

Calidad en el diseño .....	485	5.4. Inspectores de Construcciones Soldadas .....	492
Calidad en las compras .....	487	5.5. Personal requerido en Ensayos No Destructivos .....	494
Calidad en la fabricación y en la instalación .....	487	5.6. Relación entre el personal que realiza END y el Inspector de Soldadura ...	497
Calidad en la inspección y pruebas .....	488	6. Perfil ideal de la Entidad de Inspección .....	497
Valoración económica .....	489	7. Posibles salidas profesionales del Coordinador de Soldadura y del Inspector de Construcciones Soldadas .....	498
Personal requerido en Calidad e Inspección .....	490		
Coordinadores de Soldadura .....	490		
Soldadores cualificados .....	491		
Especialistas en Aseguramiento de la Calidad .....	491		

# I

---

## FABRICACIÓN DE LOS ACEROS

### 1. ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LOS ACEROS

#### 1.1. Selección de materiales

Los aceros son materiales que gozan de una relación resistencia-coste de las más favorables del mercado y constituyen, con diferencia, las aleaciones metálicas con más aplicaciones tecnológicas. Sus propiedades están ligadas a la composición química y a la microestructura resultante del proceso de fabricación o transformación.

La selección de los materiales que se emplean en las construcciones soldadas implica escoger el material que, siendo más económico, garantice su **estabilidad metalúrgica** para prevenir un fallo prematuro como resultado de las condiciones de servicio a las que va a estar sometido y su **resistencia a todas las condiciones de desgaste** que actuarán sobre él.

Ahora bien, el más económico no es el que más tiempo garantice las dos condiciones anteriores, sino el que lo hace **durante un tiempo preestablecido**, también llamado **vida de diseño**.

En la mayoría de los casos, no resulta ventajoso un material que no sufra ningún desgaste durante su vida de diseño, sino un material menos resistente al desgaste, dotado de un espesor adicional suficiente, que se irá reduciendo a lo largo de la vida de diseño prevista. Este espesor adicional se conoce como **sobreespesor de corrosión**.

En esta selección debe contemplarse su aptitud para la soldadura, bien como método de manufactura o de reparación. Por un lado, por ser una de las técnicas más versátiles de fabricación de equipos; y por otro, porque implica una serie de exigencias y restricciones, tanto al material como al diseño y a la ejecución, cuyo desconocimiento puede llevar al fracaso del equipo.

### 1.2. Influencia de la microestructura

Los aceros se basan en el sistema *Fe-C* con un contenido máximo de *C* del 2%, normalmente limitado al 1%, y con presencia de otros metales y metaloides como *Mn, Si, S, P, Cr, Ni, Mo, W, V, Cu, N*, en pequeñas cantidades. De forma breve se puede definir el acero como una aleación hierro-carbono que se puede forjar.

El acero, considerado como aleación binaria *Fe-C*, tiene unos microconstituyentes que son el resultado de procesos de naturaleza metaestable, dependientes de la composición química y del historial térmico en las diferentes condiciones de transformación. Los principales son: *austenita, ferrita, cementita, perlita, bainita* y *martensita*.

**Austenita:** solución sólida de inserción de *C* en hierro  $\gamma$ . Estructura cristalina cúbica centrada en las caras, con una solubilidad variable de 0 a 1,7% de *C*. Sólo es estable a altas temperaturas y para mantenerla a temperatura ambiente hay que provocar un enfriamiento rápido en aceros altos en *C* ó muy aleados en *Mn* ó *Ni*. Es un constituyente blando, dúctil y tenaz, con buena resistencia al desgaste y magnetismo prácticamente nulo.

**Ferrita:** hierro  $\alpha$ , estructura cúbica centrada en el cuerpo, con trazas de *C*, máximo 0,022% *C* a 727°C y 0,005% *C* a temperatura ambiente, en solución sólida de inserción. La ferrita tiene carácter magnético, es relativamente blanda y poco resistente, pero muy dúctil y tenaz. La presencia de elementos de inserción como *N* y *P* aumentan su resistencia. El rango de existencia de la ferrita se amplía con la adición de elementos alógenos como *Cr, Si* y *Mo*.

**Cementita:** carburo de hierro,  $Fe_3C$ , es el constituyente más duro y a la vez más frágil de los aceros. Es un compuesto con 6,67% *C*.

**Perlita:** agregado eutectoide en estructura laminar, formado por láminas alternas de ferrita y cementita en una proporción de 6 a 1, cuyo espesor y separación dependen de la velocidad de enfriamiento. La perlita es dura, resistente y bastante dúctil, estando sus propiedades muy condicionadas por el contenido en aleantes de la ferrita y por el espacio interlaminar.

**Bainita:** familia de agregados resultante de la descomposición de la austenita en tratamientos isotermos entre 250 y 600 °C. Es un producto generado por nucleación y crecimiento y, por tanto, con difusión. A las temperaturas a las que se forma, la difusión del *Fe* es muy escasa, mientras que la del *C* es intensa. Se crean, por consiguiente, estructuras mixtas de zonas ferríticas y zonas de carburos, con aspecto desde acicular a granular.

**Martensita:** producto resultado del enfriamiento brusco de la austenita, que provoca una transformación sin difusión. Es el constituyente típico de los aceros templados. Su

contenido en *C* es análogo al de la austenita de partida y su estructura cristalográfica es tetragonal centrada en el cuerpo, con átomos de *C* en posición intersticial. Esta red, sin embargo, se encuentra muy distorsionada y sufre dilatación durante la transformación, fuente de importantes tensiones internas. Presenta aspecto acicular. Mecánicamente la martensita es un componente muy duro, frágil y resistente y sus características dependen directamente del contenido en *C*.

