

CAPÍTULO 8: FABRICACIÓN DE ACERO

8.1. INTRODUCCIÓN

El modo más antiguo de transformar el arrabio en un material forjable fue inventado por **Reamur** en el siglo XVII. Consistía en obtener una fundición maleable, por lo menos superficialmente, por un tratamiento de descarburación. Pero este proceso cayó en desuso por las dificultades involucradas, lentitud del proceso y oxidación del hierro.

Quince años más tarde, **Benjamín Huntsmann** conseguía fundir acero en un horno a crisol. Fabricó sus propios crisoles de tierras susceptibles de soportar temperaturas del orden de 1700° C, fue el primero que consiguió la fusión del acero en un horno a coque. Pero este proceso no tuvo gran difusión. Era demasiado caro. Desde fines del siglo XVIII todas las invenciones siderúrgicas que se efectuaron tuvieron por objeto transformar la fundición producida por el Alto Horno.

Mientras Wilkinson perfeccionaba el cubilote para refundir el arrabio, otro inglés **Henry Cort**, inventaba el horno de pudelar (1784). El principio del pudelado es el refinado del arrabio líquido por oxidación. Según el diagrama hierro - carbono, la descarburación tiene como consecuencia un aumento de la temperatura de solidificación. Así, el acero que se obtenía al final de la operación de pudelado se encontraba en forma de masas pastosas, que se forjaban en el martinete para eliminar la escoria atrapada.

Este tratamiento se efectuaba en el horno de reverbero. La Figura 1a es un esquema de un horno reverbero antiguo que fue ideado por **Cort**. Se movía la masa fundida de arrabio en presencia de una corriente de aire superficial. Además del carbono se eliminaba silicio, manganeso y fósforo. En hornos de 250kg era posible producir 4 t en 24 horas. La Figura 1b muestra el proceso completo de fabricación de hierro y acero.

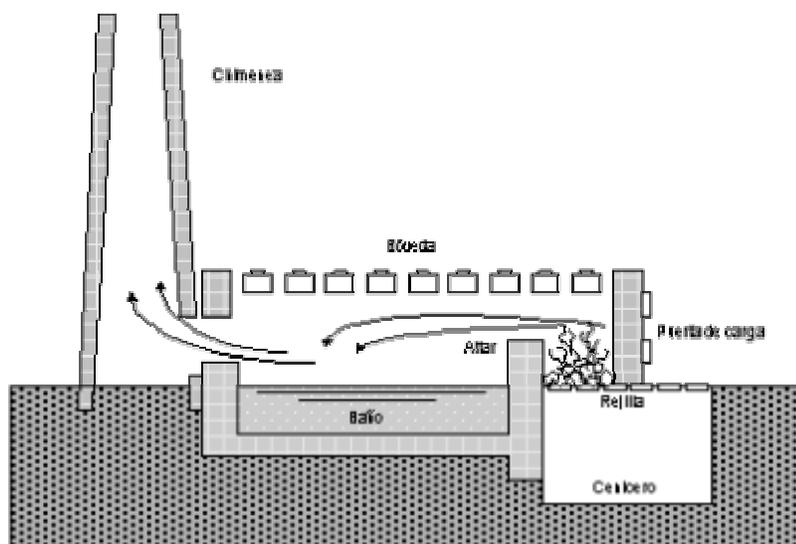


Figura 1a: Esquema de Horno Reverbero Antiguo

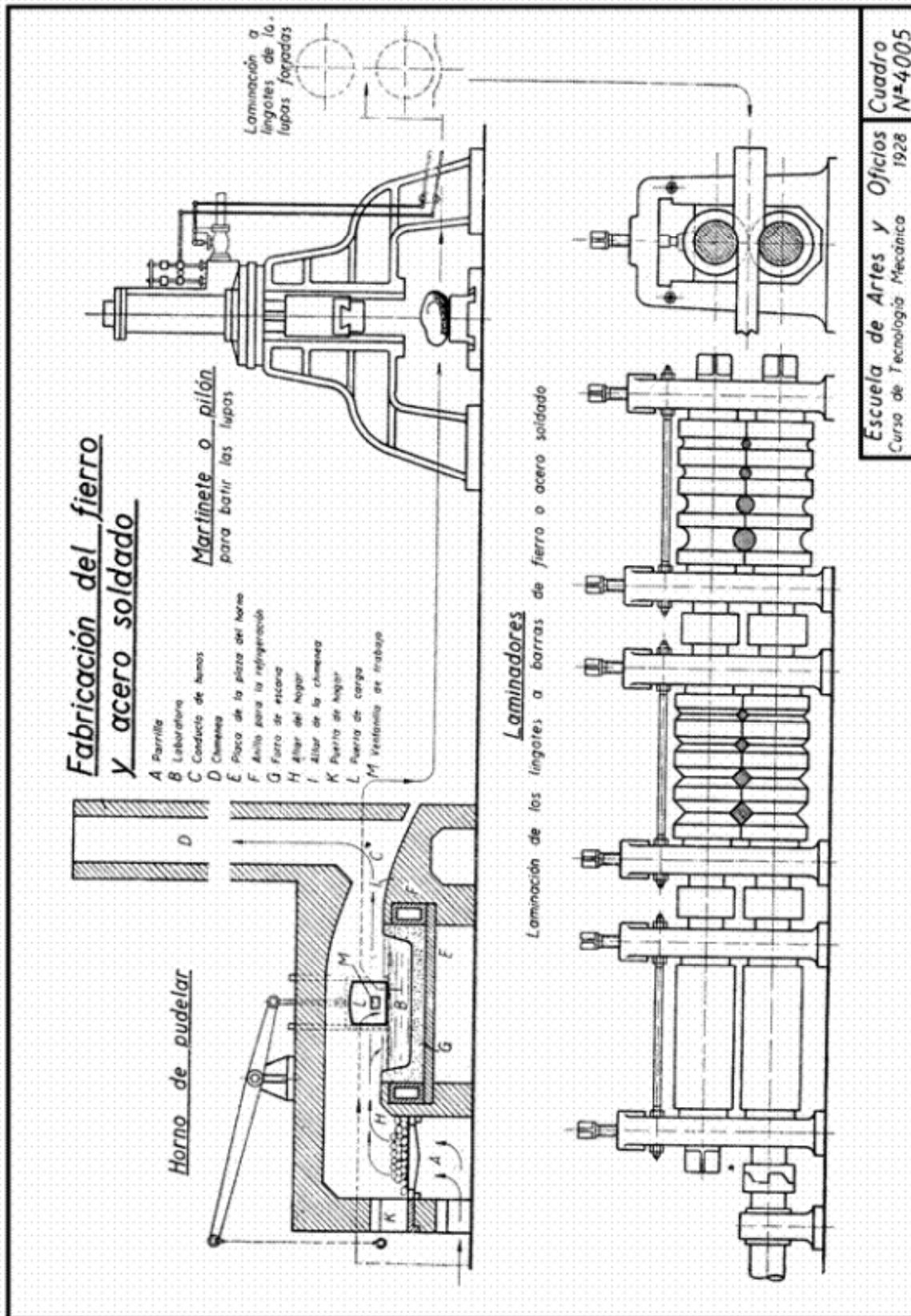


Figura 1b: Fabricación de hierro y acero



En el plano tecnológico, el invento era el horno reverbero mismo, llamado así porque el hogar lateral no calienta la carga, sino que a la bóveda, que "reverbera" o irradia el calor hacia el baño metálico.

El producto así obtenido podía usarse para fabricar piezas forjadas. La fundición de piezas de acero debía aguardar la llegada de métodos de fabricación de acero que permitiera obtenerlos en estado líquido.

8.2. EL PROCESO BESSEMER

Todo el concepto del acero cambió drásticamente en el siglo 19. Un material de construcción totalmente dúctil, tenaz no posible de endurecer por temple pero capaz de ser producido y conformado por trabajo mecánico en forma barata en gran escala. La era moderna del acero se había iniciado. El punto de partida fue un experimento hecho por Henry Bessemer en Inglaterra, 1855, independientemente por William Kelly en E.E.U.U. Tratando de mejorar el proceso de pudelado por aplicación de un chiflón de aire caliente al arrabio hizo dos descubrimientos. Primero, el aire removía rápidamente el carbono y silicio del hierro. Segundo, y más sorprendente, el calor liberado por la oxidación de las impurezas del hierro fue suficiente para mantener al hierro en estado líquido y aún más aumentar su temperatura hacia el rango de la fabricación de acero (1600-1650°C). Inmediatamente se vio la importancia de esto y trabajando con celeridad y coraje, desarrolló su proceso de convertidor que anunció a la Asociación Británica en 1856.

El proceso es espectacular tanto en su concepción como operación. El convertidor es un recipiente con forma de huevo revestido de material refractario capaz de contener varias toneladas de hierro líquido (Figura 2 y 3). Tiene la boca abierta en la parte superior, toberas para introducir el aire a una presión de 15 libras en la parte inferior y puede ser rotado hacia la posición vertical de modo que el arrabio fundido descansa sobre el chorro de aire que entra por debajo por 49 toberas de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, que atraviesan el ladrillo. Después de 15 - 20 minutos, el convertidor se vuelve a la posición horizontal, se corta el aire y el acero está listo para ser vaciado. Su contenido es vaciado a una olla con la cual se llenan moldes o lingoteras. La olla esta construida de acero de 4 pies de profundidad y 42" de diámetro, esta revestida con arena, y tiene un tapón de arena cubierto con arena, y tiene un casquillo en el fondo. Cuando se saca el tapón el acero fundido fluye dentro del molde, y los lingotes cuando son enfriados están listos para ser desmoldeados. La olla se levanta con poder hidráulico con las mismas bombas que dan el giro al convertidor.

Este es un proceso muy barato de fabricación del acero. El recipiente es simple. No requiere combustible, más que el proveído por las impurezas en el metal. Se obtienen grandes cantidades, por ejemplo, 25 t de acero hecho en 20 minutos. El proceso puede apreciarse en al Figura 4.

El producto original de Bessemer no pudo ser colado satisfactoriamente en moldes de lingote, contenía demasiado oxígeno. Este se combinaba con el carbono en el metal al

enfriarse y las burbujas de CO así formadas hacían que el metal hirviera en el molde. Este problema fue resuelto en 1857 por Robert Mushet, que desoxidó el acero agregándole un poco de manganeso en forma de hierro - manganeso (80% Mn, 5% C, 1% Si), antes de colar.

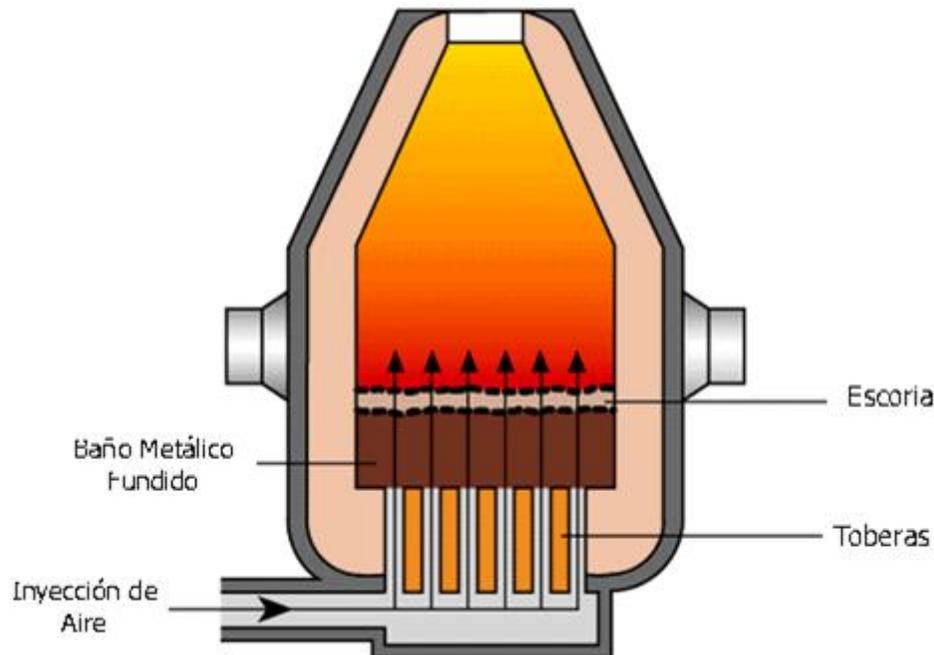


Figura 2: Convertidor Bessemer

La etapa final de remoción de oxígeno, llamado calmado, es importante en todos los procesos de fabricación de acero. El contenido de oxígeno debe ajustarse al nivel requerido para un lingote en particular a ser producido (es decir, calmado, semi-calmado, o efervescente), y las concentraciones de silicio, manganeso o carbono pueden aumentarse agregándolos en las concentraciones adecuadas dentro de la composición requerida.

