controlando variables como energía aplicada durante el proceso y temperatura alcanzada en el horno.

METODOLOGÍA

La metodología de diseño del horno para fusión de concentrado se basa en cinco etapas fundamentales: selección de fuente energética, diseño de la estructura del horno, elección de materiales, confección de quemador y testeo de fusión.

La selección de la fuente energética consideró como variables determinantes el **poder calorífico** de la fuente, la portabilidad, la seguridad en la implementación y el nivel de contaminación que esta generaría. Para la elección de la fuente energética se comparó petróleo, carbón, gas licuado y electricidad. De todas las fuentes, el gas licuado es la que presenta un mayor poder calorífico ($48,4 \text{ kJ/kg}$), una adecuada facilidad de manejo —por medio de balones de gas—, un riesgo aceptable y un bajo nivel de contaminación.

El diseño de la estructura debe permitir múltiples fusiones sin sufrir daños de consideración. Luego, sus variables a tomar en cuenta son condiciones de operación, portabilidad y durabilidad. Se buscó lo indicado en las referencias [3], [4] y se optó por una disposición interior cilíndrica y un quemador ubicado en posición tangencial, de manera de permitir la formación de una llama helicoidal que rodee el **crisol** con el material a fundir. Esto permite una mejor distribución del calor y aumenta la vida útil de los materiales. La Figura 2 muestra el diseño interior del horno. Este además debe contar con una vía de evacuación para permitir completar el proceso de combustión, por lo cual se habilitó una salida en la tapa superior. La estructura considera también una separación con el piso, con el objetivo de disminuir las pérdidas por transferencia de calor —mediante conducción—. Las medidas fueron optimizadas para minimizar el tamaño de la cámara y mejorar la transferencia de calor. Para estos propósitos se consideró un crisol de capacidad de 200 g de concentrado de cobre. En la Figura 3 se puede observar el resultado del diseño.

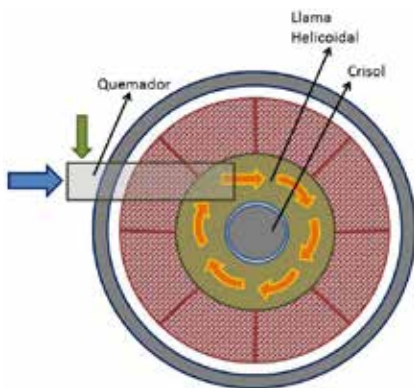


Figura 2. Diseño interior del horno.



Figura 3. Estructura metálica del horno.

La selección de materiales consideró aspectos como resistencia a altas temperaturas, deformación térmica y costo. Al evaluar los materiales **refractarios** disponibles en el mercado, se optó, desde el interior hacia el exterior del horno, por una primera capa de ladrillos refractarios, debido a su capacidad aislante y alta resistencia térmica. En segundo lugar, una capa de cemento refractario, que da rigidez a la estructura y resiste altas temperaturas. Luego, una capa de malla cerámica o Kaowool, que tiene por objetivo aislar el interior y mantener la superficie del horno a una temperatura segura para su manipulación. Y por último, una cubierta de acero de 8 mm, para mantener la estructura protegida y darle firmeza a la estructura interior.

En la Figura 4 y en la Figura 5 se observa la disposición de los materiales de aislación del horno y el proceso de manufactura de este, respectivamente.

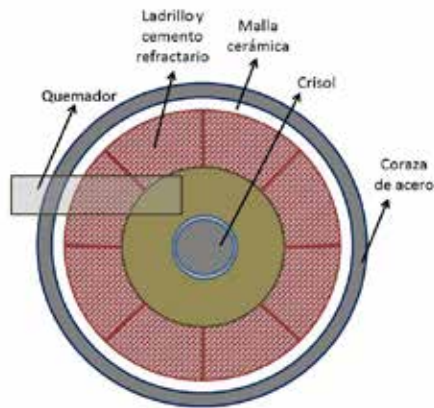


Figura 4. Materiales de aislación del horno.



Figura 5. Vista proceso de manufactura.