### 1.3. Diagrama hierro carbono

El diagrama *Fe-C* de la figura 1 es un ejemplo de las numerosas versiones publicadas, en donde se muestran las estructuras metalúrgicas correspondientes a diversas composiciones químicas dentro de los aceros al carbono, que resultarán de utilidad para la comprensión de los problemas de soldabilidad que estudiaremos en su momento.

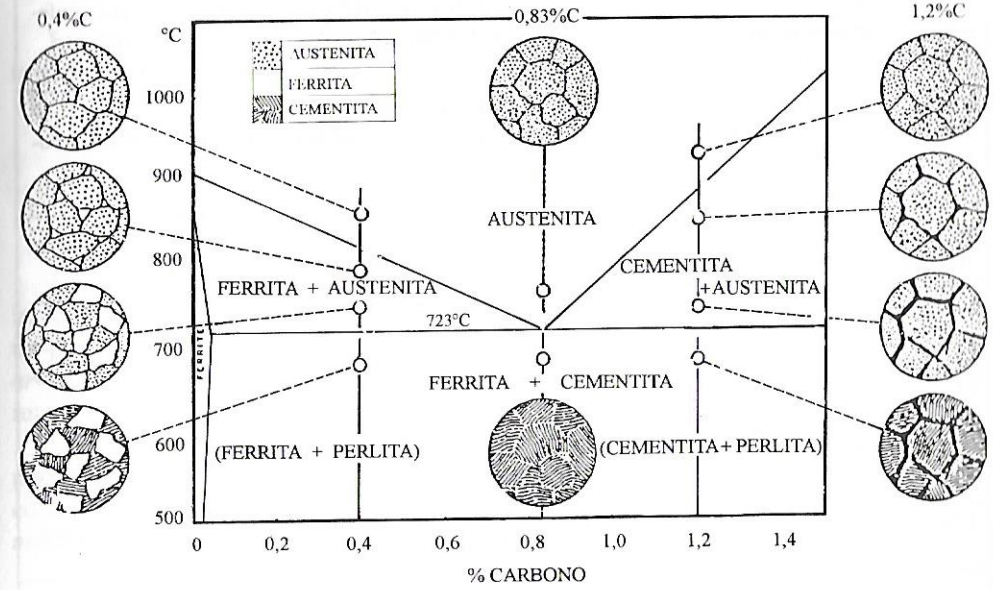


Figura 1

### 1.4. Influencia de los elementos

Las características de un acero son consecuencia directa de su composición química y de su estructura interna, generada mediante los tratamientos térmicos y mecánicos que sufre el material. A continuación se citan, de forma genérica y por orden alfabético, los efectos típicos de los elementos que pueden estar presentes en la composición química de los aceros.

<b>Aluminio</b> A fina el tamaño de grano. Se combina con el N para formar nitruros de alta dureza.	<i>Al</i>	<b>Azufre</b> Aumenta la fragilidad en caliente. Facilita el arranque de viruta en aceros mecanizables.	<i>S</i>
<b>Boro</b> Aumenta la templabilidad. Es elemento endurecedor por solución intersticial.	<i>B</i>	<b>Calcio</b> Inmiscible. Modifica la geometría y distribución de las inclusiones no metálicas, disminuyendo su efecto negativo.	<i>Ca</i>
<b>Carbono</b> Es el elemento de aleación por excelencia del acero. Aumenta la resistencia y la dureza disminuyendo la tenacidad y la ductilidad. Aumenta la templabilidad.	<i>C</i>	<b>Circonio</b> A fina el tamaño de grano. Neutraliza el efecto nocivo del N.	<i>Zr</i>
<b>Cobalto</b> Aumenta la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a la oxidación en caliente. Reduce la templabilidad. Aumenta la resistencia y el límite elástico.	<i>Co</i>	<b>Cobre</b> Mejora la resistencia a la corrosión. Dificulta la deformación en caliente por conferir fragilidad.	<i>Cu</i>
<b>Cromo</b> Aumenta la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a la oxidación en caliente. Aumenta la resistencia a altas temperaturas.	<i>Cr</i>	<b>Fósforo</b> Eleva la resistencia de los aceros bajos en carbono. Disminuye la tenacidad.	<i>P</i>
<b>Hidrógeno</b> Produce fragilidad en el acero. Elemento muy nocivo en soldadura.	<i>H</i>	<b>Manganeso</b> Elimina la fragilidad en caliente del S. Aumenta la templabilidad y la resistencia mecánica y al desgaste.	<i>Mn</i>
<b>Molibdeno</b> Mejora la resistencia a la fluencia en caliente. Aumenta la resistencia a la corrosión.	<i>Mo</i>	<b>Niobio</b> A fina el tamaño de grano. Confiere una mayor ductilidad.	<i>Nb</i>
<b>Níquel</b> Aumenta la resistencia a bajas temperaturas. Mejora la resistencia a la corrosión.	<i>Ni</i>	<b>Nitrógeno</b> A fina el tamaño de grano. Puede disminuir la ductilidad por efecto de envejecimiento.	<i>N</i>
<b>Oxígeno</b> Aumenta la fragilidad del acero. Disminuye la tenacidad.	<i>O</i>	<b>Plomo</b> Mejora el arranque de viruta. Dificulta el trabajo en caliente.	<i>Pb</i>
<b>Silicio</b> Facilita la desoxidación. Mejora la permeabilidad magnética. Aumenta ligeramente la resistencia.	<i>Si</i>	<b>Titanio</b> A fina el tamaño de grano. Mejora la deformabilidad en frío.	<i>Ti</i>
<b>Vanadio</b> A fina el grano y mejora la templabilidad. Mejora la resistencia y la ductilidad.	<i>V</i>	<b>Volframio</b> Aumenta la resistencia, la dureza y la resistencia al desgaste.	<i>W</i>

## 2. RUTAS DE FABRICACIÓN DEL ACERO

En la actualidad la producción de acero se efectúa básicamente por dos rutas: la del *horno alto* más *acería de convertidor* y la del *horno eléctrico de arco*.

