

# Capítulo 1

## Reseña histórica de la metalurgia

### Introducción

El hombre, a medida que fue evolucionando, conoció la importancia de los metales para su subsistencia, aplicándolos a la fabricación de utensilios y herramientas, tomando primero el oro y después la plata y el cobre, metales que encontró en la naturaleza en estado puro. Las evidencias arqueológicas indican que, aunque el plomo ya era conocido en una época muy antigua, el primer metal utilizado diferente del oro, fue el cobre. Pequeñas cuentas (esferas perforadas) y alfileres de cobre martillado fueron encontrados en Ali Kosh, Irán Occidental y Çayönü Tepesi cerca Diyarbakir-Erganien, en Anatolia por los investigadores H. Çambel and R. J. Brairdwood, correspondientes al período comprendido entre los siglos IX y VII a. C.; utensilios elaborados en cobre nativo sin fundir y trabajados en frío; Kaptan, E. (1990) [1]. Más tarde con el origen de la metalurgia se logró obtener el bronce, una aleación de cobre y de estaño y posteriormente con procesos de reducción primaria más complejos para la época, se obtuvo el hierro metálico partir de minerales.

Para entender mejor cómo evolucionaron los diferentes procesos de producción de níquel y de ferroníquel, inicialmente vamos a ver cómo el hombre fue descubriendo mediante observaciones, ensayo y error, la tecnología requerida para producir metales y aleaciones usando los recursos naturales existentes. La tecnología para producir el cobre, el bronce y el hierro desde el periodo neolítico hasta hoy fue la base que tomaron los pioneros de la industria del níquel, desde que este material fue identificado como un

metal nuevo por A. F. Cronstedt en 1751, tal como lo indican varios autores en diferentes trabajos, como por ejemplo la obra de Michael Wescott “*The Shield nickel*”; Wescott, M. (1991) [2].

Enseguida voy a explicar, cómo algunas tecnologías básicas como el dominio del fuego, la obtención del carbón vegetal y la fabricación de utensilios de arcilla refractaria necesitaron ser perfeccionadas y controladas antes de iniciar el desarrollo de la metalurgia propiamente dicha. Indudablemente, el fuego fue manipulado y dominado por el hombre mucho antes de que se iniciara la edad de piedra, suceso considerado como uno de los acontecimientos más importantes en la historia de la humanidad. Por otra parte, la fabricación y uso del carbón vegetal que se utilizó como fuente primaria de energía disponible, sirvió para calentar, forjar y después fundir los metales puros. Igualmente, el descubrimiento y dominio de la arcilla como un material para elaborar utensilios, ladrillos y contenedores refractarios fue clave en el manejo de metales y otros materiales calientes. La calcinación de minerales iniciando con la piedra caliza para obtener la cal pura que más tarde se utilizó como aglomerante (cemento) fue desarrollada y usada por muchas civilizaciones en todo el mundo; por otra parte, también se descubrió la propiedad metalúrgica de la cal pura que permitió bajar el punto de fusión de los óxidos formando las escorias y así poder eliminar las impurezas durante el afino de metales con la misma escoria.

## 1.1 Carbón vegetal

El fuego, desde cuando el hombre logró dominarlo, ha estado asociado a la metalurgia. La madera es la fuente de carbón más disponible en la naturaleza y de donde se ha obtenido el carbón vegetal desde tiempos inmemoriales. Existen en las pinturas rupestres de Altamira, 15.000 años a. C., evidencias de que los hombres del paleolítico utilizaron el carbón vegetal para contornear estos dibujos; Muzquiz, M., et All (1988) [3]. El carbón vegetal se obtiene al calentar materiales orgánicos (madera) en ausencia del aire, para realizar una destilación seca llamada pirólisis. Con el calor, el agua y las materias volátiles de la madera se evaporan dejando el carbono sólido, que no puede reaccionar con el oxígeno al no haber aire presente. En este proceso, a medida que sube la temperatura el agua se evapora entre 110 y 150 °C. Después, entre 250 y 350 °C se produce la destilación de algunos

aceites y otras materias volátiles. Finalmente, entre 650 y 700 °C se produce la carbonización donde el carbono se sinteriza formando un material sólido, frágil y poroso, con un alto contenido en carbono (del orden del 98 %) y de baja densidad. El carbón vegetal con un poder calorífico que oscila entre 29.000 y 35.000 kJ/kg, es muy superior al de la madera, que puede tener entre 12.000 a 20.000 kJ/kg. Además, por su baja densidad el hombre lo podía transportar fácilmente manteniéndolo encendido para su uso inmediato. Desde los comienzos del desarrollo de la metalurgia, el carbón vegetal se empezó a utilizar para calentar y fundir los metales puros y para calentar y reducir los óxidos metálicos. Hoy en día se continúa utilizando como fuente de calor y como reductor en procesos de reducción de óxidos de hierro y fabricación de ferroaleaciones en China, Brasil y otros países; De Oliveira, S., et All (2012) [4].