La confección del quemador responde a alcanzar la temperatura necesaria para fundir cobre (estable y mayor a 1250°C). En general, los quemadores para fundición superan la escala del actual diseño, por lo tanto se optó por diseñar y confeccionar uno. El diseño interior del quemador consta de un tubo o cámara de combustión que tiene dos entradas, una de aire y otra de combustible, y una salida de la llama o mezcla para la combustión. El aire circula por todo el diámetro de la tubería, pero antes de entrar en contacto con el combustible, el tubo disminuye su diámetro de tal forma que el aire ocasiona una turbulencia que provoca la mezcla homogénea con el gas. Posteriormente, esta mezcla genera combustión en la salida del quemador. Para regular la cantidad de ambos fluidos, el sistema consta con dos reguladores de tal manera que se pueda manejar la mezcla y obtener la temperatura requerida. Como la razón de aire-gas es muy alta, se necesita una fragua para abastecer el flujo de aire necesario. El diseño exterior e interior del quemador se puede apreciar en la Figura 6 y 7 respectivamente.

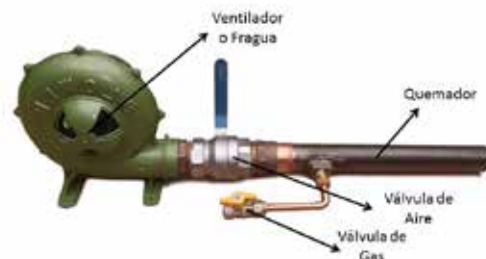


Figura 6. Diseño exterior del quemador.

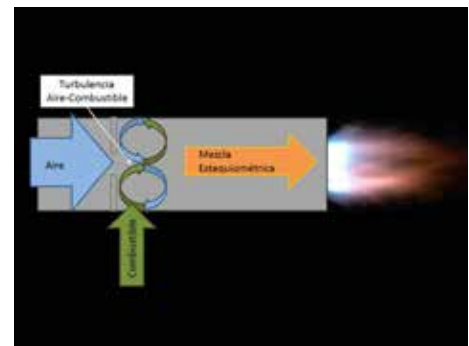


Figura 7. Diseño interior del quemador.

El proceso de testeo consistió en realizar dos ensayos de fusión, el primero con cobre puro 99,99%, para evaluar eficiencia energética del equipo. El segundo con concentrado de cobre con un agregado de sílice (SiO_2) correspondiente al 30% del peso total [5]. Este último ensayo se hizo a partir de un lote de 2 kg de concentrado de cobre preparado mediante un mostrador rotatorio, de manera de asegurar equiprobabilidad en su calidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Antes de iniciar la fusión, el horno debe ser calentado gradualmente para que los ladrillos se dilaten de modo lento y se eviten fisuras por expansión del material, es decir, primero se regula el flujo del quemador a baja potencia, hasta que los materiales refractarios interiores alcancen una temperatura adecuada, y luego se incrementa hasta alcanzar la máxima potencia. El flujo se regula con las válvulas de aire y gas, que controlan la razón de mezcla, de manera de asegurar que el color de la llama pase de amarillo a azul violeta, característica propia de una combustión eficiente. Este horno se puede regular

para alcanzar temperaturas mayores a los 1250°C, punto de fusión del cobre [5]. Para controlar la temperatura de operación se utiliza una termocupla de contacto. Después de regularizar el flujo, si esta indica una temperatura inferior (superior) a la requerida, se deberá abrir (cerrar) la válvula de aire en conjunto con la del gas, hasta llegar a la temperatura deseada sin perder el color óptimo de combustión de la llama.

En la Figura 8 se aprecia la distribución resultante del sistema de fusión. En la Figura 9, en tanto, se puede observar la evolución de temperatura en una experiencia de fusión, hasta alcanzar un nivel estable entre 1300-1350°C. Esta última temperatura es la necesaria para la fusión de concentrado de cobre. Al apagar el horno, el nivel de calor decrece de forma exponencial.

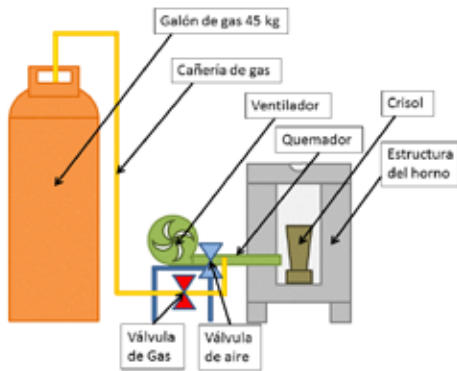


Figura 8. Distribución del sistema de fusión.