La primera, que parte del mineral de *Fe*, es conocida como *proceso integral*. La segunda, basada en la fusión de chatarra reciclada y prerreducidos de *Fe*, ha experimentado un fuerte crecimiento en las últimas décadas. Procedimientos anteriores, hoy en desuso, son Bessemer y Martin Siemens.

La diferencia más importante entre los aceros obtenidos por las dos rutas mencionadas se reflejan en el contenido de elementos residuales *S, P, Cu, Sn, O, N, H*, perjudiciales para determinadas aplicaciones, cuyos umbrales mínimos dependen de su técnica de fabricación.

### 2.1. Esquema del proceso siderúrgico

Existen diferentes criterios para ordenar el proceso siderúrgico. Aquí los dividimos en tres etapas, que se detallan en el esquema de la figura 2.

- *Fabricación de arrabio*
- *Fabricación de acero*
- *Técnicas de transformación y acabado*

La *fabricación de arrabio* es la primera etapa del denominado proceso integral. La instalación básica es el *horno alto* del que se obtiene, mediante la reducción del mineral, un producto de composición aproximada 96% *Fe* y 4% *C*. Este producto, denominado *arrabio*, es la materia prima para la fabricación de acero en la segunda etapa del proceso integral.

La *fabricación de acero* se realiza a través de dos rutas: por medio de convertidor, partiendo del arrabio, o por horno eléctrico de arco, que utiliza básicamente la *chatarra* como materia prima. El acero obtenido por cualquiera de estos caminos confluye en la *metalurgia secundaria*, destinada al ajuste final de la composición.

En la solidificación, nuevamente encontramos dos rutas: la solidificación de *semiproductos* y el *moldeo*. Los semiproductos: lingotes, planchones, palanquillas, son productos intermedios entre el estado líquido y el producto final, sin aplicación tecnológica directa, pero adecuados para el almacenamiento, distribución y transformación final. El moldeo es la obtención directa de piezas, mediante la solidificación en moldes, con la forma del producto acabado.

Las *técnicas de transformación* parten de los semiproductos y se basan fundamentalmente en la deformación de los mismos por forja, laminación en caliente y en frío y, por último, los *sistemas de acabado* en los tratamientos térmicos, recubrimientos y tratamientos superficiales.

El abanico de productos de acero en el mercado es tan amplio como sus aplicaciones,