## **1.2 Arcilla refractaria**

La tecnología para la fabricación y el uso de la cerámica está asociada al manejo del fuego, así como a la elaboración de piezas a partir de metales calientes, la fundición de los mismos y para la elaboración de aleaciones. La arcilla es un material plástico compuesto por varios minerales (silicatos de alúmina hidratada, óxido de hierro y otros) que cuando se somete a temperatura superior a 1.000 °C (proceso de destilación seca) sus partículas se sinterizan es decir, se unen unas con otras cambiando sus propiedades plásticas a rígidas, obteniéndose un producto nuevo, fuerte, impermeable al agua y resistente a alta temperatura sin modificar su forma. El nuevo material se conoce en general como cerámica y su descubrimiento se remonta al paleolítico superior, 29.000 a 25.000 años a. C., mucho antes del neolítico y de la edad de los metales; Farbstein, R., et All (2012) [5]. El barro arcilloso define las cerámicas modeladas y cocidas, sin ningún acabado específico. La coloración depende de la calidad de la arcilla relacionada con impurezas como óxidos de hierro u otros óxidos propios de la arcilla o agregados a propósito. El término de alfarería está más relacionado con utensilios elaborados con barro arcillosos para uso doméstico. Más tarde la cerámica fue recubierta con sustancias vítreas (silicatos) mejorando su impermeabilidad

al agua. El proceso para fabricar diferentes piezas con arcilla es muy sencillo. La arcilla que se encuentra pura en la naturaleza, se ablanda agregando agua para mejorar la plasticidad. Con la plasticidad adecuada se fabrican las diferentes piezas ya sea a mano, torneadas o vaciadas en moldes. Después estas piezas se dejan secar al aire controlando la pérdida de humedad para evitar agrietamiento. Finalmente se cargan en el horno, que trabaja con madera como fuente de energía, para cocinarlas a 1.100 °C.

La cerámica ha sido considerada como el producto más antiguo encontrado en casi todas las culturas desde el periodo Neolítico. Con la cerámica el hombre fabricó contenedores, utensilios para preparar alimentos, elementos para construcción y recipientes para mantener el fuego encendido. Esta tecnología se extendió por todo el mundo. Con el pasar de los siglos se perfeccionó utilizando otros materiales de excelente calidad logrando así fabricar mejores refractarios que se utilizan en la industria metalúrgica actual.

### **1.3 Fusión de metales puros**

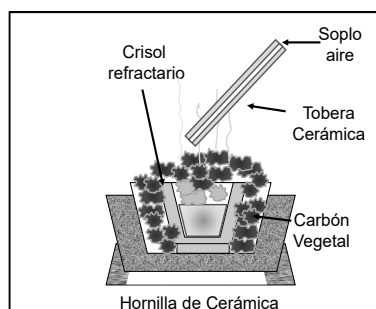
Desde tiempos muy remotos, la misma naturaleza mostró al hombre el mundo de la metalurgia con los hallazgos del oro, del cobre y de la plata, que se encontraban en forma natural, muy atractivos por sus colores, brillo y aspecto de limpieza. Estos metales encontrados en forma natural y en estado puro, empezaron a ser trabajados por el hombre, debido a su fácil maleabilidad y con el uso de herramientas de piedra como el martillo. Probablemente por un accidente, una porción de oro cayó al fuego y el hombre pudo darse cuenta que el metal se ablandaba o se fundía y después cuando se enfriaba se solidificaba nuevamente. Este fenómeno indujo a desarrollar su creatividad para fabricar piezas que usaba como utensilios, adornos y objetos de culto, inspirado en el sol, la luna y la naturaleza que lo rodeaba. A ciencia cierta no se sabe cuándo el hombre empezó a utilizar el oro. Se cree que fue entre los años 8.000 a 7.000 a. C.