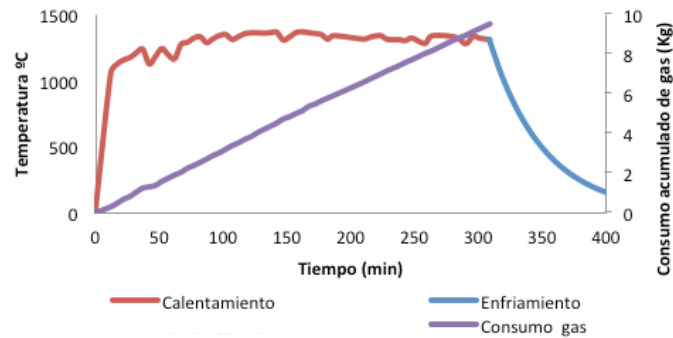


Figura 9. Evolución de la temperatura y consumo de gas en el tiempo.

La eficiencia energética (EE) del proceso corresponde al ratio de la cantidad de energía consumida versus la cantidad de energía requerida mínima para realizar el trabajo de fusión [6]. Para medir la EE del horno, se determinó la energía teórica que se debe utilizar para fundir 200 g de cobre puro, detallada según la Tabla 1, y por otro lado, se midió el consumo de gas licuado en el tiempo, tomando el peso del cilindro de gas con ayuda de una balanza electrónica. Finalmente, se comparan los dos valores y se obtiene el índice de EE del sistema. El horno requirió 80.000 kJ de calor en el gas propano. En estos términos, el horno alcanza una EE de 1% que considera las pérdidas por aislación, por conducción, convección de gas caliente, rendimiento del quemador y la eficiencia de la combustión (mezcla estequiométrica del gas y del aire).

Tabla 1. Cálculo teórico de fusión de cobre con 99,99% de pureza

Temperaturas de operación				
Temperatura ambiente	25	°C	298	K
Temperatura de fundición cobre	1.350	°C	1.623	K
Propiedades del cobre				
Masa molar	63,5			[gr/mol]
Densidad	8.960			[kg/m3]
Calor específico cobre [7]				
Cobre sólido Cu S	$22,64 + (6,28 \cdot 10^{-3}) T$	[J/mol K]	25-1.083	°C
Cobre líquido Cu L	31,38	[J/mol K]	1.083-2.595	°C
Entalpia de fusión	13.589			[J/mol]
Calor necesario para fundir un kilo de cobre				
$Q = 51.407 \text{ [J/mol]} = 810 \text{ [kJ/kg]}$				

$$Q = \int_{298}^{1356} C_p(t)_{CuS} dt + \int_{1356}^{1623} C_p(t)_{CuL} dt + \Delta H_f$$

$$Q = \left(\int_{298}^{1356} 22,64 + (6,28 \cdot 10^{-3}) T dt + \int_{1356}^{1623} 31,38 dt + 13.589 \right) \text{ [J/mol]}$$

$$Q = \left(22,635 \cdot (1.356 - 298) + 6,28 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1.356^2 - 298^2}{2} + 31,38 \cdot (1.623 - 1.356) + 13.589 \right) \text{ [J/mol]}$$

En la fundición, el concentrado de cobre alcanza los 1350°C para lograr el cambio de estado sólido a líquido. Al pasar al estado líquido y agregar sílice como fundente se separan los elementos (Cu, Fe, S) en dos fases fundidas: la fase más liviana, denominada **escoria**, queda en la superficie, y la más pesada, denominada **mata**, cae al fondo en estado líquido. La fase pesada o mata es un compuesto rico en cobre (>60% Cu) y de interés en la fusión.