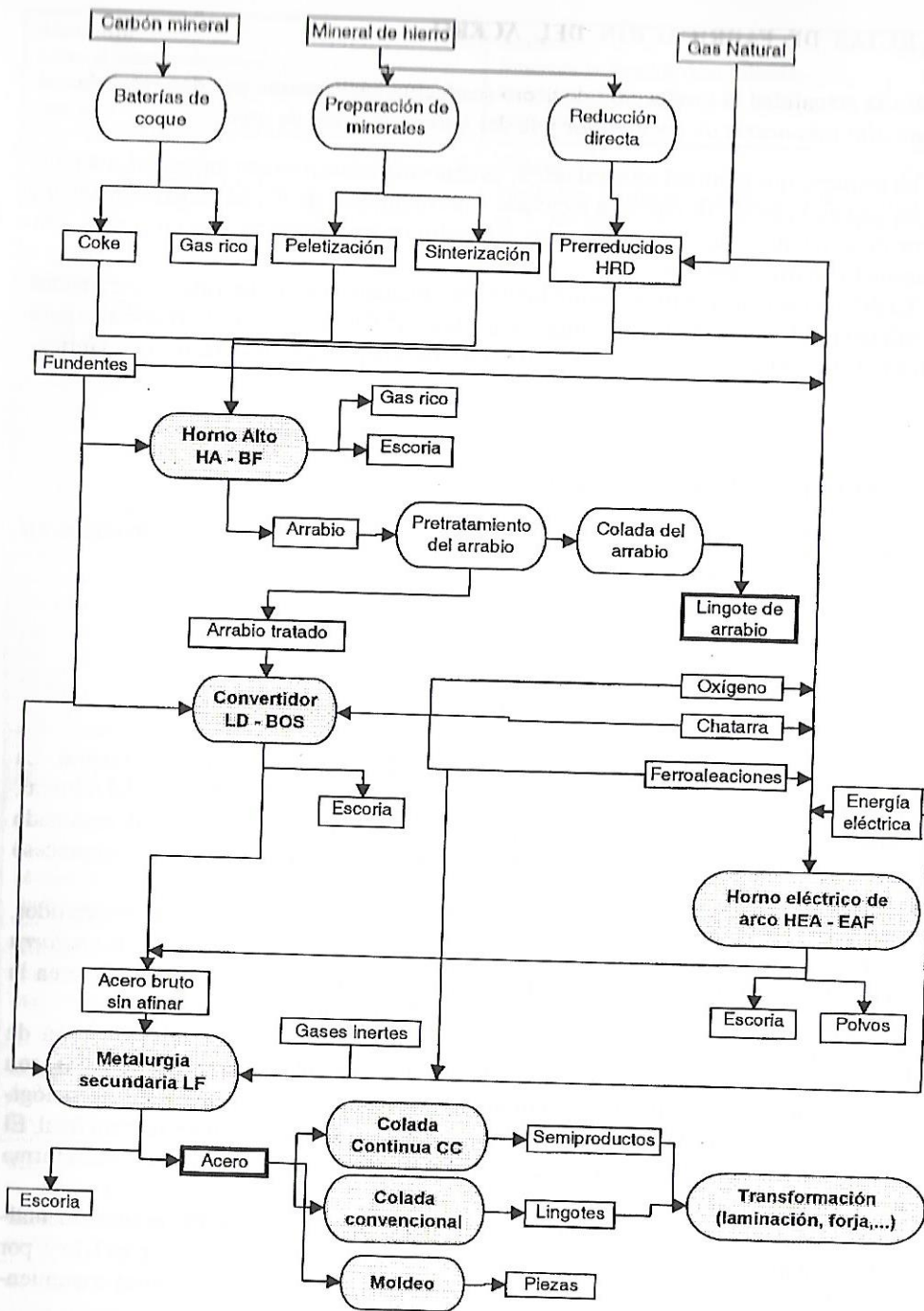


Figura 2

combinándose las diferentes formas geométricas con las calidades y grados de acabado. Entre los productos planos destaca la chapa, la bobina, el fleje o la chapa perfilada. Entre los largos la barra calibrada, los perfiles estructurales, los carriles, la barra corrugada para hormigón, pasando por los alambres y alambrones y los tubos, además de los productos recubiertos como las chapas de hojalata, la galvanizada o la prepintada.

## 2.2. Antecedentes históricos

### 2.2.1. Proceso Bessemer

En el año 1856 Sir Henry Bessemer descubrió que inyectando aire al arrabio se aceleraba la eliminación del C y de ciertas de impurezas. Esta idea dió origen al convertidor que lleva su nombre y que ha sido utilizado durante más de cien años (\*). Entonces no se conocía la influencia del refractario, utilizándose únicamente ladrillos de  $SiO_2$  en todo el revestimiento. Su naturaleza ácida impedía la eliminación de S y P, siendo el C y el Si los elementos termógenos de este proceso.

El fondo del convertidor se encuentra perforado por una serie de orificios que lo atraviesan, denominados toberas, como muestra la figura 3. Una vez cargado se sitúa en posición vertical. El arrabio no debe estar nunca en contacto con la caja de viento ni con las toberas por el peligro de que la masa líquida las obstruya y deteriore el fondo. Por tanto, hay que regular cuidadosamente la presión de entrada de aire a través de las toberas, ya que si es menor que la necesaria existe el riesgo de obstrucción y si es mayor, puede lanzar proyecciones de acero a considerable altura. En consecuencia, debe ser la apropiada para equilibrar el peso de arrabio y crear una atmósfera de aire próxima a las toberas.

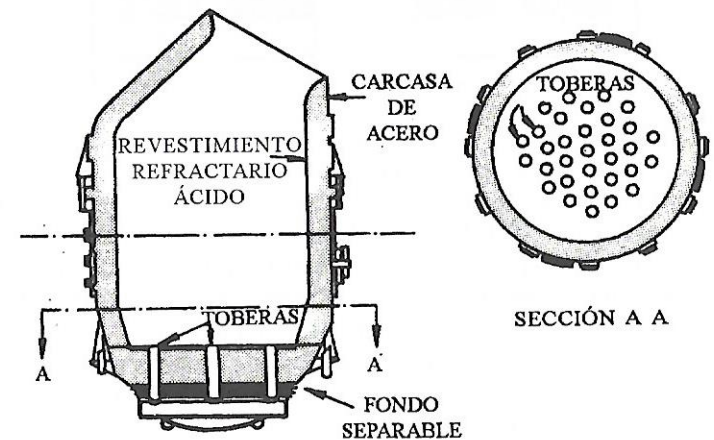


Figura 3

(\*) N. del A.: En España la producción de acero Bessemer se inicia en 1886, alcanza su apogeo en 1961 y finaliza en 1969.

El 80% de  $N_2$  que contiene el aire reduce la temperatura del baño, haciendo más difícil el control de la operación y deteriorando la ductilidad del acero obtenido con esta técnica.

Thomas-Gilchrist desarrolló poco tiempo después una versión de este convertidor, pero con revestimiento básico, también ya desaparecida.

### 2.2.2. Proceso Martin Siemens

Ha sido, hasta casi finales del pasado siglo, el procedimiento de obtención de acero más utilizado. El horno de solera abierta, como muestra la figura 4, es un recipiente de gran diámetro y pequeña profundidad, menor de un metro, capaz de contener hasta 300 toneladas de acero. Dispone de un techo refractario suspendido a unos dos metros sobre la superficie. Las llamas de gas natural, de horno alto, de coquería, etc., cubren el espacio por encima de la superficie del metal fundido.