El manganeso, que queda en el acero después de la desoxidación tiene además la función de combinarse con el azufre y convierte así la peligrosa película de sulfuro de hierro (punto de fusión aproximadamente 900°C, temperatura que está en el rango de forjado de acero, luego el FeS líquido presente entre los granos del acero hace que éste se raje durante la forja) en fragilidad en caliente en glóbulos de sulfuro de manganeso que son inocuos pues se funden a aproximadamente a 1600°C.

Bessemer fue afortunado al usar arrabio que no contenía fósforo. Pues cuando su proceso fue aplicado al arrabio más corriente que contenía fósforo fracasó completamente porque el fósforo se mantenía en el acero y lo fragilizaba. Comparando con el proceso de pudelado, la diferencia vital aquí fue la temperatura mucho más alta, ya que el fósforo no es oxidado a altas temperaturas en presencia de hierro.

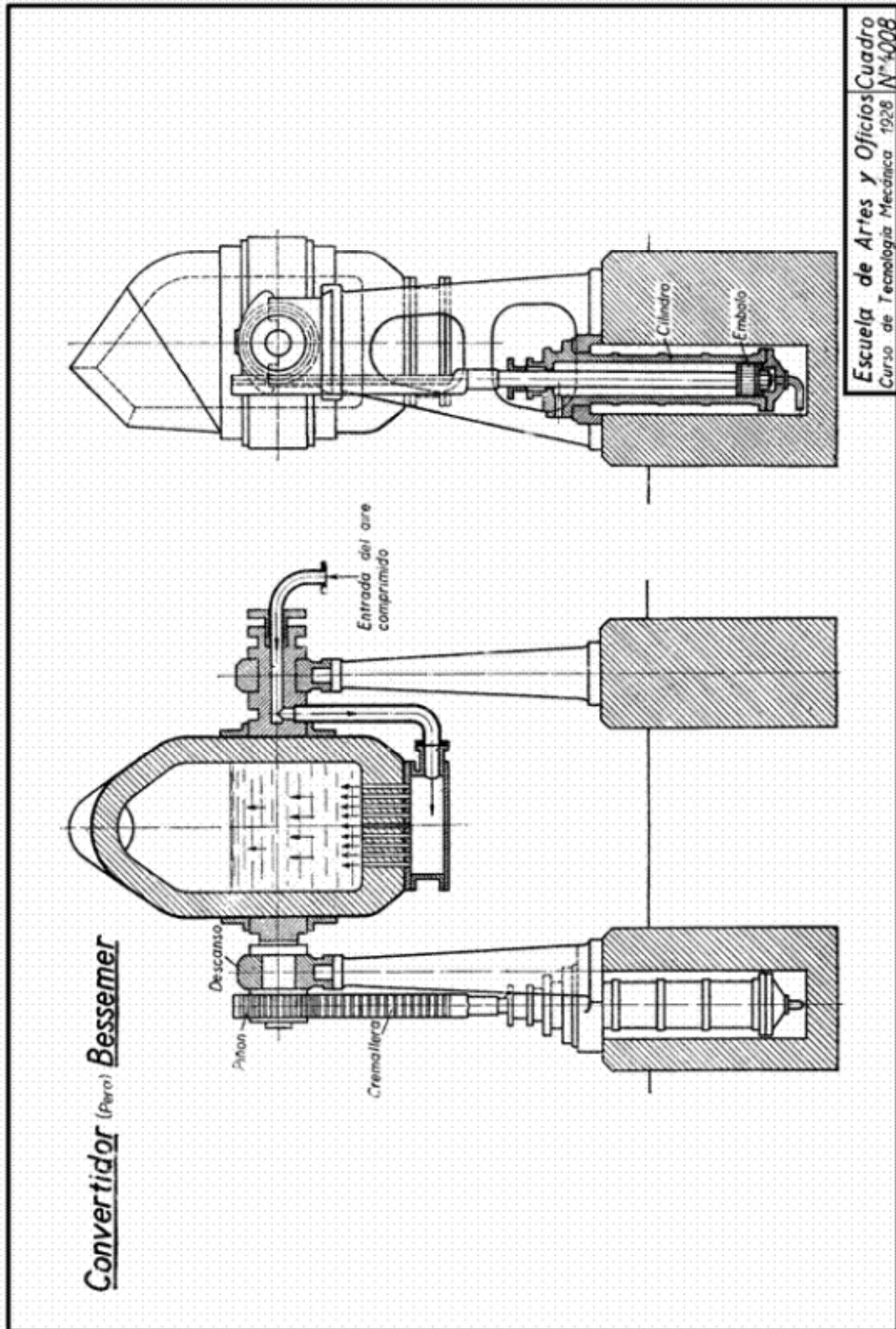


Figura 3: Convertidor Bessemer

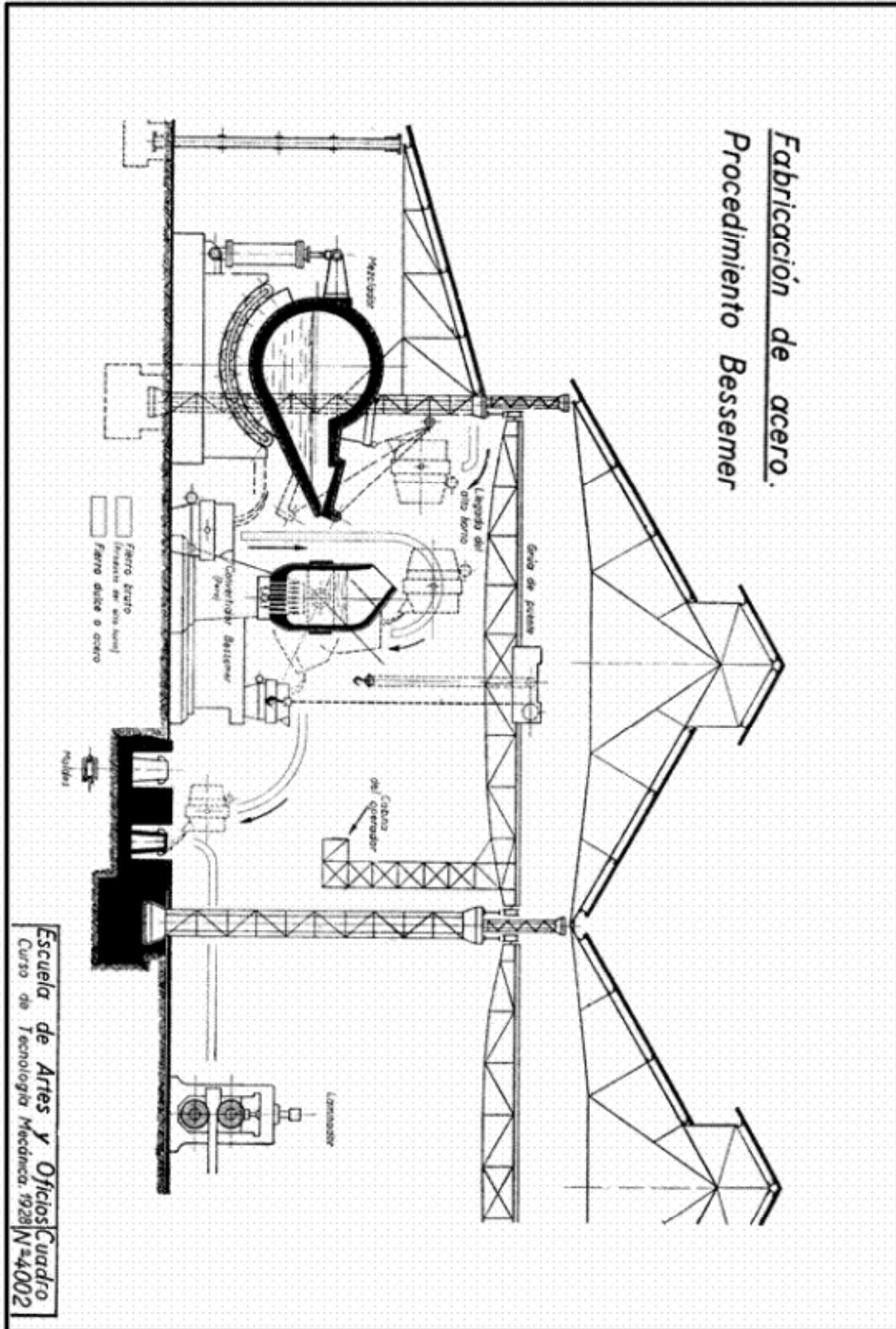


Figura 4: Proceso Bessemer



Bessemer no pudo resolver este problema y tuvo que restringir su proceso al de los hierros sin fósforo ya que su convertidor usaba revestimiento de refractario arcilloso y era operado en lo que se llama proceso ácido, o sea que la escoria es a base de SiO_2 . El fósforo no puede ser eliminado del hierro bajo esas condiciones porque su propio óxido (P_2O_5) es ácido y no se combina con escoria ácida y obviamente no podemos formar escoria básica (a base de CaO) en un horno de revestimiento ácido, pues al poco tiempo no quedaría revestimiento.

El problema no fue resuelto hasta 1878, cuando Thomas y Gilchrist usaron revestimiento básico de dolomita calcinada (MgO-CaO) para poder formar una escoria rica en CaO y así remover el fósforo en forma de fosfato de calcio. Así se hizo popular el proceso Thomas o proceso Bessemer básico.

El convertidor es cargado con arrabio fundido a una temperatura de 1350°C y se debe suministrar calor durante el refinado para elevar la temperatura del metal y asegurar que esté lo suficientemente fluido para vaciarlo cuando se terminen las reacciones. Además se debe suministrar energía térmica para los siguientes requerimientos del proceso:

- Elevar la temperatura del aire de soplado de ambiente (25°C) hasta la del metal fundido.
- Fundir los sólidos que se agregan para formar la escoria.
- Compensar las pérdidas de calor.

La energía térmica se obtiene desde las reacciones exotérmicas entre las impurezas disueltas en el metal y el oxígeno contenido en el aire de soplado. Las principales impurezas son carbono, silicio y manganeso. En el proceso Bessemer la mayor parte del calor necesario es suministrado por la oxidación del silicio, por eso el arrabio debe tener a lo menos 2% de Si.



La figura 5 muestra la secuencia de eliminación de elementos durante el proceso.