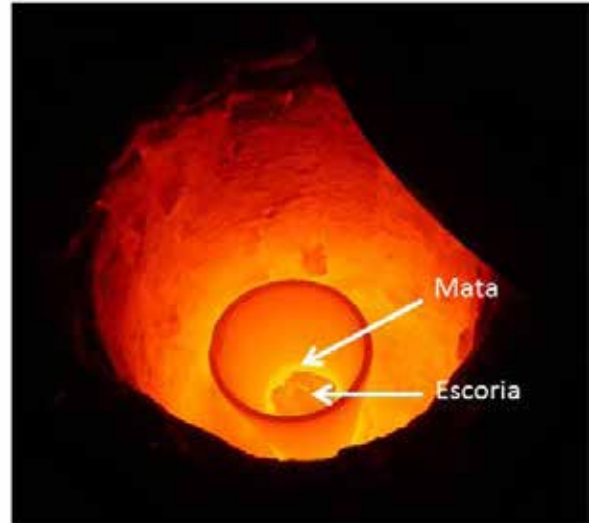


Figura 10. Separación de mata y escoria.

Para este caso se consideró una muestra de concentrado de una faena minera del país con 23,7% de Cu, 25,85% de Fe y 15,8% de S. A la mezcla se le agregó sílice hasta alcanzar un 30% del peso total, como se propuso. El resultado de la separación en mata y escoria se aprecia en la Figura 10.

CONCLUSIONES

En este estudio, se planteó el desafío de diseñar un horno de pequeña escala que alcanzara la temperatura de fusión del cobre (+1250°C). Se buscó una fuente energética que tuviera alto poder calorífico, portabilidad, seguridad en la implementación y nivel de contaminación determinado, resultando ser el gas licuado la más eficaz. Se definió que la estructura del horno fuera de forma cilíndrica para que, junto con el quemador, pudieran formar una llama helicoidal que distribuyera mejor el calor; que tuviera una vía de evacuación para realizar el proceso de combustión y que estuviera separado del piso para disminuir la transferencia de calor. En cuanto a la selección de los materiales aislantes utilizados, se optó por capas de ladrillos refractarios, por su alta resistencia a la temperatura, cemento refractario que diera rigidez a la estructura, malla cerámica para mantener la superficie del horno a una temperatura manipulable, y una cubierta de acero para proteger y dar firmeza a la estructura.

El diseño adoptado probó ser adecuado para la escala definida. A través de la estructura propuesta se logró obtener altas temperaturas (1500°C) para poder fundir materiales sin la necesidad de utilizar sistemas más costosos —como equipos basados en inducción eléctrica—. Sin embargo, se recomienda seleccionar mejores materiales de aislación y mejorar el diseño para evitar pérdidas de calor y mejorar la EE del horno.

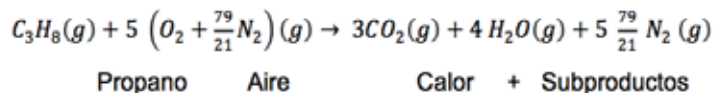
Resulta importante destacar que la manufactura del quemador fue una buena opción, ya que logró disminuir el costo total del proyecto respecto de haber adquirido uno a menos de la mitad del presupuesto. Sin embargo, se recomienda innovar en cuanto a materiales y diseño, para así lograr una mayor eficiencia, optimización en la combustión y durabilidad del quemador.

El resultado del testeó demostró que el rendimiento del horno en promedio fue de solo un 1%. Esto se puede tomar como una buena base para introducir mejoras en cualquiera de sus componentes, y así mejorar la eficiencia. Una simple manera sería utilizar oxígeno en vez de aire para la combustión, para evitar el calentamiento de nitrógeno.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

Combustión de propano

La combustión de propano o gas licuado se produce con la reacción del oxígeno disponible en el sistema. Si no existen niveles exactos (estequiométricos) de oxígeno, la combustión no es eficiente, lo que puede darse en dos casos: si falta oxígeno, la combustión no es completa, por lo que la temperatura que resulta es baja; mientras que si existen niveles muy altos de oxígeno, hay una ineficiencia al perderse calor al calentar el oxígeno que no se utiliza en la combustión. Si existe oxígeno en su cantidad óptima la llama puede alcanzar niveles superiores a los 1500°C. La fórmula del propano y su reacción en la combustión se muestra a continuación:



Calor necesario para fusión del cobre

El calor necesario para fundir una determinada masa de cobre se estima en relación con el calor específico del material, que a su vez está en función de su temperatura, y del calor latente necesario para cambiar de fase sólida a líquida, siendo este último una cantidad energética significativa en el proceso de la fusión del cobre:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} C_p(t) dt + \Delta H_t$$