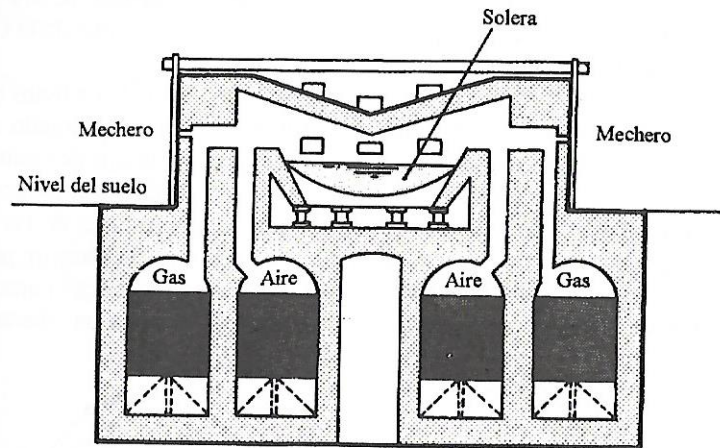


Figura 4

El crisol del horno tiene un revestimiento básico a base de ladrillos de  $OCa$ , con objeto de poder tratar arrabios con contenidos en  $P$  del 1,7 al 2%. La temperatura máxima no es muy superior a la de fusión del acero. La absorción de  $N_2$  es relativamente pequeña. La oxidación de las principales impurezas se realiza por adición de minerales de óxidos de hierro, que reaccionan con el  $C$  para formar  $CO$  que sube a la superficie produciendo un efecto de ebullición y colabora a homogeneizar la composición química de toda la carga. Una innovación posterior consistió en la inyección de  $O_2$  a través de una lanza. La operación resultaba lenta, entre 8 y 10 horas para afinar una carga, pero permitía realizar varios análisis para controlar la composición química final de forma muy precisa.

La reacción es:



La escoria, rica en fósforo y soluble en agua, se empleaba en agricultura como abono.

Como el refractario se gastaba en la reacción se solía agregar  $CaO$  para aumentar su duración. En este proceso el  $S$  y el  $P$  podían reducirse a niveles inferiores al 0,04%. Eliminar el  $P$  requiere, no obstante, unas condiciones fuertemente oxidantes perdiéndose antes todo el  $Mn$ , el  $Si$  y el  $C$ . En consecuencia, estos elementos se añadían en forma de ferroaleaciones, después de que las escorias fosforosas fuesen eliminadas.

El proceso, muy versátil, ofrecía una gran flexibilidad de carga pues podía tratar una amplia gama de mezclas de arrabio y chatarra, incluso grandes y pesadas piezas de esta última, difíciles de cargar en otro tipo de convertidor. Esta ventaja resultó muy útil en el reciclado de la chatarra bélica procedente de la II Guerra Mundial (\*).

La dilatada duración de la operación y su elevado coste energético fueron las causas de la obsolescencia de este proceso.

## 3. FABRICACIÓN DE ARRABIO

### 3.1. Fundamento del sistema

El proceso integral utiliza la ruta del horno alto,  $HA$  ó  $BF$ , *Blast Furnace*, para reducir los minerales de hierro. Al final se obtiene un producto desoxidado, altamente enriquecido en  $Fe$ , en torno al 95%, y de relativo bajo punto de fusión, que se denomina arrabio.

Este proceso, tecnológicamente complejo, permite obtener grandes cantidades de acero de alta pureza y calidad. Sin embargo, por la inversión requerida, costes operativos y la absoluta dependencia de la calidad y disponibilidad de las materias primas, su participación en la producción mundial de acero se ha visto reducida progresivamente desde mediados del siglo XX.

### 3.2. Materias primas

Las principales materias primas que intervienen en este proceso son:

- *Minerales de hierro.*
- *Fundentes.*
- *Carbón y coque.*
- *Combustibles fósiles, líquidos o gaseosos.*

(\*) N. del A. En España la máxima producción de acero Martin Siemens se alcanza en 1967, finalizando en 1983. Algunas siderurgias europeas conservan las altas chimeneas de evacuación de humos de estos hornos como vestigios arquitectónicos de las instalaciones desmanteladas.

### 3.2.1. Minerales de hierro

El *Fe* se encuentra en gran abundancia en la corteza terrestre en forma de diferentes minerales, aunque sólo dos de ellos se utilizan en la obtención de acero: los óxidos y el carbonato. Estos minerales, además de la mena, contienen la ganga, formada habitualmente por sílice, alúmina y carbonatos. Los elementos *S* y *P* que acompañan al mineral de *Fe* condicionan tanto su utilidad como el tipo de operación de horno alto necesaria para eliminar o reducir estos elementos perjudiciales.

Tipo de mineral	Composición base	Proporción de <i>Fe</i>
Óxidos	$Fe_3O_4$	72 %
	$Fe_2O_3$	70 %
	$Fe_2O_3(H_2O)_n$	60 %
Carbonato	$CO_3Fe$	48 %

La preparación del mineral es una actividad minera y consiste en la concentración, reducción de ganga mediante lavado, separación magnética, preparación física, trituración, cribado, etc.

Los minerales suministrados a la siderurgia integral se clasifican por su calidad química y su granulometría. Los gruesos pueden entrar directamente al horno alto, mientras que los finos han de ser sometidos previamente a procesos de aglomeración para elaborar cuerpos de mayor volumen con apropiada resistencia mecánica y densidad.

La aglomeración de finos se realiza en la propia planta siderúrgica. Para los de mayor diámetro la técnica utilizada es el *sinterizado* y para los más pequeños, la *peletización*.

El *sinterizado* consiste en aglomerar a alta temperatura una mezcla formada por los finos de mineral de hierro, polvo de coque y fundentes, en la que éstos últimos alcanzan un estado pastoso de manera que ligan al resto de las partículas.

La *peletización* implica la mezcla y amasado de los más finos o polvo de mineral con agua, polvo de coque y aglomerantes, como bentonita, cal hidratada, para formar los *pellets* verdes, que posteriormente tienen que ser secados y cocidos a alta temperatura para que adquieran la resistencia y solidez necesarias.