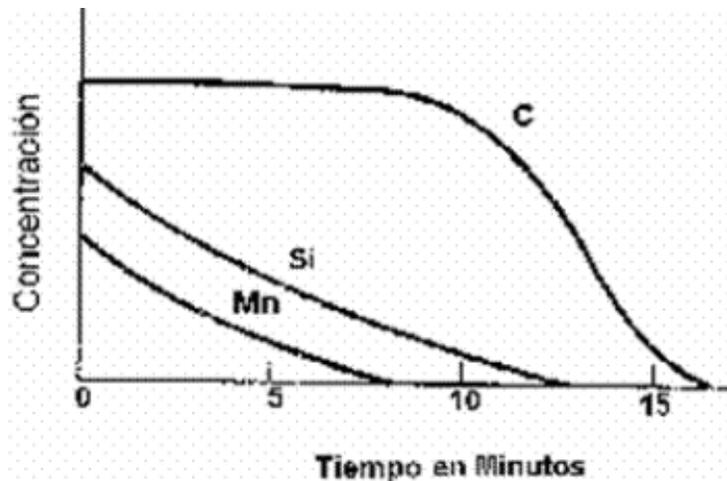


Figura 5: Secuencia de eliminación de elementos durante el proceso Bessemer

Primero, durante los primeros 4 a 6 minutos, cuando la temperatura es alrededor de 1200°C , el silicio y el manganeso son oxidados y se produce una llama corta, con chispas, de color blanco – rojizo, en la boca del convertidor. A medida que baja la concentración de estos elementos el carbono del metal empieza a oxidarse. La llama se alarga y es más luminosa y de color blanco debido a que se quema CO . Después de unos 12 minutos, cuando el carbono se acaba la llama se corta bruscamente, reaparece por un corto tiempo y es reemplazada por un humo café, esta es la señal que indica ladear el convertidor y cortar el aire. Se agrega ahora el desoxidante de manganeso. El carbono en este material ayuda a dosificar el acero hacia su valor final (por ejemplo 0.5% para rieles de ferrocarril), pero también se puede agregar carbón antracita cuando es necesario. Se saca la escoria, que consiste principalmente en SiO_2 con algo de FeO y MnO que se formó durante el soplado y luego se procede al vaciado en la cuchara.

El rango de composición del metal está muy limitado en la conversión ácida puesto que no puede refinarse ni azufre ni fósforo del baño. En contacto con oxígeno, el fósforo en el metal es oxidado fácilmente a pentóxido de fósforo (P_2O_5), sin embargo este compuesto es inestable en presencia de carbono, silicio, manganeso u otros que formen óxidos más estables. Para lograr estabilizar este óxido es necesario que la escoria sea básica, con lo cual ésta toma un rol activo en el proceso de refinación.

La remoción de azufre desde el metal también mejora cuando aumenta la basicidad de la escoria, pero en contraste con la eliminación del fósforo, el azufre se remueve bajo un atmósfera reductora dentro del horno.

Con el desarrollo del revestimiento básico y la posibilidad de operar con escorias básicas se cubrió todo el rango de composiciones para el refinado y el proceso fue extendido.

Al convertidor básico se carga CaO junto al arrabio básico y que contiene fósforo y algo del calor necesario es suministrado por la oxidación del fósforo. Así el contenido inicial debe ser por lo menos 1.7%P. La Figura 6 muestra la secuencia del cambio.



$$\Delta H^\circ = -1200 \text{ kJ/mol P} = - \text{kcal/mol Fe}$$

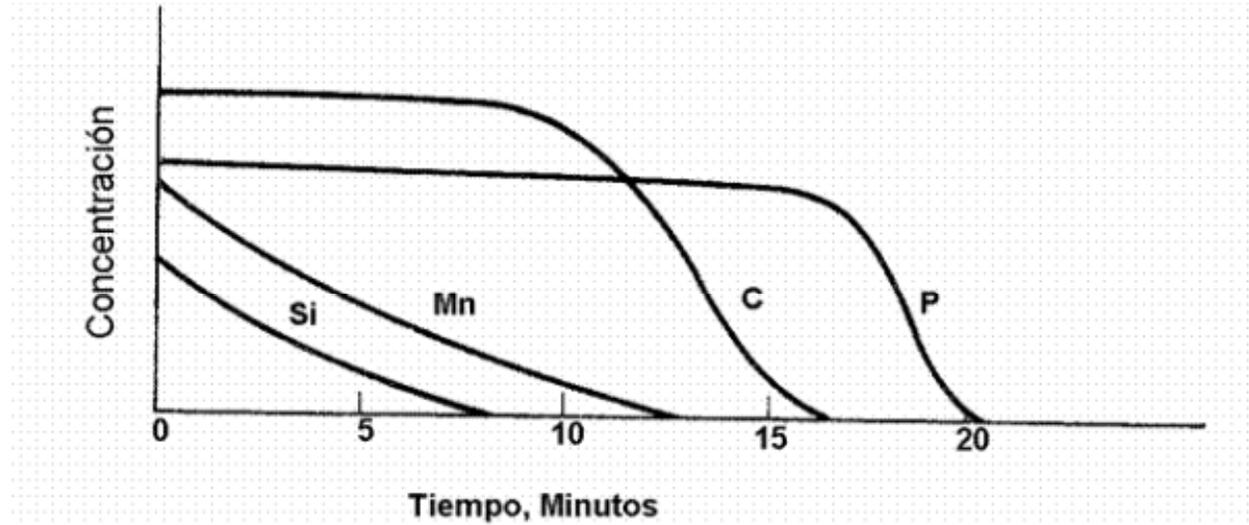


Figura 6: Secuencia del cambio en un convertidor básico.

La primera etapa es completada antes porque hay menos silicio en el hierro básico. Después que la llama de CO se acorta, el proceso continúa por 3 - 4 minutos más para la eliminación del fósforo. Se emiten humos densos de color café del óxido de hierro durante esta etapa, ya que no es posible oxidar el fósforo sin oxidar también el hierro. El fósforo no puede ser removido antes porque el CaO no puede asimilar el P_2O_5 hasta que se haya transformado en una escoria fluida.

A continuación el convertidor es puesto en posición horizontal y se corta el aire. Se saca la escoria (antes de desoxidar, de lo contrario el fósforo se reduciría y volvería al baño de hierro) y el metal es desoxidado con manganeso. Debido a la casi completa eliminación del carbono que es necesario antes de poder eliminar el fósforo, el acero Thomas es usado principalmente para fabricar acero de bajo carbono (0.1% C).

En el proceso Bessemer se elimina muy poco azufre. Un método para desulfurar arrabio, antes de hacer acero fue desarrollado para arrabio que no tiene el azufre suficientemente bajo. El metal líquido es vaciado del Alto Horno sobre ceniza de Soda ($NaCO_3$) que se pone en el fondo de la cuchara. El calor descompone el $NaCO_3$ y el azufre se extrae como sulfuro de Sodio en la escoria de Na_2S y SiO_2 . En acero de buena calidad el azufre debe estar debajo de 0.04%. El proceso Bessemer no permite la eliminación de fósforo, así que para obtener un acero bueno por este proceso, el arrabio debe contener menos de 0.04% P. Los aceros de convertidor tienden a tener 0.015% N absorbido del aire que se sopla a través del baño. El nitrógeno ayuda a endurecer al acero lo que es bueno para algunas aplicaciones. Para otras aplicaciones tales como hojalata de acero es perjudicial pues lo fragilaza. Para reducir el nitrógeno, se puede soplar con oxígeno puro mezclado con vapor de agua. El proceso de convertidor ha caído en desuso por varias razones y la gran mayoría de las acerías del mundo cambiaron al proceso Siemens-Martin. Pero en estos días todas las acerías del mundo cambiaron al convertidor en forma modificada, en vez de soplar con aire se sopla con oxígeno puro.

8.3. EL PROCESO SIEMENS - MARTIN (OPEN-HEARTH)

Hasta la década del 60 el 80% del acero en el mundo fue hecho en el horno Siemens-Martin (HSM) (proceso básico). Esto produce principalmente "acero al carbono" con el siguiente rango de composición 0.1 - 1.7% C, 0.2% Si, 0.4%Mn, 0.05% S y 0.05% P. El proceso fue inventado por Siemens y Martin en 1865-7. En esa época la gente miraba críticamente el proceso Bessemer y por esto fue adoptado ampliamente como la base de la industria del acero en rápida expansión. También tenía la ventaja, comparado con el del convertidor, que se podía usar gran cantidad de carga fría o sea chatarra de acero (50% de chatarra y 50% de arrabio) que en 1870 ya era ampliamente obtenible. Cuando llegó el proceso Thomas muchos países desarrollados (Inglaterra) ya tenían su industria formada en base al Siemens-Martin. Pero otros países que recién comenzaban, formaron su acería en base al proceso Thomas.

El proceso Siemens-Martin fue desarrollado aplicando el principio de regeneración de precalentamiento del horno reverbero (Figura 7 y 8). Las temperaturas más altas que podían obtenerse alcanzaban a mantener en forma líquida aún el acero de bajo carbono. En este proceso el gas y el aire son precalentados separadamente en dos cámaras de ladrillos refractarios y los gases calientes pasan a través de otras dos cámaras. Luego se invierte el proceso. En algunos hornos se usa petróleo en vez de gas.

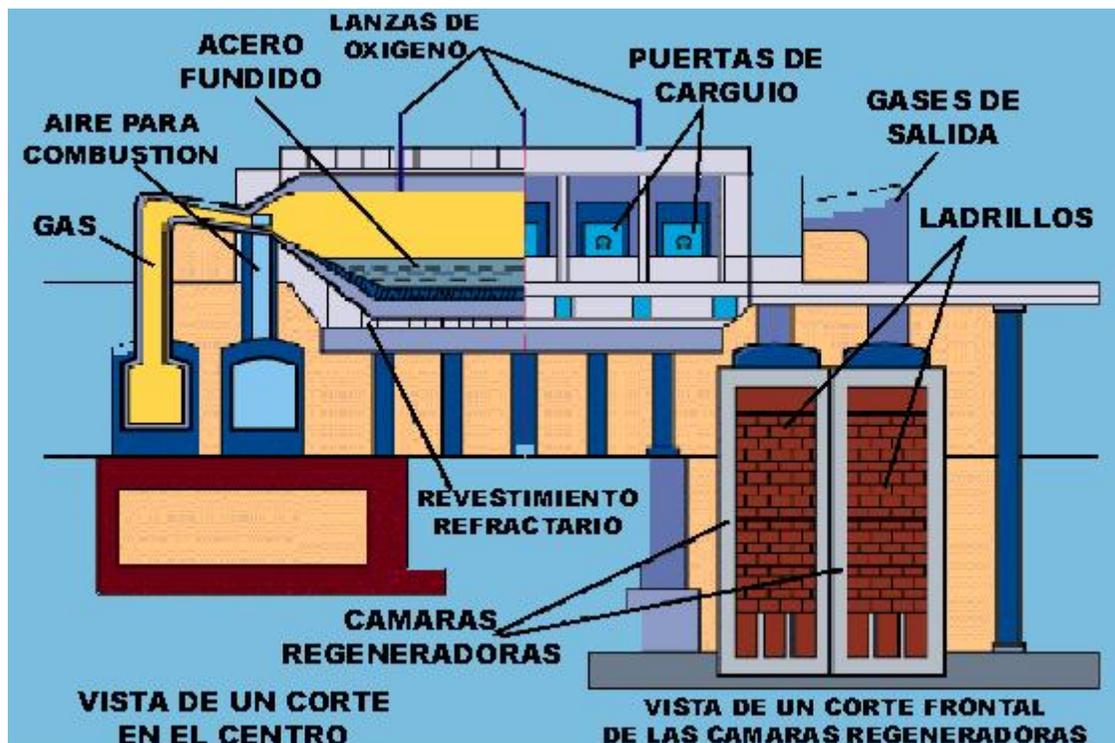


Figura 7: Horno de Solera Abierta (Open Hearth) Siemens – Martín.