Fundición del concentrado de cobre

La fusión de concentrado de cobre consiste en producir cobre de ley 60% en sulfuros concentrados de cobre, con la adición de pequeñas cantidades de gangas de óxidos —como sílice, alúmina u óxido de calcio— en la fundición. Esta reacción exotérmica tiene como resultado la separación de la mezcla total en dos fases, mata y escoria. La mata es una solución de alto porcentaje de cobre —mayor a 60% de cobre— y la escoria compuesta principalmente de óxido de hierro. Esta se separa de la muestra inicial por la afinidad con las gangas de óxidos. Hay que cuidar las proporciones de gangas de óxidos o fundentes añadidas; porque, mientras más escoria se genera, mayor cantidad de cobre es el que se pierde. La ecuación de la fusión del concentrado se representa a continuación:

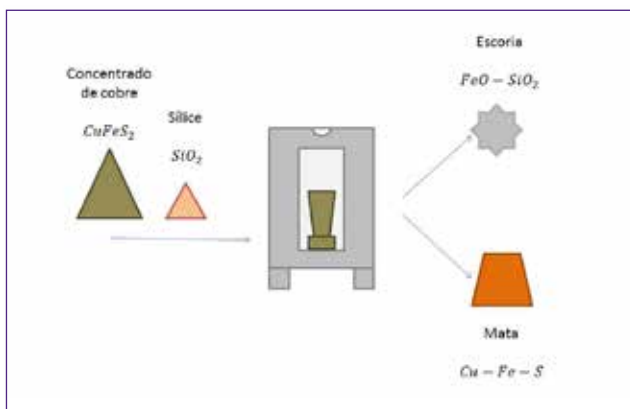
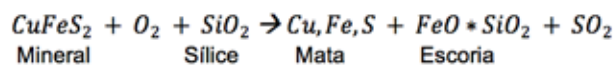


Figura 11. Separación de mata y escoria.

GLOSARIO

Concentrado de cobre: Producto del mineral ingresado a la planta de procesos, luego del chancado, molienda y flotación, con un porcentaje de cobre resultante cercano al 30%.

Pirometalurgia: Rama de la metalurgia extractiva en que se emplean procesos para obtención y refinación de metales utilizando calor, como en el caso de la fundición.

Metalurgia: Técnica de obtención y tratamiento de los metales a partir de minerales metálicos.

Cátodo: Producto final de la fusión y refinación con un contenido de un 99,99% de cobre, el cual puede ser vendido como producto final.

Poder calorífico: Cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación.

Crisol: Aparato utilizado como recipiente de metales fundidos a altas temperaturas (~1500 °C), normalmente hecho de grafito con cierto contenido de arcilla.

Refractario: Material que resiste altas temperaturas, superiores a 1100°C, sin descomponerse.

Mata: Fase rica en cobre con porcentajes entre 60% y 70%, producto de valor de la fundición.

Escoria: Fase pobre en cobre con porcentajes entre 1-2%, contiene alta concentración de óxidos de hierro. Material de menor densidad que la mata, la que flota en la solución a 1250°C —esto ayuda a una fácil remoción en la fusión y conversión—.

AGRADECIMIENTOS

Especiales agradecimientos a don Luis Valdés, jefe del taller de Ingeniería Mecánica; a Juan de Dios Rivera, profesor del departamento de Mecánica; y a Pablo Pastén, profesor del departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, por su ayuda y disponibilidad.

REFERENCIAS

- [1] González, A. Riquezas minerales de Chile a nivel mundial. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. s.l. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, 2000.
- [2] Véliz P, S. Un negocio fundido, Qué Pasa (Minería): 2012.
- [3] Mc ADAMS, W. H. Heat transmission. McGraw-Hill, vol. 3: 2012.
- [4] Gingery, D. Building gas fired crusable furnace. Chicago s.n: 1988.
- [5] King, M. J., Sole, K. C., Davenport, W. G. Extractive metallurgy of copper. s.l. Elsevier: 2011.
- [6] Potter, M. C., Somerton, C. W. Schaum's outline of theory and problems of engineering thermodynamics. McGraw-Hill: 1993.
- [7] Rao, Y. K. Stoichiometry and thermodynamics of metallurgical processes. Cambridge University Press, CUP Archive:1985.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Rino Guajardo
- 2 Matías Zamorano
- 3 Profesor Álvaro Videla