### 3.2.2. Carbón y coque

Su empleo no es directo, debiendo transformarse previamente en un producto adecuado para la carga y operación del horno: el *coque*. El coque siderúrgico es el resultado de la destilación seca del carbón por calentamiento en ausencia de aire.

El coque tiene tres misiones: combustible de alto poder calorífico, > 90% *C*, para alcanzar la temperatura de reacción, generar el gas reductor, *CO*, que transforma los óxidos de hierro y ser el soporte mecánico de la carga del horno, con la porosidad suficiente para permitir la evolución de los gases.

Los carbones más apropiados para su elaboración son las *hullas*, que garantizan un contenido intermedio de volátiles, 20 - 30%, y limitado de *S*. Estos carbones, adecuadamente mezclados y preparados a través de molienda y homogeneización, alimentan las *baterías de coque*, hornos donde se va a producir la coquización del carbón. Están formados por múltiples cámaras de destilación forradas de refractario, en las que se carga el carbón, separadas entre sí por cámaras de combustión donde se sitúan mecheros destinados a aportar, a través de las paredes, el calor necesario para la reacción. El proceso debe conseguir en el carbón temperaturas entre 1.000 y 1.100 °C, durante un período que oscila entre 12 y 20 h. Una vez terminado el proceso de coquización, el producto se deshorna, enfría, tritura y criba para dejarlo en las condiciones adecuadas para alimentar el horno alto.

Son importantes los subproductos obtenidos a partir del gas de destilación de la hulla. Tras el tratamiento adecuado se obtiene *gas rico* para su uso como combustible y productos químicos más pesados, tales como alquitrán, hidrocarburos y materias primas para la fabricación de abonos.

### 3.3. Equipos e instalaciones

El *HA* es un reactor de estructura vertical, que alterna zonas cilíndricas con troncocónicas, formado por un contenedor externo en gruesa chapa de acero y recubierto internamente por ladrillos refractarios. El perfil del horno varía a lo largo de su altura y, así, se distinguen varias zonas, directamente relacionadas con las reacciones que se van a producir.

El cuerpo del horno se divide en cuatro partes: el *fondo*, el *vientre*, la *cuba* y el *tragante*. El *fondo*, constituido por el crisol y el subcrisol, es la zona que va a contener el arrabio y la escoria. Dispone de diferentes *piqueras* para la evacuación de ambos. Encima del crisol y en la base del vientre se sitúan las *toberas* de entrada de aire caliente y también los inyectores de combustibles. El *vientre* es la parte de mayor diámetro de todo el horno. Por encima se sitúa la *cuba*, de forma ligeramente troncocónica, que alcanza la parte superior del horno o tragante. El *tragante* es la zona que recibe las cargas de las materias primas sólidas que entran al horno y cuenta con una serie de campanas, montacargas, canaletas, que tienen que garantizar la distribución precisa y homogénea de la alimentación, así como la estanqueidad de todo el reactor. Por último, el horno está culminado por el sistema de evacuación de gases, que regula su salida en función de la presión, temperatura y composición de los mismos y la marcha del proceso.

Los *refractarios* son clave en la instalación y operación del *HA* pues, además de contener y conducir los productos y materias primas a altas temperaturas, intervienen en las reacciones del horno. Sus especificaciones cubren tanto *aspectos físicos* de resistencia a la compresión, al desgaste, conductividad o permeabilidad como *características químicas* de reactividad con el arrabio y la escoria, basicidad, solubilidad, etc.

Los refractarios son productos cerámicos compuestos por diversos óxidos y ligados mediante aglomerantes para obtener las formas deseadas, ladrillos, placas, polvos para proyección o para moldeo. Por sus características químicas se dividen en dos grandes familias: los *refractarios ácidos*, basados en el sistema  $SiO_2$ , y en menor medida  $Al_2O_3$ , y los *refractarios básicos*, basados en el sistema  $MgO$ .