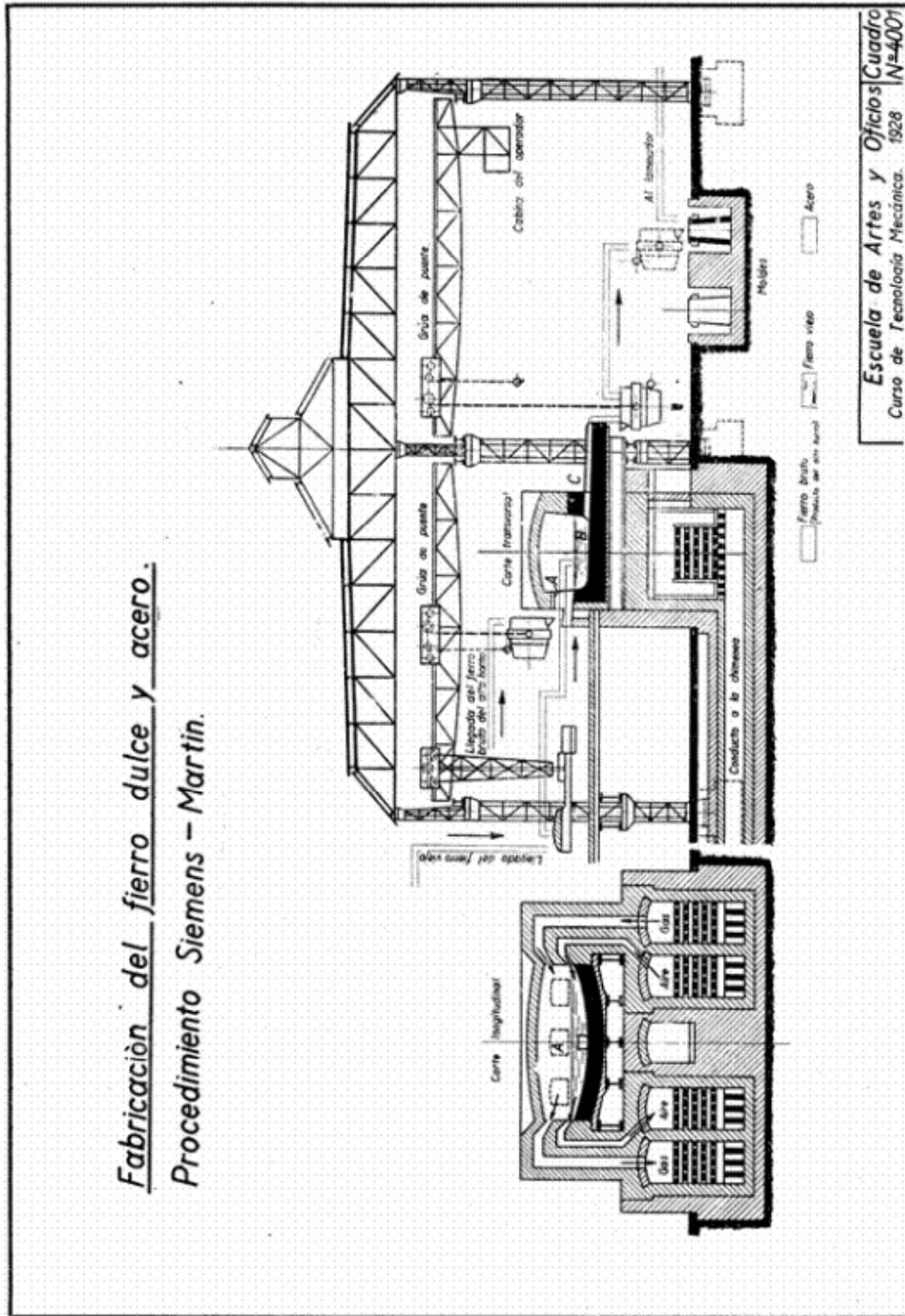


Figura 8: Proceso Siemens-Martin



Los H.S.M. más grandes hacen 500 t de acero por carga y hornada y a veces pueden ser inclinados para descargar. El proceso es lento, 5 horas para cargar, 4 para fusión y formación de la escoria y 3 para el refinado, finalizado y descarga. Debido a esto y el mayor costo de la planta, es más caro que el proceso Bessemer. Por otro lado por su lentitud hay tiempo para efectuar análisis químico de las muestras de metal tomadas del baño y generalmente permite un control más preciso de la fabricación del acero.

El proceso consiste en la oxidación controlada, por adición de óxido de hierro al baño. La escoria juega una parte esencial y el propósito es controlar la actividad (el contenido efectivo) del oxígeno en la escoria por adición de óxido de hierro (Fe_2O_3) o cascarilla de laminación (Fe_3O_4), de modo que el oxígeno en el baño, en equilibrio aproximado con la escoria, lleva la composición del metal al valor deseado. El baño poco profundo, con su gran superficie, permite el contacto fácil necesario entre el metal y la escoria.

El proceso de refinado es básicamente similar al correspondiente al proceso de convertidor. Primero se oxida el Si y el Mn y se van a la escoria. El baño está calmado en esta etapa. Después viene el "hervido" del baño durante el cual se oxida el carbono y se forman burbujas de CO que irrumpen en la superficie del baño dando la impresión de hervor. El baño se aquieta nuevamente cuando la mayor parte del carbono se ha ido. El ajuste final se hace por desoxidación con coque o arrabio para llevar el carbono al nivel requerido.

El proceso básico SM tiene la gran ventaja sobre el Thomas que el fósforo puede ser extraído antes de sacar todo el carbono, como la escoria se hace cargando óxido de hierro con la cal (CaO), esta escoria puede formarse mientras aún hay carbono en el metal.

Su formación ya no depende de producir óxido de hierro en el metal del baño, que a su vez dependía de la eliminación del carbono. Aún más, como la llama del horno incide directamente encima de la escoria, flotando en el metal, una escoria totalmente fundida se produce tempranamente en el proceso. Esta eliminación temprana del fósforo aumenta la flexibilidad del proceso SM y permite obtener un rango más amplio en el contenido de carbono de los aceros (0.08 a 0.8% C).

8.4. LINGOTES DE ACERO CALMADO Y EFERVESCENTES

La mayor parte del acero es moldeado en moldes metálicos, llamados lingoteras (hechos de fundición gris) de sección cuadrada o rectangular de dos metros de altura aproximadamente y con una pequeña conicidad que facilita el desmoldeo del lingote de acero).

Los lingotes pueden pesar entre 3 y 10 t. Estos lingotes son recalentados y luego laminados a barras y productos planos.

Las lingoteras son llenadas vaciando las cucharas por un orificio que estas tienen en su parte inferior (Ver figura 9)

Cuando el acero calmado (desoxidado) solidifica, la contracción que sufre el metal produce una gran cantidad de contracción llamada rechupe, como lo muestra la figura A. Esta parte defectuosa del lingote debe ser cortada y vuelta al proceso para su refusión (chatarra) lo que baja la productividad.

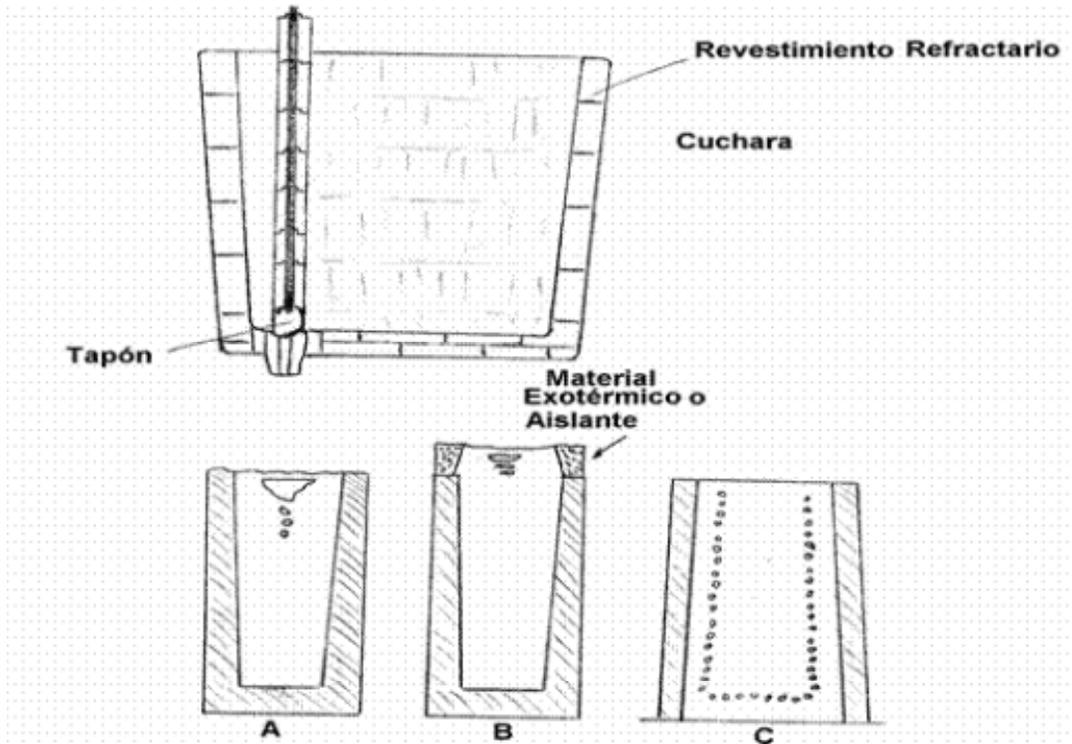


Figura 9: Vaciado de Lingoteras

El efecto puede ser minimizado retardando la solidificación en la parte superior del molde, de modo que siempre haya una reserva de líquido que puede alimentar el lingote a medida que solidifica y se contrae. Esto se hace colocando un material aislante refractario o aún exotérmico en la parte superior Figura 9B. Aunque esto es considerablemente mejor, la operación de remoción del metal de esa parte y el metal mismo aumenta el costo del lingote. La alternativa es compensar la contracción del metal permitiendo que una pequeña cantidad de CO forme burbujas durante la solidificación. Esto es lo que se hace cuando se obtienen aceros efervescentes. Estos son aceros de bajo carbono (0.15% C), generalmente usados para fabricar hojalata. En este caso no se agrega Silicio para desoxidar el baño, si no que se agrega algo de Manganeso a la cuchara. Con un control cuidadoso la efervescencia del CO es retardada hasta que haya solidificado más o menos una pulgada de acero junto a la pared del molde. Se forman entonces las burbujas; estas compensan la contracción de solidificación, de modo que no se forme el rechupe y no haya que eliminar nada del lingote Figura 4C. Las burbujas de CO se sueldan durante la forja del lingote. Otra ventaja es que el oxígeno del metal, atrapa carbono de la primera capa al solidificar, de modo que éste es acero muy dúctil, sin carbono. Esta piel blanda da al metal un buen terminado, después de la laminación y el prensado.

8.5. FABRICACIÓN DE ACERO EN HORNO ELÉCTRICO

Alrededor de un cuarto del acero producido mundialmente se lleva a cabo en el horno de arco eléctrico tal como el indicado en la figura 10 y 11. Este método usa arcos de alta corriente eléctrica para fundir chatarra de acero y convertirlo en acero líquido de una composición química y temperatura específica. El calentamiento externo del arco permite un mejor control térmico que el proceso básico al oxígeno, en donde el calentamiento es acompañado por la oxidación exotérmica de los elementos contenidos en la carga. Esto permite fabricar aceros de calidad y aceros especiales a partir de chatarra por que es posible la adición de más aleantes que los posibles en la acería básica al oxígeno, tales como; Ni, Cr, Mn, V, Mo, W, Nb, Ti, que son agregados en forma de ferro-aleaciones. La mayoría de estos elementos son más oxidables que el hierro. Luego sería imposible hacer la mayoría de estos aceros de aleación bajo las condiciones oxidantes que existen en el convertidor o en el Siemens-Martin ya que, por ejemplo el vanadio se oxidaría según.