En cuanto a la tecnología propiamente dicha para fundir el oro en la antigüedad, se ha logrado establecer que efectivamente el hombre entendió y

aplicó el efecto del calor en los metales. También pudo observar que los metales no ferrosos se volvían más maleables y plásticos, facilitando su trabajo en estado sólido.

Tanto la evidencia arqueológica como de la etnohistoria (textos y crónicas de la época) muestran que, en el caso preciso de la fundición, los primeros hornos se construyeron al interior de la tierra. También usaron hornillas portátiles de cerámica con ductos o respiraderos en la parte exterior para avivar el fuego; en donde se instalaban tubos de cerámica (toberas) cónicos de 8 a 10 cm, que a su vez se acoplaban a largas cañas de bambú, por las cuales se soplaban aire para aumentar la combustión del carbón, logrando así una temperatura superior a los 1.000. En la figura 1 (a y b) se muestra un grupo de trabajadores metalúrgicos de la época precolombina de la región de los Andes usando un recipiente como un crisol y sopletes (tobera) para aumentar el calor del fuego, con el propósito de fundir oro y otros metales; igualmente, se observa el esquema de una hornilla.

**Figura 1: Fundidores de oro y esquema de una hornilla para fundir oro y minerales.**



*Figura a; cerámica "fundidores de oro" una hornilla. Museo Chileno de Arte Precolombino. Figura b; esquema del autor*

Actualmente se ha demostrado que los conocimientos metalúrgicos para fundir oro, cobre y plata se esparcieron rápidamente por todo el mundo a medida que los pueblos iban migrando de un sitio a otro. En América precolombina, por ejemplo, la civilización preíncica que se asentó en el norte

de Perú 1500 años a. C., ya conocía las técnicas para trabajar el oro mucho antes que los propios aztecas; Burger, R. (1996) [6].

Los aztecas también conocían una técnica muy parecida a la de los Incas, observada por los españoles cuando llegaron a México en 1519 y documentada en el código de Mendoza (University of California Press, 1992) [7]. La técnica consistía en mezclar el oro con carbón vegetal, avivando el fuego con aire, soplando a través de unas toberas refractarias como se muestra en la figura 2.

**Figura 2: Azteca fundiendo oro en una hornilla.**



*Azteca metalúrgico. Ilustración del facsímil Códice Mendoza, lámina del siglo XII.*

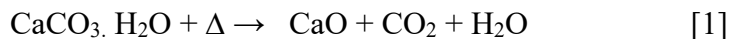
Alrededor del 7.000 a. C., algunas comunidades neolíticas descubren el cobre nativo y comienzan a trabajarlo para fabricar cuchillos y hoces mediante calentamiento y martilleo (forja) de este metal puro. Pronto el hombre se da cuenta que estas herramientas duran mucho más tiempo que sus equivalentes de piedra. Algunos de estos primeros instrumentos artificiales muy antiguos contienen níquel (2,73 %) y fueron encontrados en Asia Menor (Antioquía); fechados entre 3500-3100 a. C.; Rosemberg, S. (1968) [8]. Con esos conocimientos se elaboraron joyas, utensilios y herramientas para el trabajo, facilitando el desarrollo de otras actividades más complejas como fueron la agricultura, la ganadería y la pesca.

## 1.4 Calcinación de minerales

A continuación, se describe un proceso de concentración térmica de minerales y metales que el hombre descubrió, probablemente por observación y análisis, que le permitió adentrarse en las ciencias para poder desarrollar nuevas tecnologías que lo llevaron a buscar otros metales que se encuentran en los minerales en forma de compuestos más complejos.

El óxido de calcio (CaO), la cal, es un compuesto que se ha usado como cemento en construcción, como base para pigmentos en la decoración, para mejorar la calidad de los suelos en la agricultura y en la metalurgia como fundente de los minerales desde el periodo paleolítico. Se hace referencia a este compuesto y a su proceso de obtención; aunque no es un metal puro, si influyó en el desarrollo tecnológico para separar los metales presentes en otros compuestos, como lo explicaré más adelante. La cal, ha sido usada como cemento (mortero) en casi todas las civilizaciones, desde que el hombre se volvió sedentario con el descubrimiento de la agricultura y la domesticación de animales, conduciéndolo a diseñar y construir grandes ciudades. Evidencias de la utilización de mortero (cemento) a base de cal han sido encontradas no solo en los países más antiguos de Asia, África y Europa, sino también en las ruinas de México y Perú. Vestigios de construcciones en todo el mundo son pruebas perdurables del uso de mortero elaborado con cal, así como la habilidad y el conocimiento que poseía el hombre para calcinar la piedra caliza. Por ejemplo 6000 años a. C., en Çatal Hüyük en la actual Turquía, la utilización de la cal como un material aglomerante (cemento) era ya conocida como una práctica común para la construcción; Rodríguez, C. (2012) [9].