### 3.4. Marcha del horno alto

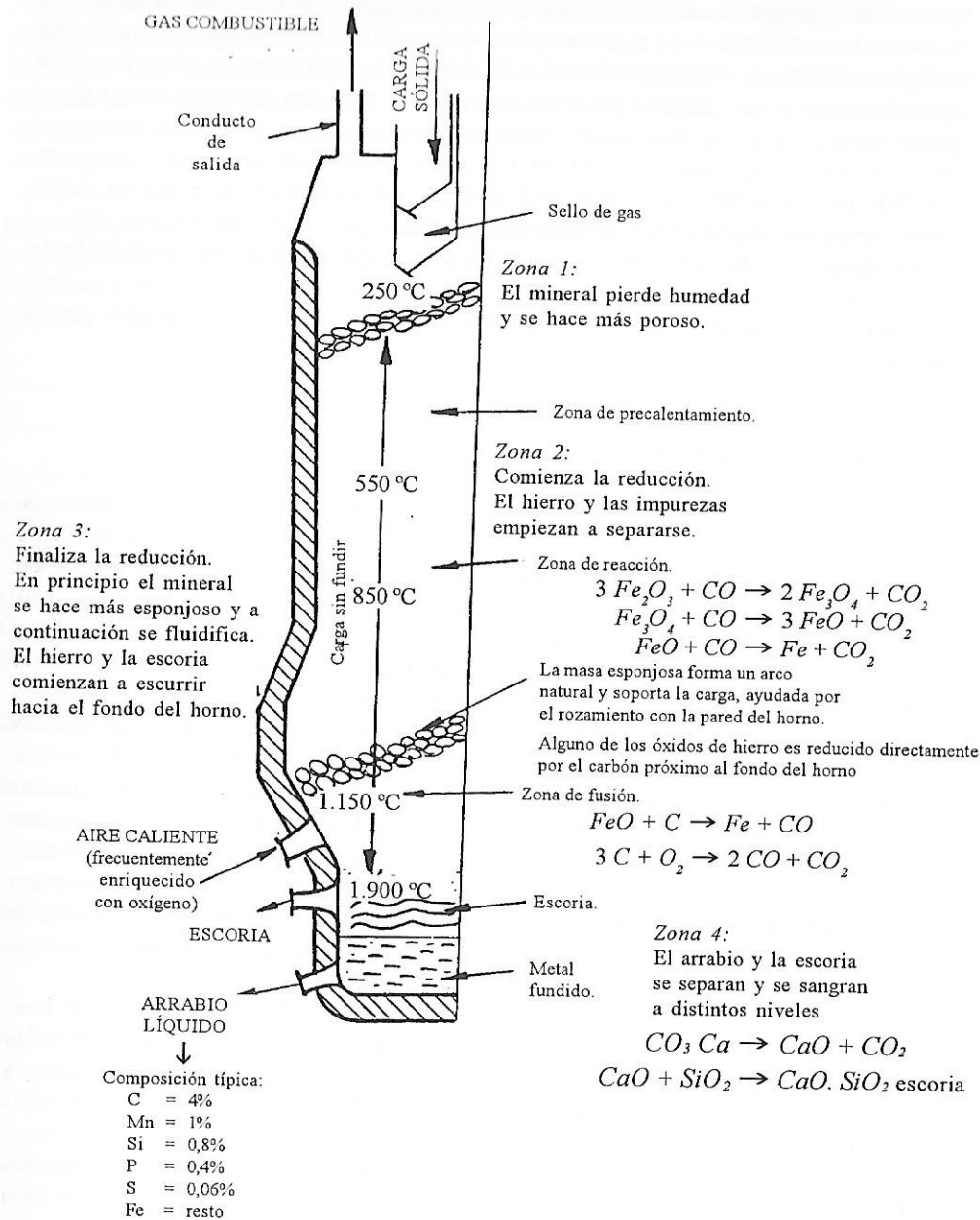
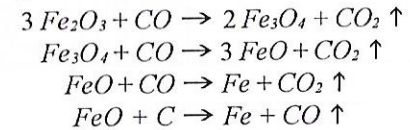


Figura 5

El *H/A* es un reactor que funciona a contracorriente, dado que los materiales sólidos y fríos cargados por su parte superior van descendiendo y transformándose hasta el crisol del horno, mientras que los introducidos por los inyectores y toberas inferiores, una importante cantidad de aire precalentado enriquecido frecuentemente con  $O_2$ , ascienden en forma de gases reactivos hasta salir por el tragante superior, como se observa en el esquema de la figura 5.

Para la obtención del arrabio se tiene que producir un proceso de reducción que libere el *Fe* del *O* con el que está combinado en el mineral. Este elemento es el *C*, que mezclado con el mineral se combina con el  $O_2$  para dar  $CO$  y posteriormente  $CO_2$ . Aunque las reacciones de reducción se inician antes, su cinética no alcanza un ritmo eficaz hasta los 1000 °C, evolucionando según las siguientes fórmulas:



Además, tienen lugar otras muchas reacciones en las que participan la ganga del mineral, los fundentes, los elementos residuales, los refractarios y los gases.

El proceso es continuo y, una vez estabilizado, se desarrolla en campañas de muy larga duración.

La marcha de un horno está condicionada por la cantidad y calidad de las cargas y así, por ejemplo, se habla de marchas de bajo volumen de escoria, cuando se trabaja con gran cantidad de *pelets*, o de marchas defosforantes, cuando el mineral de partida tiene un alto contenido en este elemento residual.

Por el tragante del horno se alimentan las cargas de minerales, coque y fundentes. Estas se realizan en capas cuidadosamente distribuidas y homogéneas para conseguir condiciones de partida iguales en toda la sección del horno. En este punto, las materias primas se precalientan por el contacto con los gases calientes ascendentes. A medida que los materiales bajan en la cuba, por efecto del continuo sangrado por el crisol, la temperatura de los gases de combustión se va elevando y se acelera la reacción de reducción del *Fe*, liberándose  $CO$  y  $CO_2$  que ascienden. Al mismo tiempo los fundentes se mezclan con la ganga dando origen a la escoria.

La figura 6 muestra las reacciones que tienen lugar a lo largo del perfil del horno alto.

En el vientre se alcanzan temperaturas próximas a los 2000 °C y allí ocurren fenómenos de reducción directa y el inicio de la fusión del hierro esponjoso que hasta entonces se ha ido formando. El arrabio líquido, más denso que la escoria y el resto de materiales en estado pastoso, se recoge en la parte más baja del crisol, desde donde se extrae periódicamente a través de las *piqueras de sangrado*. La escoria, por su parte, compuesta por una compleja mezcla de silicatos y carbonatos, se extrae por piqueras situadas a un nivel superior. El arrabio líquido se descarga en *cucharas torpedo* revestidas de material refractario, con capacidad de unas 270 Tm, para su transporte a la acería de convertidor o a la fundición de arrabio.