En este ambiente reductor pueden hacerse las adiciones de ferro-manganeso, ferro-cromo, ferro-vanadio, etc., para que no se pierdan por oxidación. Este proceso de doble escoria no sería posible en un horno del tamaño como el S.M. Para hacer aceros especiales o aleados, tenemos que reducir la actividad del oxígeno en el horno y trabajar a temperaturas más altas de modo que los elementos de aleación sean más reducibles en relación al carbono. El arco eléctrico permite ambas cosas. El arco caliente del electrodo de carbono provee una atmósfera ligeramente reductora. Las altas temperaturas (1800°C) pueden ser alcanzadas en el baño sin que se dañe excesivamente el techo del horno, comparado con el horno S.M., ya que hay una llama muy pequeña en el horno eléctrico.

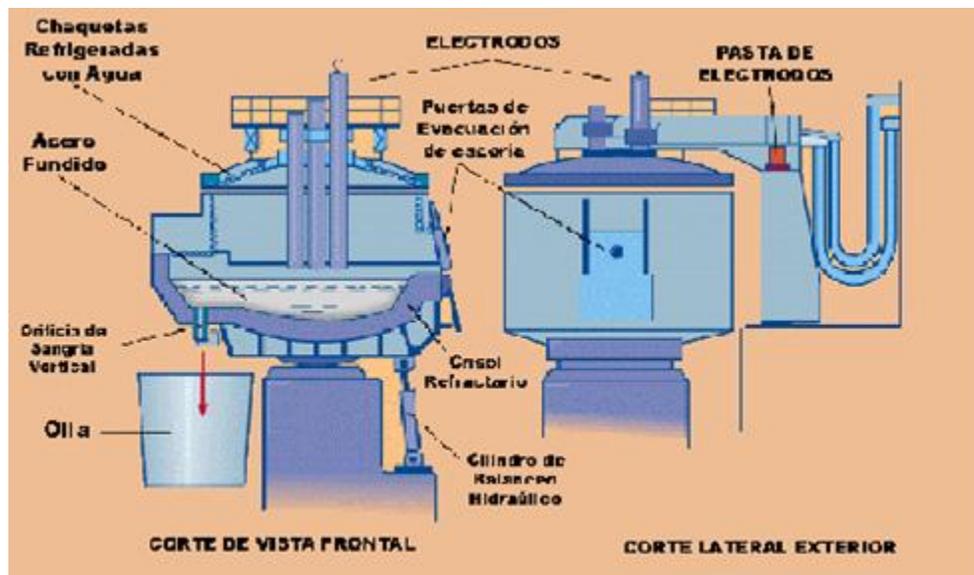


Figura 10: Horno eléctrico de obtención de Acero.



Sin embargo, la acería eléctrica no es oxidante, y la mezcla escoria-metal no es intensa, por lo tanto, el contenido de carbono es mayor al 0.05 %. Además, generalmente existe un alto contenido de nitrógeno de 40 a 120 partes por millón, comparado con las 30 a 50 partes por millón de acería básica al oxígeno. El nitrógeno, el cual hace al acero quebradizo, es absorbido por el acero líquido desde el aire en la zona de alta temperatura del arco. El contenido de nitrógeno puede disminuirse soplando otros gases dentro del horno, o calentando con un arco pequeño y aplicando una vigorosa ebullición de monóxido de carbono o argón que agite el baño fundido.

Hornos eléctricos del tamaño de 150 t han sido puestos en uso recientemente y hacen posible que sea rentable, en comparación con el proceso ácido de S.M., fabricar acero al carbono de calidad a partir de chatarra.

8.5.1. LA CARGA

La primera etapa de la fabricación de acero en el horno eléctrico es cargar la chatarra y fundirla con el arco. La chatarra de acero es la mejor carga de material a un horno eléctrico de fabricación de acero, y es fundamental su disponibilidad a bajo costo y apropiada calidad. La importancia de la calidad de la chatarra se manifiesta cuando se fabrica acero de alta ductilidad, el cual debe contener un máximo de impurezas residuales (es decir, cobre, cromo, níquel, molibdeno y estaño) del 0.2 %. La mayoría de estas impurezas están presentes en la chatarra, y en vez de ser oxidadas durante la fabricación de acero, estas se acumulan y aumentan durante el reciclaje del acero. En tales casos algunas acerías aumentan sus cargas de chatarra con hierro reducido directamente o con hierro frío de alto horno, lo cual hace que no contengan residuos. Generalmente, los contenidos de carbono, nitrógeno y residuos más altos se alcanzan en el proceso en arco eléctrico que es menos atractivo para producir aceros de bajo carbono y aceros dúctiles. La mayoría de las canchas de chatarra mantienen grados de chatarra separadas. Las acerías de alta aleación, tales como, productores de acero inoxidable, acumulan, compran y cargan chatarra de composición similar para minimizar los costos de adición de aleantes.

8.5.2. EL HORNO

El horno de arco eléctrico es una nave cilíndrica acostada hecha de placas de acero. Contiene un crisol refractario con forma de plato y tres electrodos verticales que alcanzan el fondo a través de un techo removible con forma de domo (ver figura). El diámetro de la coraza es de 2.5, 6 y 9 metros para hornos de 10, 100 y 300 t. La coraza esta ubicada sobre un balanceador hidráulico que bascula el horno para la evacuación de la escoria. El fondo, es decir, el crisol, esta compuesto por ladrillos de magnesita pegados entre si por alquitrán. Y tiene en un lado un orificio ligeramente inclinado para vaciar la escoria, y un orificio de sangría vertical en el crisol ovalado. Con este último arreglo, el horno necesita ser volteado solo unos 10° para el sangrado produciendo un suave y corto flujo de sangría que disminuye las pérdidas de calor y re - oxidación del acero líquido. Previo al carguío, los orificios de sangría verticales son cerrados



exteriormente mediante un fondo móvil y llenados con arena refractaria.

La mayoría de las paredes del horno son paneles refrigerados con agua, reemplazables, éstas son recubiertas interiormente con rociadores de refractario y escoria para proteger y disminuir las pérdidas de calor. El techo también está hecho de paneles refrigerados con agua y tiene tres aberturas circulares, igualmente espaciadas, para insertar los electrodos cilíndricos. Otra gran abertura, llamada cuarta abertura, se usa para la evacuación de los gases. Para la inyección de lanzas, muestreo, ensayos, inspección y reparaciones, se cuenta con aberturas adicionales en las paredes del horno, con puertas refrigeradas con agua. El techo y los electrodos pueden ser levantados y movidos para el carguío de la chatarra y mantenimiento del crisol.

Los electrodos de grafito, son producidos con altos estándares por una industria especializada. Realmente son secciones de electrodos individuales atornillados entre sí por un hilo y un tornillo ubicado en el inicio de uno y al final de otro. Esto se hace debido a que los electrodos cortos son más fáciles de fabricar, transportar y manejar. El diámetro del electrodo depende del tamaño del horno; Un horno de 100 t usa electrodos de 600 mm de diámetro. Los tres electrodos están atados con abrazaderas a armazones que se extienden sobre el techo del horno y que son atornillados a un mástil móvil ubicado al lado del horno. El mástil controla la distancia entre cada punta del electrodo y la chatarra o baño fundido, regulando así la longitud del arco y el flujo de corriente. El equipo de suministro de potencia es generalmente un transformador de baja, interruptores automáticos, un regulador de electrodo para control del voltaje, y un transformador del horno que es instalado en concreto a corta distancia del horno. Cables fuertes refrigerados con agua y brazos transportadores de potencia conectan el transformador del horno con los electrodos.

Las plantas de horno de acería eléctrica son más pequeñas y más baratas que construir un acería integral, en donde además de acería al oxígeno se cuenta con alto horno, plantas de sinterización y fabricación de coque. El costo - eficiencia es favorable a baja productividad, es decir, 150000 t por año, mientras que un horno al oxígeno básico con su alto horno asociado se puede pagar por sí mismo solo si producen más de 2000000 t de acero líquido por año. Además, el horno eléctrico se puede operar intermitentemente, mientras que el alto horno opera mejor en forma continua. Sin embargo, la potencia eléctrica usada es alta, 360 a 600 kWh por t de acero, y el sistema de potencia instalado es sustancial. Un horno de 100 t tiene frecuentemente un transformador de 70 MVA (70 megavolt-ampere) o 70MW.

8.5.3. EL PROCESO

Después de remover el calor, se saca el techo, se inspecciona el crisol, y cuando sea necesario se repara. A continuación una grúa carga el horno con chatarra por un pote cilíndrico que está abierto en la parte superior para el carguío y cuenta con un fondo ajustable para carguío rápido. Los potes con chatarra son cargados de modo tal que aseguran un amortiguamiento cuando se carga la pesada chatarra sobre el crisol en orden de obtener una buena conductividad eléctrica de la carga, bajo riesgo de fractura



del electrodo y una buena protección de las paredes del horno durante el proceso de fusión. Algunas veces se agrega carbón y formadores de escoria para prevenir la sobre oxidación del baño fundido. Después del carguío el techo se tapa, y se bajan los electrodos. La fusión empieza fijando la potencia a bajos niveles hasta que los electrodos se autocalientan dentro de la chatarra en el tope de la carga, protegiendo las paredes laterales de un sobre calentamiento durante la fusión con alta potencia. Se deja algo de chatarra sin fundir en las paredes para lograr esta protección, un segundo pote se carga y se repite el procedimiento de fusión. La fusión de chatarra fina requiere algunas veces del carguío de tres a cuatro potes.

Después que ha concluido la fusión, el contenido de carbono en el acero está alrededor del 0.25 % sobre el nivel de vaciado final, lo cual previene la sobre oxidación del baño fundido. En este tiempo se ha formado una escoria básica consistente de 55% CaO, 15 de SiO₂ y 15 a 20 % FeO. La frecuente espumación de la escoria es generada por la inyección de carbón o mezclas carbón-cal que reaccionan con el FeO produciendo gas CO. Esta espuma cubre las paredes laterales y permite un alto poder de sedimentación. Así el contenido de carbono del acero disminuye por soplado de oxígeno y aumenta por inyección de carbón.

Se toman muestras, se chequea la temperatura, se agregan componentes, y cuando todas las condiciones están correctas, el horno se descarga rotando el horno hasta que el acero fluya en un chorro o a través de un orificio de sangría vertical a una cuchara. Cuando aparece la escoria, se aplica un volteo rápido y la escoria se descarga a través de la puerta trasera del horno a una olla de escoria. Algunas acerías dejan un 15% de acero líquido dentro del horno. La práctica de este “taco caliente” permite la completa separación de la escoria.

En el horno eléctrico puede producirse un acero muy limpio, es decir, con bajo contenido de oxígeno y azufre, mediante la practicas de dos escoriadas. Algo del Si, P y C pueden ser eliminados por un chorro de oxígeno dirigido sobre el metal con una lanza. Esto tiene la ventaja de refinar el metal rápidamente lo que es importante ya que el proceso de horno eléctrico debe tener una alta productividad ya que la energía eléctrica es costosa. La escoria formada en esta etapa se extrae (escoria oxidante), y se forma una nueva escoria de carácter reductor que consiste principalmente de CaC₂ por adición de cal y coque y aluminio como reductor. La nueva escoria reducida se compone de 65 % CaO, 20% SiO₂, carburo de calcio o alúmina y prácticamente no hay óxido de hierro. Los aleantes que se oxidan fácilmente, se agregan en esta etapa para minimizar las pérdidas y mejorar el control metalúrgico. La refinación continúa bajo la escoria reductora hasta que el calor esta listo para el vaciado. El tiempo total de calentamiento es de una a cuatro horas dependiendo del tipo de acero a hacer, esto es, sobre la cantidad de refinación aplicada y calentamiento auxiliar empleado. Muchas acerías no aplican la práctica de dos escorias, pero tratan el acero después de fundir la chatarra y descargarla, en estaciones de tratamiento en cuchara. Esas plantas metalúrgicas secundarias, permiten al horno eléctrico operar solo como un fundidor de chatarra altamente eficiente.