La cal (CaO), se obtiene a partir de la piedra caliza; un carbonato de calcio hidratado que mantiene su cohesión formando rocas muy sólidas. Su fórmula química es  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . El óxido de calcio (CaO) se produce al descomponer la molécula, por efectos del calor.



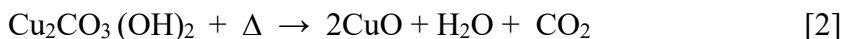
En donde  $\Delta$ , es el calor suministrado para descomponer la molécula a una temperatura entre 850 y 1100 °C, cuidando de mantener esta temperatura constante durante 24 horas. Este proceso se conoce con el nombre de calcinación. Entonces, la calcinación se puede definir como el proceso al que se someten ciertos minerales para cambiar su composición química, ya sea por

oxidación o por evaporación de otros elementos o compuestos logrando a la vez una concentración de los minerales o de los metales. El óxido de calcio obtenido se conoce con el nombre de cal viva. Por otra parte, el hombre también observó que, al agregar agua a la cal viva, esta reaccionaba fuertemente generando calor y después, con el tiempo se endurecía nuevamente formando un compuesto muy sólido. La cal hidratada después absorbía el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en la atmósfera formando nuevamente un carbonato de calcio. Así fue como este material calcinado se empezó a utilizar como cemento. Además, como ya se dijo, desde el inicio del desarrollo de la metalurgia, la cal se empezó a usar como un compuesto para disminuir el punto de fusión de óxidos y sulfuros, formando óxidos más complejos con menor punto de fusión denominados escorias.

## 1.5 Fusión de minerales

No se sabe exactamente cuándo se empezaron a calcinar los minerales que contenían metales, pero se cree fue por pura casualidad. Los afloramientos de minerales de cobre son muy abundantes en el mundo y atrajeron la atención a nuestros antepasados por sus diferentes colores. Por ejemplo, la malaquita, Cu<sub>3</sub>(OH.CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, mineral de cobre que se encuentra en regiones secas o semiáridas y por lo general cerca de la superficie, es un buen indicador de yacimientos de cobre más profundos. Desde las primeras civilizaciones con estos minerales se tallaban objetos y joyas semipreciosas y molido en un polvo fino, se usaba como pigmento.

En Anatolia, hacia el año 4000 a. C., los maestros metalúrgicos aprendieron a reducir la malaquita, obteniendo cobre metálico al hacerla reaccionar con carbón vegetal; Centro Nacional Investigación Científica; Gailhard, N. (2008) [10]. El proceso consistía básicamente en moler la malaquita y mezclarla con carbón vegetal y siguiendo procedimientos similares a los empleados para calentar y fundir el oro, conseguían reducir el óxido de cobre a metal muy puro. Con la experiencia, muchos ensayos y errores, los maestros metalúrgicos pronto vieron que, al calcinar primero la malaquita en polvo, esta perdía su color original (verde oscuro) y obtenían otro mineral de color rojizo muy diferente; pero que ya lo conocían en la naturaleza; se trataba del óxido de cobre (CuO).



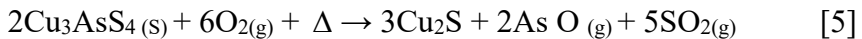
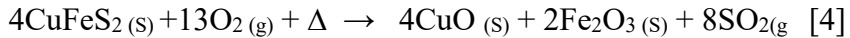


Con otro proceso posterior, el óxido de cobre (CuO) lo reducían con carbón vegetal para obtener el cobre metálico.



Con relación a la *calcopirita* (CuFeS<sub>2</sub>), la *tennantita* (Cu<sub>12</sub>As<sub>4</sub>S<sub>13</sub>) y la *enargita* (Cu<sub>3</sub>AsS<sub>4</sub>), no se ha precisado con exactitud en qué momento se inició el proceso para obtener cobre por calcinación o por fusión, pero si están considerados en el periodo llamado calcolítico (*Chalcolitic*); “*Historia de la metalurgia 2º Edición*”; Tylecote, R. F (1992) [11].