De vez en cuando las erosionadas puntas de los electrodos por la acción del arco y las

altas temperaturas del horno oxidan los electrodos, así se agregan nuevos electrodos al extremo con hilo. La tasa de consumo de electrodo alcanza los 3 a 6 kilos por t de acero, dependiendo del tipo de operación.

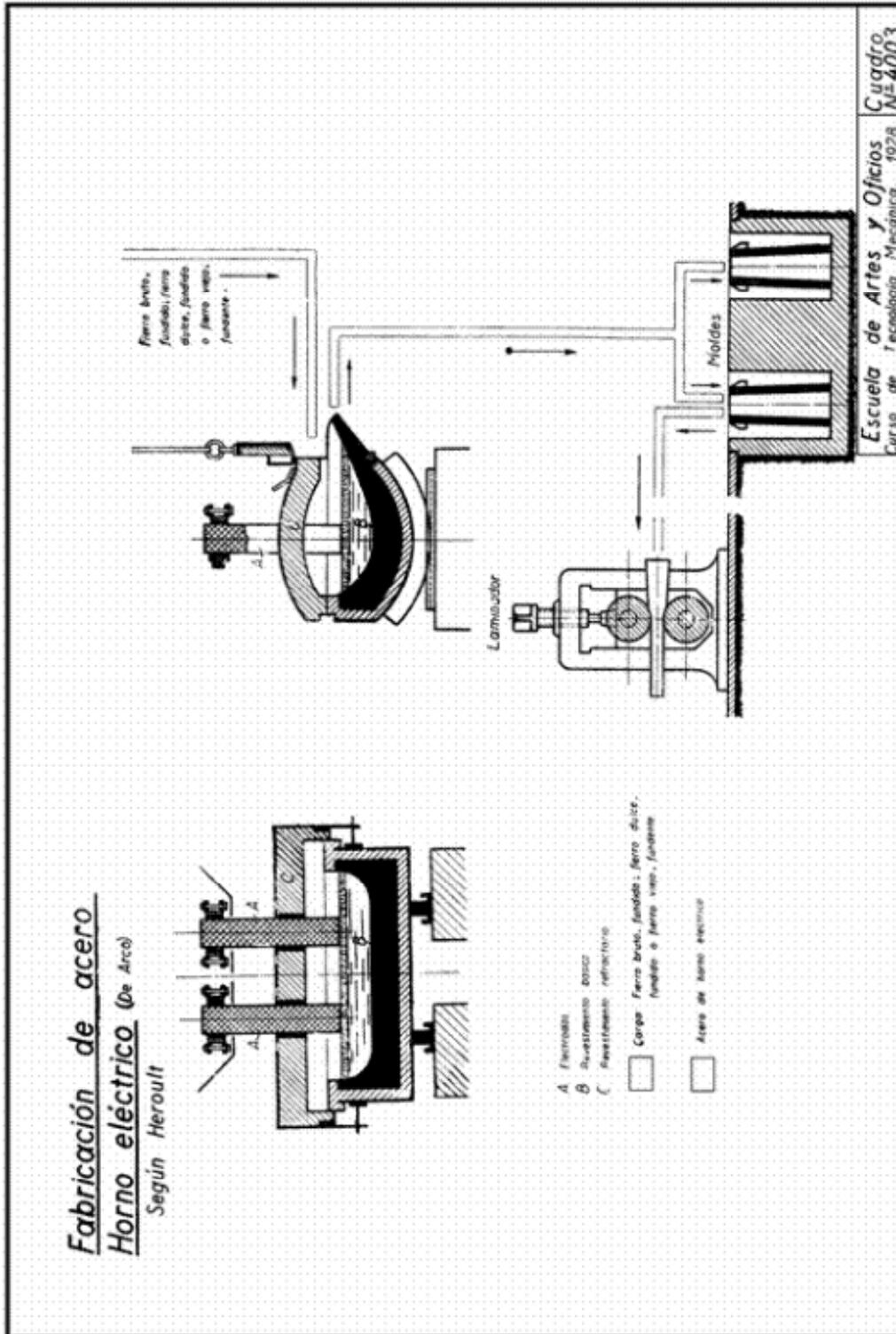


Figura 11: Horno eléctrico



8.5.4. VARIANTES

En orden de alcanzar bajos consumos de potencia, la chatarra puede ser calentada en procesos continuos y discontinuos, utilizando gases de proceso calientes. La chatarra precalentada a 500°C (930°F) disminuye el consumo de potencia a 40 a 50 kWh por t, y disminuye el tiempo de sangrado a sangrado y el consumo de electrodo. Algunas veces la chatarra se precalienta dentro del horno eléctrico con quemadores de oxígeno-petróleo, pero se requiere un gran sistema de manejo de gases de combustión. Además, para una mejor transferencia de calor, se instalan en el fondo del horno serpentines electromagnéticos o ladrillos porosos para inducir la agitación. Con lo anterior se puede llegar a consumos de potencia menores a 360 kWh por t y consumos de electrodo de tres kilogramos por t. Los tiempos de calentamiento se reducen a una hora. Esto significa que aplicando técnicas del desarrollo del proceso básico al oxígeno, el horno eléctrico puede aproximarse a la tasas de producción de éste.

Varios hornos operan con corriente continua (DC) en vez de corriente alterna (AC). Los hornos DC tienen normalmente un electrodo muy grande extendido a través del centro del horno, con el contra electrodo embebido en el fondo del horno y contactando el baño fundido. Un nivel de material caliente se mantiene en el horno para asegurar un buen flujo de corriente a través de la carga. La potencia y consumo de electrodos es menor que los hornos AC normales. El arco DC tiene un quemado más estable y mas quieto, lo cual genera menos perturbaciones en los alrededores del sistema de potencia y menos ruido alrededor del horno. El equipamiento eléctrico es menor pero aun es caro porque requiere rectificadores. Lo crítico en la operación de un horno DC es la corta vida del electrodo del fondo, la integridad del crisol y las limitaciones de corriente con el sistema de un solo electrodo. Están en operación hornos con capacidades superiores a 130 t.

8.6. FABRICACIÓN DE ACERO AL OXÍGENO

8.6.1. ACERÍA BÁSICA AL OXÍGENO

Más de la mitad del acero producido mundialmente se lleva a cabo en el proceso básico al oxígeno (basic oxygen process, BOP), el cual usa oxígeno puro para convertir la carga líquida del alto horno de hierro y chatarra en acero. El horno básico al oxígeno (basic oxygen furnace, BOF) esta enladrillado con refractario, puede voltear verticalmente, una lanza refrigerada con agua inyecta el soplado de oxígeno a través de orificios a una velocidad supersónica sobre la carga (ver figura 6). El uso de oxígeno a altos flujos de soplado produce una rápida oxidación de los elementos contenidos en el arrabio en alrededor de 20 minutos y suministra todo el calor requerido para refinar la carga. Los tamaños de los convertidores son variables y se operan para refinar desde 30 a 360 t.

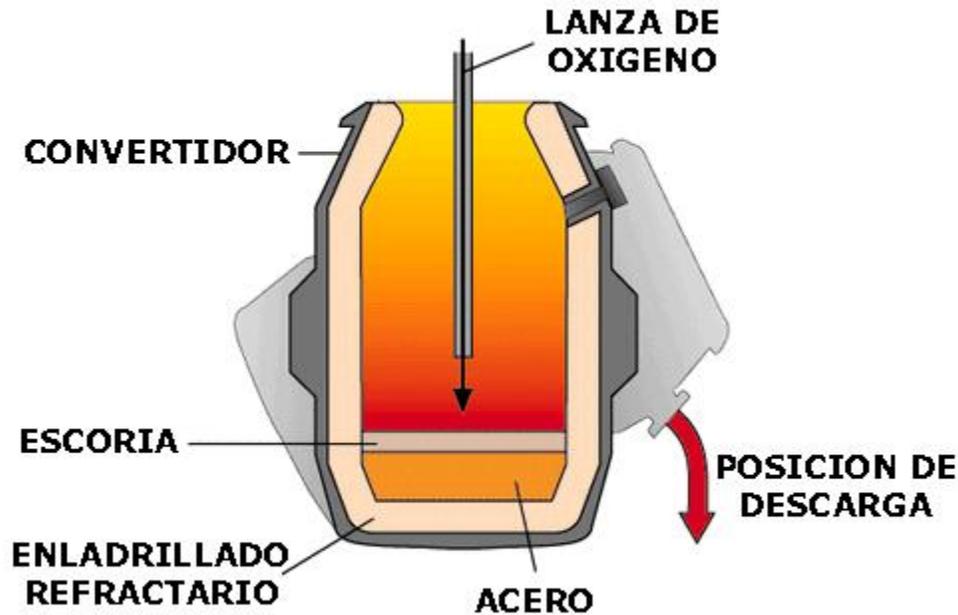


Figura 12: Horno básico al oxígeno (BOF) equipado con una lanza refrigerada con agua que inyecta oxígeno a través de boquillas a una velocidad supersónica.

8.6.1.1. LA CARGA

Cuando el oxígeno contacta el arrabio, se genera una gran cantidad de calor debido a la exotermicidad de las reacciones, especialmente la oxidación del silicio a sílice, de este modo la oxidación de la sola carga de arrabio resultaría en una temperatura muy alta para la colada. Por esta razón se agrega carga fría (chatarra). La fusión de la chatarra consume alrededor de 340 kcal/kg, lo cual enfría eficientemente el proceso. Por lo tanto, una carga BOP típica, se compone de alrededor de 75 % de arrabio líquido y 25 % de chatarra. Esto requiere de un suministro confiable de arrabio a bajo costo con una composición química uniforme, lo cual es obtenible solo manteniendo las condiciones de operación del alto horno lo más constante posible. Existen también ciertas propiedades del acero, como por ejemplo, contenido de silicio y azufre, que se seleccionan para optimizar la operación del alto horno y del BOF y producir un acero al mínimo costo. Tal interdependencia requiere que el alto horno y el BOF trabajen como un sistema de operación bien integrado.

8.6.1.2. EL HORNO

El convertidor básico al oxígeno es un reactor cilíndrico con un cono abierto en la parte superior. Para los convertidores más grandes de 360 t, la coraza es de 8 m de diámetro y 11 m de alto. Las corazas están construidas de placas de acero y están montadas en un **trunnion ring** de modo tal que el convertidor puede bascular para su carguío, ensayos, sangrado y descarga escorias. El enladrillado está hecho de ladrillos de magnesita, de diferentes espesores y calidad en ciertas zonas dependiendo del

desgaste. El espesor total de los convertidores más grandes excede un metro. El orificio de sangría está en la zona superior de cada convertidor, a la derecha del cono.

Las lanzas de oxígeno miden 300 mm de diámetro y 21 m de largo. Sus puntas tienen tres boquillas, que producen el chorro supersónico de oxígeno. El agua para enfriamiento de las lanzas es vital. Una grúa especial mueve las lanzas (ver figura 13) hacia arriba y hacia abajo y ajusta la distancia con respecto al baño. Las lanzas duran alrededor de 150 refinados antes que sus puntas sean reemplazadas.

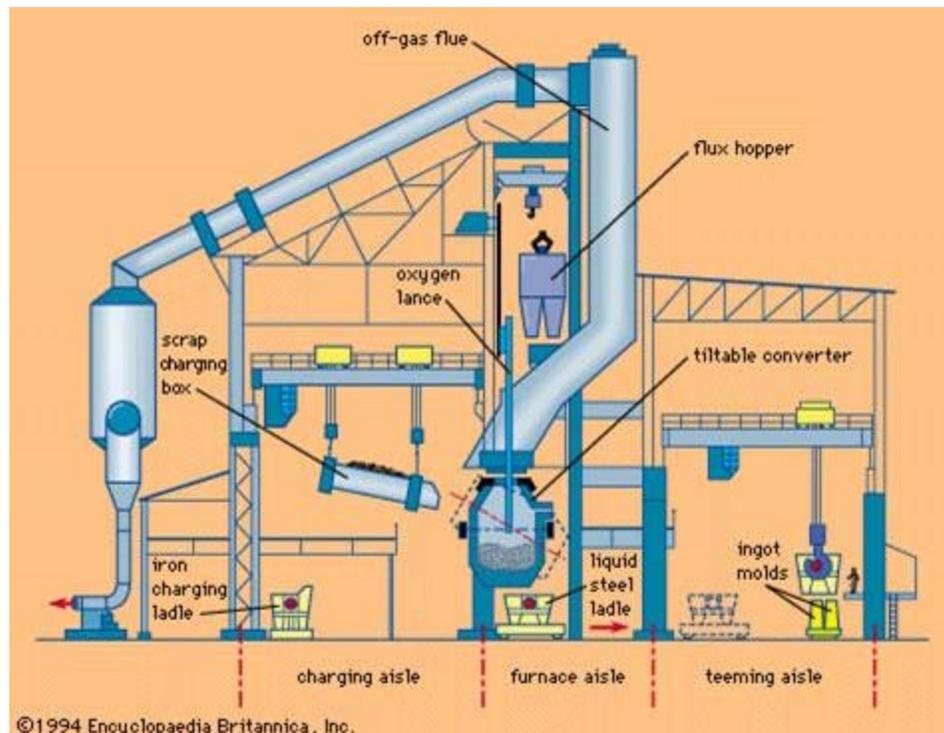


Figura 13: Esquema de una nave de acería al oxígeno básica.

El horno al oxígeno básico está equipado con un enorme sistema de manejo de gases en orden de evitar emanaciones de gases de la acería y asegurar una adecuada limpieza de los mismos antes de descargarlos a la atmósfera. Los gases de salida emergen desde la boca del convertidor a 1650°C (3000°F). Están compuestos en un 90% de CO y 10% CO₂, y también contienen polvo de FeO, el cual se forma en la zona de alta temperatura del chorro de oxígeno. Existen dos sistemas de manejo de gases:

- a) Sistema de combustión completa: los gases de salida son quemados encima de la boca del convertidor con aire en exceso, y se usa tanto calor físico como químico en una caldera o sistema de calentamiento de agua incorporada en la campana y salidas verticales. Posteriormente los gases enfriados son limpiados con un precipitador electrostático. Durante el soplado de un convertidor grande son removidos desde el equipo de combustión completa, alrededor de 10000 m³/min (350000 pie³/min) mediante un ventilador, y se colectan alrededor de 0.7 kilogramos de FeO en polvo por t de acero.



- b) Sistema de combustión suprimida: una campana con forma de anillo se baja sobre la boca del convertidor antes del soplado, manteniendo el aire lejos de los gases calientes. Esto significa que los gases no son quemados y se preserva toda su energía térmica química de alrededor de 3000 kilocalorías por metro cúbico. El gas es limpiado, colectado en contenedores y ubicado en un lugar específico. Se piensa que este sistema es más complicado, es mucho más pequeño, porque los gases de salida están fríos y así su manejo y procesamiento es menor.

El horno básico al oxígeno está ubicado en un gran edificio de 80 m de altura para acomodar la gran lanza, el sistema de manejo de gases de salida, y el alimentador gravitacional. Poderosas grúas, grandes correas transportadoras y carros aseguran el apropiado suministro de materiales al convertidor y remueven rápidamente el acero líquido y la escoria del horno BOF.

8.6.1.3. EL PROCESO

El refinado comienza con una inspección del enladrillado refractario, con el convertidor en la posición de carguío. Algunas veces un instrumento de curva de nivel láser se usa para determinar el espesor del enladrillado remanente. Con el convertidor volteado en 45°, se carga la chatarra dentro del horno con una grúa o con una máquina de carguío especial que cuenta con un buzón o dos grandes cajas llenas de chatarra por la boca del convertidor. El metal caliente es cargado dentro del convertidor mediante una olla especial de carguío de arrabio, esta olla recibe arrabio desde una estación de transferencia de transporte de ollas, las cuales traen el arrabio desde el alto horno. Muchas plantas bajan el contenido de azufre en el hierro justo antes de cargarlo al convertidor inyectando mezclas de cal - magnesita o carburo de calcio o ambos en la olla de carguío. Cualquier escoria de alto horno y escoria formada durante la desulfuración es sangrada antes de cargar el arrabio. Debido a las pérdidas predecibles durante el soplado de oxígeno, existe siempre más hierro y chatarra cargada que acero producido; por ejemplo, 1080 kilogramos de material fresco pueden producir 1000 kilogramos de acero líquido, para un producto metálico de 92.6 %. La composición química, temperatura y peso de la carga de hierro están automatizados en un sistema de control por computador. Para el soplado, el convertidor se ubica en una posición superior, se inyecta el oxígeno, y se baja la lanza. Los flujos de oxígeno, altura de la lanza, y adición de cal son controladas automáticamente. Los flujos de oxígeno en los convertidores grandes exceden los 800 metros cúbicos por minuto, y el consumo de oxígeno es alrededor de 110 metros cúbicos por t de acero. Al inicio del soplado generalmente se agrega, alrededor de 70 kilogramos de cal por t de acero del tamaño de un pebble; esta se combina con sílice y otros óxidos para formar alrededor de 150 kilogramos de escoria por t de acero. Al agregar dolomita calcinada (CaO - MgO) el contenido de magnesia (MgO) en la escoria es de alrededor del 6%, por lo tanto disminuye la corrosión del enladrillado de magnesita por la escoria. La calidad de la cal es de gran importancia en las operaciones BOF, y se usan hornos especiales para calcinar la caliza.

Las reacciones de oxidación en el convertidor se hacen muy violentas ante la alta



cinética de remoción de carbono, esto es, cuando todo el silicio se ha removido, alrededor de ocho minutos de soplado. En este punto el oxígeno reacciona principalmente con carbono generando grandes cantidades de monóxido de carbono gaseoso el cual se mezcla con la escoria. Esto puede generar una espumación de la escoria por lo cual es importante el control del convertidor a altos flujos de soplado. Frecuentemente una pequeña lanza sensor refrigerada con agua, llamada sub-lanza, se sumerge dentro del líquido durante la fase final del soplado para revisar y tomar muestras de acero. Las muestras son automáticamente alimentadas dentro de un computador, el cual predice el punto final y corte del oxígeno cuando la temperatura y composición química han alcanzado el nivel especificado. Un buen control del carguío hacen posible que el vaciado del refino se base solo en el ensayo de la sub-lanza. En otros casos, el convertidor se bascula y la temperatura y composición química se miden manualmente. Algunas veces se agrega caliza calcinada y se aplica un corto soplado para aumentar la temperatura o corregir la composición química. Para el vaciado, el convertidor se rota, y el acero se descarga a través de un orificio de sangría dentro de un olla ubicada en un carro de transferencia debajo del convertidor. La temperatura del acero que se descarga se selecciona específicamente después que haya sido estimada toda la pérdida de temperatura esperada durante el tratamiento y retención del acero en la olla, dentro de una temperatura de “ventana” para el vaciado en la lingotera o colada continua. Por ejemplo, un acero al carbono de 0.1 % C, se puede descargar a 1596°C, esto es 80°C sobre el punto teórico de solidificación. Se espera que los aceros altos en carbono sean descargados a bajas temperaturas. Antes y durante la descarga se agrega a la olla aluminio o ferrosilicio para disminuir el contenido de oxígeno disuelto en el acero. Como la mayoría del manganeso contenida en el arrabio se oxida durante el soplado, queda remanente en el acero un 0.1%, que generalmente no es lo suficiente para los aceros comerciales, por esta razón también se agrega ferro - manganeso.

Cuando aparece la escoria, el convertidor se rota hacia atrás, y la escoria se descarga por la boca del convertidor dentro de un olla de escoria. Para una mejor separación de la escoria del acero líquido, se usa con frecuencia un aparato con orificios de sangría especialmente cerrado con bolas refractarias o chorro de nitrógeno, y también aparatos detectores de escoria.

Entre descarga y descarga el horno BOF toma entre 30 y 45 minutos y puede soplar más de 30 refinaciones por día. Las acerías BOF más grandes con tres convertidores pueden producir sobre 5 millones de t de acero líquido por año. El mantenimiento y reparación son extremadamente importantes, por que el acero es fabricado de acuerdo a la programación y normalmente se requiere de un turno de mantención por semana. Un enladrillado del convertidor dura 1500 a 3000 refinaciones, después de lo cual se quiebran y se necesita instalar nuevamente el refractario mediante una operación mecanizada. El enladrillado toma al menos una semana.

8.6.1.4. VARIANTES

Existe un número de mejoras significativas, modificaciones y cambios en el proceso de fabricación de acero BOF. Por ejemplo, cuando el mineral es alto en fósforo se funde en



el alto horno, y a continuación el arrabio producido se carga al horno BOF con un contenido de 0.15 % de P.

Una variante de este proceso desarrollado en Luxemburgo y Francia permite tratar arrabios ricos en fósforos, es el proceso LD - AC. Consiste en inyectar cal pulverizada junto con el chorro de oxígeno. La cal junto con el oxígeno va al centro de las reacciones de oxidación dada la temperatura en alta y el FeO en alta concentración. De este modo el P puede ser eliminado desde el principio del soplado. El proceso LD - AC, debido a su simplicidad, economía y la habilidad de tratar con un amplio rango de arrabios ha tenido gran éxito.

Otra variante que encuentra amplia aplicación es la inyección de argón (o lagunas veces nitrógeno) dentro del baño fundido a través de ladrillos porosos ubicados en el fondo del convertidor. La agitación por el fondo favorece las reacciones químicas y disminuye la temperatura del acero en el área de impacto del oxígeno, lo que lleva a una menor oxidación del hierro y un mejor rendimiento.

Otro sistema llamado Q-BOP, no usa lanza superior en forma total, soplando oxígeno, caliza calcinada molida y cuando es necesario argón a través de líquido fundido mediante varias toberas ubicadas en el fondo refrigeradas con gas o aceite. Estas toberas son dos tubos de acero concéntricos, donde fluye oxígeno por el anillo interior y gas o aceite por el anillo exterior. El enfriamiento de los tubos esta acompañado por el calor endotérmico requerido para reformar (craquear) el gas natural o aceite en CO y H₂.

La vida del fondo del convertidor Q-BOP es menor que la vida de sus paredes laterales, y esto demanda un tiempo de mantención adicional para el cambio de fondo. Por otro lado, el soplado por el fondo tiene la ventaja de generar una gran superficie de contacto entre todos los reactantes, por esta razón mejoran las reacciones metalúrgicas y control del proceso. El rendimiento también es alto, debido a que hay menor oxidación local del hierro. Sin embargo, la menor oxidación también significa que se genera menor calor exotérmico; esto disminuye la cantidad de chatarra que puede ser cargada, lo cual puede ser una desventaja económica cuando el precio de la chatarra es bajo. Por esta razón, algunas acerías realizan el soplado por el fondo acoplado con una lanza superior de post-combustión. Esta es una lanza de oxígeno con puertas adicionales en la punta para quemar monóxido de carbono (CO) en dióxido de carbono (CO₂) dentro del convertidor. El calor adicional es generado por esta práctica de soplado combinada que aumenta potencialmente el carguío de chatarra.

Otra tecnología para aumentar las tasas de alimentación de chatarra usa una lanza de oxígeno-combustible, la cual precalienta la chatarra en el convertidor por unos 20 minutos antes que el arrabio del alto horno sea agregado. Otra práctica para aumentar la chatarra es agregar aluminio a la carga o fundido; el aluminio genera calor durante su oxidación con soplado de oxígeno.