Estos minerales, triturados y molidos se calcinaban, siguiendo procedimientos muy parecidos al de la calcinación de piedra caliza.



Con la temperatura el oxígeno del aire reacciona con el azufre y con el arsénico del mineral, formando gases que van a la atmósfera; “*Mecanismo y cinética de oxidación de enargita. Concepción-Chile*”; Aracena, A. G. (2013) [12]. El hierro y otros elementos también reaccionan con el oxígeno formando escoria pastosa, la cual se retiraba más tarde. El óxido de cobre generado, se iba reduciendo con el carbón vegetal presente en exceso, hasta obtener el cobre metálico casi puro. La operación se repetía varias veces, pero sin saber que el azufre, el arsénico y otros elementos migraban a la superficie del material (difusión) donde se oxidaban y eliminaban en forma de gases y en forma de escoria. Periódicamente se retiraba la masa pastosa y con golpes repetidos con el martillo en caliente (forja) se iba eliminando la escoria que se adhería y a la vez se elaboraba un lingote propiamente dicho. Estos procesos de calcinación no han cambiado mucho hasta hoy en día y solamente han sido modificados por los cambios tecnológicos referentes a diseño de los equipos básicos (hornos), el control de la alimentación de las cargas y el control de la temperatura.

El metal trabajado más antiguo, hecho a partir de minerales metálicos, fue encontrado en las excavaciones realizadas por Çambel, H. et All (1970), en el montículo Çayönü Tepesi cerca Diyarbakir-Ergani; Kaptan, E. (1990)

[13]. Estos materiales fueron hechos de cobre nativo y de cobre a partir de la malaquita y laminados en frío. Son los primeros hallazgos metálicos que prueban que el hombre antiguo en Anatolia (Turquía) tenía conocimientos metalúrgicos y que trabajaron en minas de cobre hace 9.000 años. Estas evidencias tan antiguas de Çatalhöyük (6.000 años a. C.) indican el inicio de la metalurgia en Anatolia.

Otras excavaciones arqueológicas llevadas a cabo en los Altos del Golán (Asia Menor), demuestran que la región fue ocupada por varios grupos humanos durante el periodo llamado “*Calcolítico*” [11]. A finales del quinto y cuarto milenio antes de Cristo, estos grupos lograron producir cobre a partir de minerales, en “*Chalcolithic period in the Golan*”, CNRS Éditions; Kafafi, Z. (2010) [14].

Este periodo se refiere a la época en que se utilizó la calcopirita y el sulfuro de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) para obtener cobre metálico mediante un proceso de fundición. Estos conocimientos se fueron expandiendo rápidamente a Egipto, Europa y Asia. Aunque China tuvo un comienzo relativamente tardío en el desarrollo de la fundición de cobre, 2.000 años a. C., su práctica se expandió rápidamente logrando fabricar piezas muy complejas de buena calidad, “*A Comparison of the Ancient Metal Casting Materials and Processes to Modern Metal Casting Materials and Processes*”; Greer, S. (2009) [15]. Posteriormente los chinos aprendieron los procesos utilizados por los mesopotámicos y por los egipcios para obtener el cobre puro a partir de minerales.

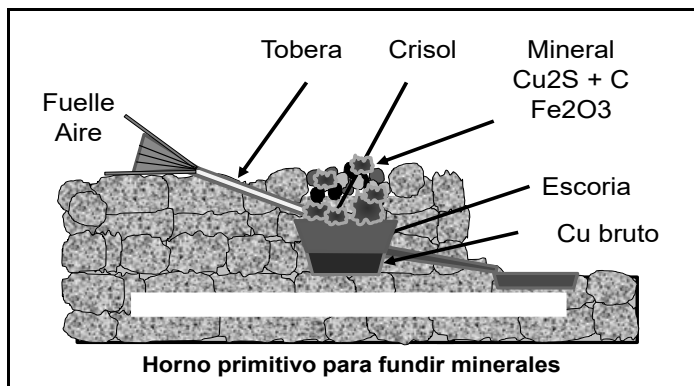
Desde un comienzo el hombre por ensayo y error, observó que, al seleccionar los minerales, triturarlos y molerlos junto con carbón vegetal, la eficiencia de la reducción mejoraba considerablemente, para obtener metales fundidos. El proceso básicamente consistía en:

1. Seleccionar los minerales por color y densidad.
2. Triturar y moler el mineral hasta obtener un polvo fino, sulfuro de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ).
3. Secar los minerales para eliminar la humedad.
4. Mezclar el polvo seco de mineral con carbón vegetal y cargar el horno.
5. Adicionar mineral de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), cal ( $\text{CaO}$ ) y arena ( $\text{SiO}_2$ ) como fundentes.
6. Alimentar el horno con carbón vegetal para elevar la temperatura.

7. Avivar el fuego con un sistema de soplo de aire con fuelle para aumentar la temperatura.

El plomo y la plata fueron otros metales que el hombre logró obtener a partir de minerales desde tiempos inmemorables y no han sido incluidos en una era específica. La galena como tal - sulfuro de plomo ( $\text{PbS}$ ) - se utilizó primero para ornamentación. Los antiguos obtuvieron plomo a partir de este mineral al someterlo al fuego (calcinación). La pieza de plomo más antigua conocida se remonta a 6.500 años a. C. y se descubrió en Çatal Hüyük, “Çatal Huyuk: A Neolithic Town in Anatolia. London: Thames & Hudson 1967”, Mellaart, J. 1964 [16]. La figura 3 muestra el esquema de un horno para fundir minerales en el Medio Oriente, 3.000 años a C.

**Figura 3: Esquema de un horno primitivo para fundir minerales.**



Fuente: Diseño mejorado por el autor tomado de “Historia de la Metalurgia de R. F. Tylecote”.

Por otra parte, se ha demostrado que los pobladores de América, tanto los Mayas al norte, los Chibchas en los Andes colombianos y la cultura pre inca Chavín de Huántar, al sur, 900 a 500 años a. C., fabricaban diferentes aleaciones a partir de minerales, entre las que se destacan aleaciones binarias y en las que trabajaban bronce de cobre-plata ( $\text{Cu-Ag}$ ), cobre-estaño ( $\text{Cu-Sn}$ ), bronce arsenicales ( $\text{Cu-As}$ ), bronce al antimonio ( $\text{Cu-Sb}$ ), cobre al plomo ( $\text{Cu-Pb}$ ) y latón ( $\text{Cu-Zn}$ ). De las aleaciones ternarias conocían la tumbaga de oro, plata y cobre ( $\text{Au-Ag-Cu}$ ) y otras aleaciones de cobre, estaño y arsénico ( $\text{Cu-Sn-As}$ ) y de cobre, plata y plomo ( $\text{Cu-Ag-Pb}$ ). Sin embargo, no todas las culturas sabían fabricar todas las aleaciones, sino que

dependía de los minerales presentes en cada zona, “*Qué sabían de fundición los antiguos habitantes de Mesoamérica. Parte I*”; Grinberg, D. (2004) [17]. En la figura 4, se puede ver una hornilla (*cultura Huayra*); Cruz, P. et All (2008) [18] usada en Perú antes de la llegada de los españoles, para fundir minerales de cobre, plomo y plata, según la descripción detallada que hizo el cronista español Álvaro Alonso Barba, quien describió la metalurgia utilizada en Potosí- Bolivia.

**Figura 4: Hornilla Huayra para fundir minerales de cobre, plomo y plata en época prehispánica.**



*Fuente: Fotos tomadas de Internet. Horno de fundición prehispánico.*

Se trataba de una hornilla portátil cilíndrica fabricada con arcilla que tenía varios agujeros laterales por donde entraba el aire (ventilación natural), el cual avivaba el carbón vegetal, calcinando y fundiendo los minerales cargados. En la base, la hornilla disponía de un recipiente también de arcilla que servía de crisol y en el cual quedaba depositado el metal fundido para luego refinarlo. La altura de la hornilla oscilaba entre 0,4 m y 1,7 m. Según el cronista Barba, las hornillas se cargaban en proporción 1:1; es decir una carga de mineral y otra de carbón vegetal mezclado con estiércol de las llamas y otros materiales orgánicos. Normalmente se encendían en la noche, en la cima de las colinas donde el viento era muy fuerte, logrando mantener la combustión a alta temperatura para reducir y fundir el mineral cargado.