Otro proceso inyecta carbón pulverizado a través de una lanza de oxígeno modificada o a través de toberas especiales en el fondo, simultáneamente aplican oxígeno adicional y usan una lanza de post-combustión. En operaciones experimentales, esta

combinación ha resultado en aumentar la capacidad sobre el 100%, esto significa, que no se carga metal caliente, y el convertidor se transforma en un fundidor de chatarra. Aumentar las tasas de carguío de chatarra ayuda a mantener la planta operando cuando el suministro de arrabio esta limitado, por ejemplo, durante un enladrillado del alto horno.

La Figura 14 muestra otras variantes principales, el proceso Kaldo de Suecia, el Rotor de Alemania y el L.D. desarrollado en Linz y Donowitz en Austria. La capacidad de los convertidores fluctúa entre 20 y 200 t.

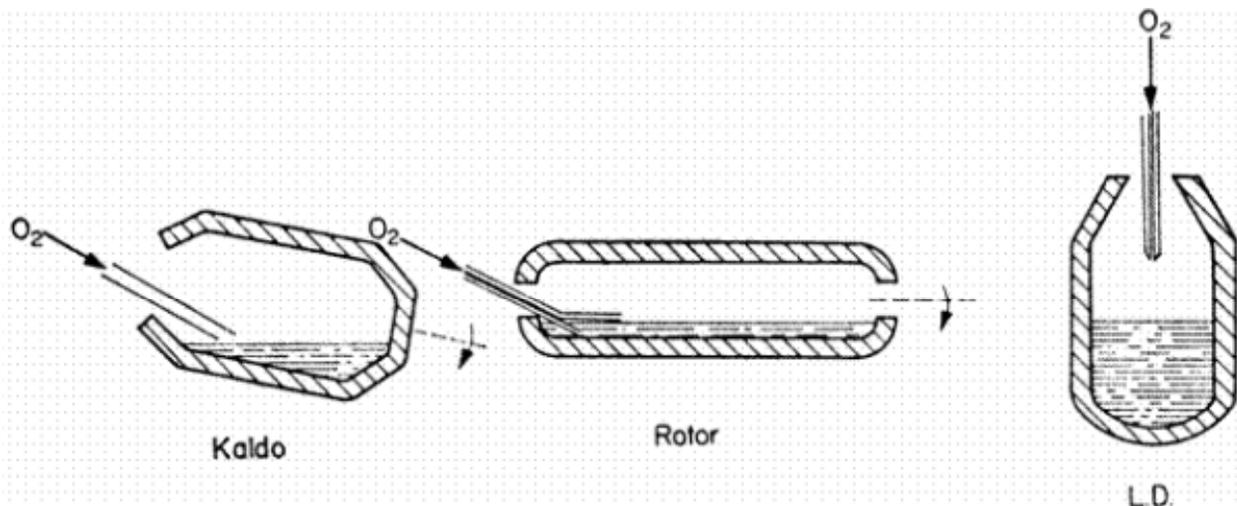


Figura 14: Proceso Kaldo (Suecia), Rotor (Alemania) y Proceso L.D. (Linz y Donowitz en Austria)

El proceso Kaldo está basado en la acción refinadora del metal-escoria, igual al HSM, pero la escoria oxidante se hace por soplado de oxígeno sobre la superficie en vez de agregar óxido de hierro. Se sigue la misma secuencia del HSM con la diferencia que demora solo 35 minutos. Las pérdidas de calor son mínimas y no se necesita calentamiento externo, genera suficiente calor y es posible agregar hasta 40% de carga fría (chatarra) con la carga. La combustión del CO producido en el baño contribuye substancialmente al calentamiento. El recipiente se rota para agitar el baño y prevenir que los refractarios sean localmente desgastados. El problema del Nitrógeno en el Convertidor también es evitado y buena cantidad de chatarra puede ser incluida en la carga.

El método más simple y exitoso es el proceso LD. Un simple crisol con una lanza de oxígeno a alta velocidad es insuflada al baño por una boquilla refrigerada con agua (Figura 15). Esto evita el problema del sobrecalentamiento de las toberas tal como en el proceso de Convertidor Bessemer enriquecido en oxígeno y permite producir acero libre de nitrógeno con la misma rapidez que el proceso Bessemer. El chorro de oxígeno penetra profundamente en el baño y produce una rápida oxidación. La pronta formación del óxido de hierro bajo el jet (chorro) permite la formación de la escoria FeO - CaO de modo que se elimina el P a principios del proceso. Debido al uso de oxígeno puro no

hay pérdida de calor llevado por el nitrógeno y permite agregar un 25% más de carga fría comparado con el proceso Bessemer. La tendencia es instalar procesos LD para convertir arrabio en acero y hornos eléctricos para fundir el exceso de chatarra y hacer aceros aleados. Los convertidores Bessemer y hornos Siemens-Martin instalados se siguen usando extensamente, pero gradualmente están entrando en obsolescencia.

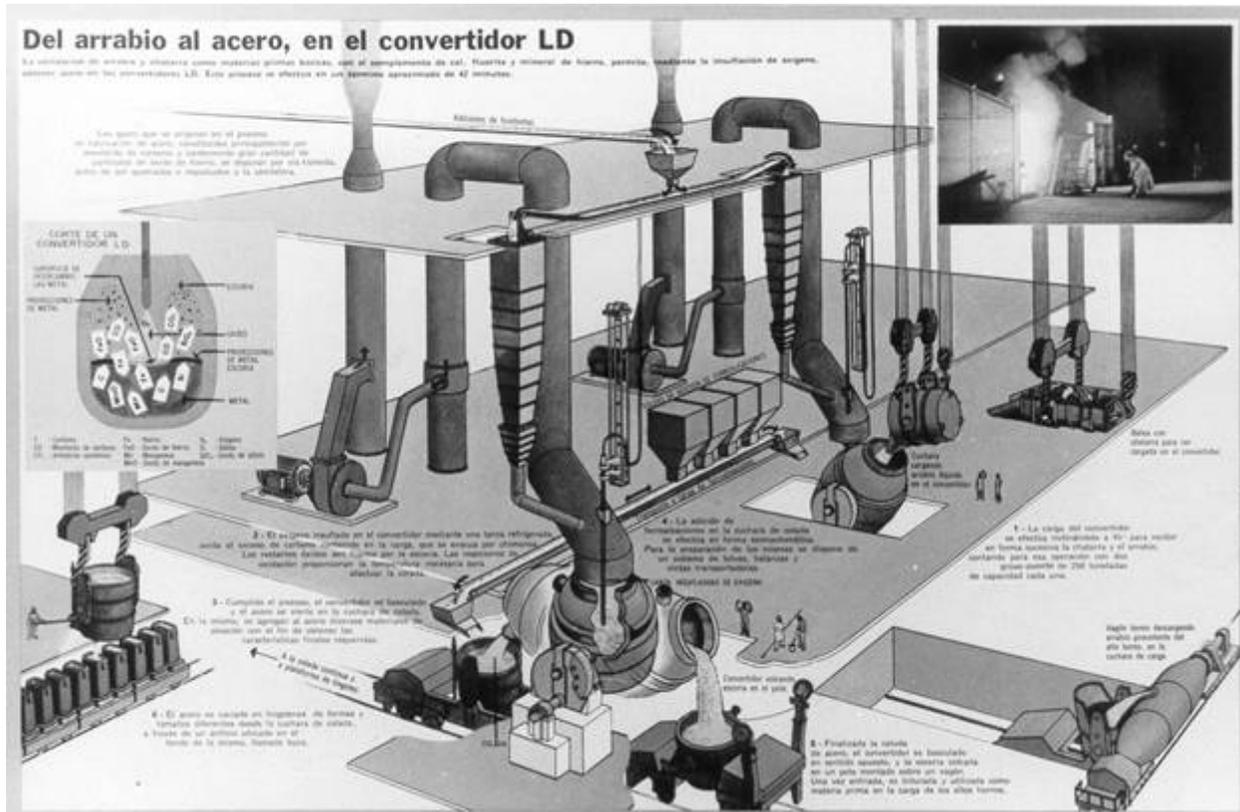


Figura 15: Convertidor LD

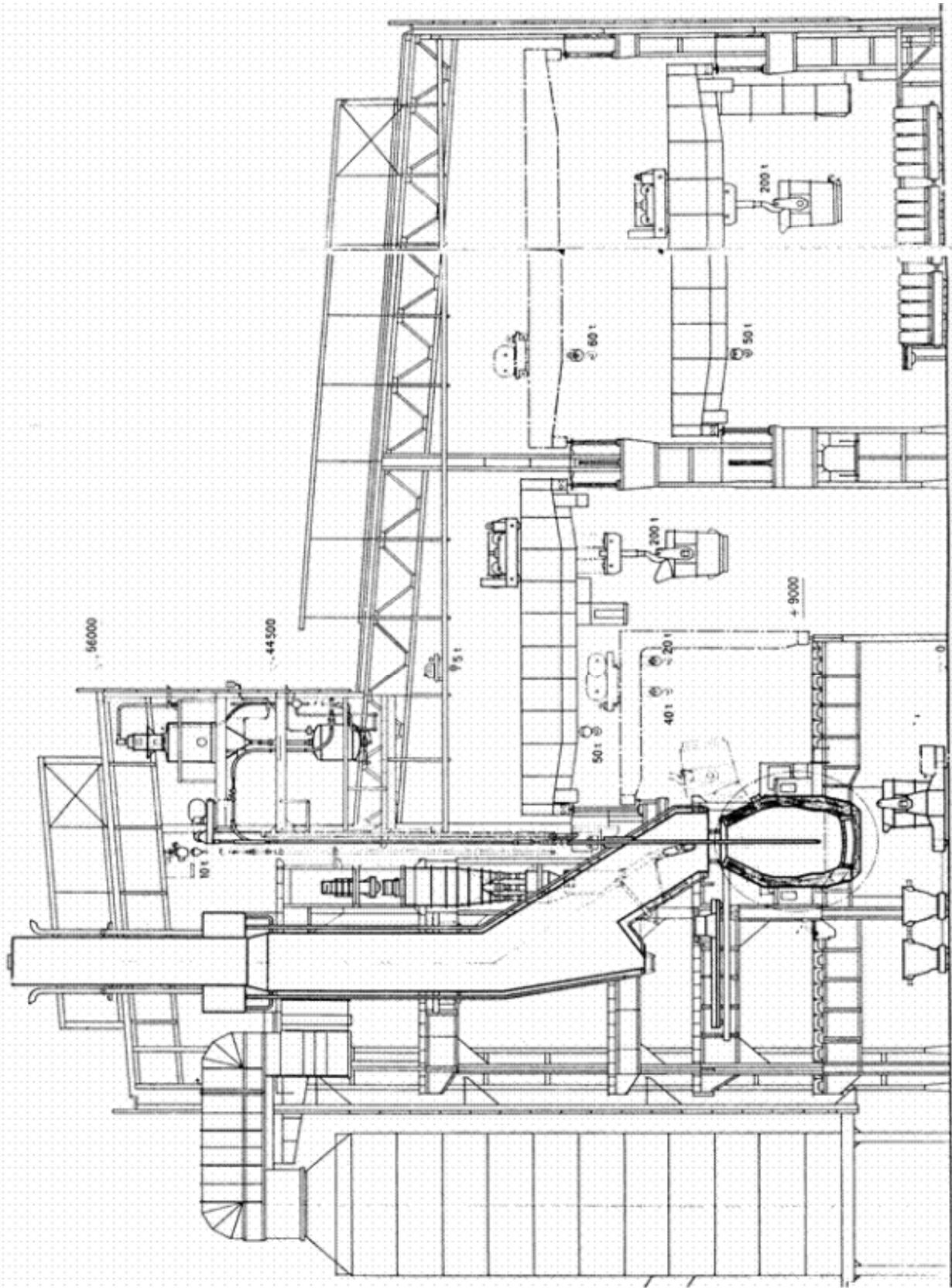


Figura 16: Convertidor LD