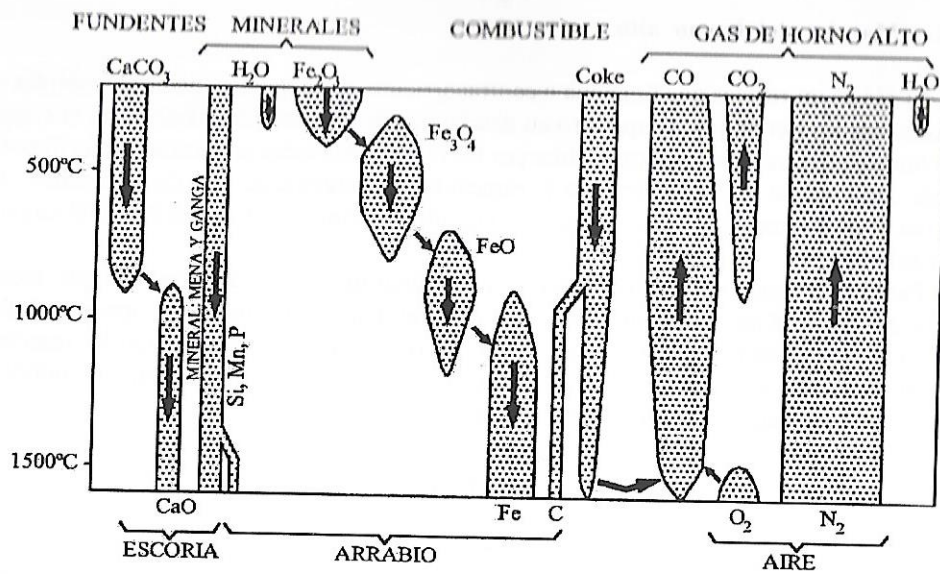


Figura 6

### 3.5. El arrabio y sus pretratamientos

El arrabio está definido por su composición química, en torno al 4%  $C$  y contenidos muy variables de  $Si$ ,  $Mn$ ,  $S$  y  $P$ . La ausencia de elementos residuales  $Cu$ ,  $Sn$ ,  $Ni$ ,  $N$ , le convierten en materia prima privilegiada para la fabricación de las calidades de acero que tienen restringidos estos elementos.

A la salida del horno alto el arrabio sufre, normalmente en cuchara, una serie de tratamientos con objeto de prepararlo para etapas posteriores. Se trata, básicamente, de operaciones de desfosforación y de desulfuración. Su necesidad depende de la calidad de los minerales y, en su caso, de los prerreducidos de partida y de las especificaciones finales del acero. Son procesos de diferente naturaleza pues el primero se desarrolla en entornos oxidantes, que implica la oxidación previa del  $Si$  antes del  $P$ , mientras que el segundo requiere escorias fuertemente reductoras. Ambos tratamientos se basan en adiciones, generalmente  $\text{C}_2\text{Ca}$  y gránulos de  $Mg$  metálico, que generan escorias donde quedan atrapados los compuestos de  $P$  ó  $S$ . Antes de continuar con otros tratamientos deben retirarse las escorias formadas para evitar la reversibilidad de la reacción.

## 4. FABRICACIÓN DE ACERO MEDIANTE CONVERTIDOR

### 4.1. Fundamento del sistema

La fabricación de acero a través del *convertidor al oxígeno* es la forma más habitual y

extendida de complementar la instalación del *HA* y permite obtener aceros de alta calidad con muy bajos niveles de impurezas, incluidos  $H$  y  $N$ . Es un proceso rápido, tiempo de ciclo "top to top" ~ 30-45 minutos, y de muy alta productividad, 250-400 Tm. por colada.

El arrabio procedente del *HA* y de la planta de pretratamiento tiene una composición química muy alejada de la que se requiere al acero y contiene además elementos que deben eliminarse. Las funciones básicas del convertidor son la decarburación del arrabio, la oxidación de los elementos perjudiciales o en exceso, como  $Si$ ,  $Mn$  y  $P$  y, por último, la desoxidación o *calmado* del acero.

El proceso es conocido como *BOC*, *BOF* ó *BOS*, *Basic Oxygen Converter, Furnace* o *Steelmaking*, en Estados Unidos, y como *L.D.* en Europa, iniciales de las ciudades austriacas Linz y Donavitz, cuyas siderurgias fueron las pioneras en su uso industrial. Se caracteriza por la inyección de  $\text{O}_2$  de alta pureza, > 99%, a velocidad supersónica sobre la superficie del arrabio líquido para conseguir las reacciones de decarburación y oxidación selectiva que, además, son fuertemente exotérmicas.

### 4.2. Materias primas

Las materias primas son: el arrabio procedente del *HA*, el  $\text{O}_2$ , la chatarra ~ 25% del total de la carga, los *fundentes* o *escorificantes* y las *ferroaleaciones*.

#### 4.2.1. Fundentes

Su misión es generar la escoria adecuada a las necesidades metalúrgicas de cada proceso, por lo que también se les denomina *escorificantes*.

Los elementos no metálicos, básicamente óxidos, que aparecen durante la fabricación del arrabio y del acero tienden a segregarse y a flotar, formando una capa de escoria sobre el metal líquido. Los fundentes se añaden para que se combinen a esa escoria "natural", de forma que reduzcan su punto de fusión, y la viscosidad y afinidad química de la escoria la haga apta para que cumpla su función metalúrgica de captadora de elementos indeseables.

Los fundentes más habituales son la caliza ó  $\text{CO}_3\text{Ca}$ , la cal viva ó  $\text{CaO}$ , la dolomía (\*), la bauxita (\*\*) y el espató de flúor o fluorita. Cada uno de ellos ofrece características y aplicaciones específicas.

#### 4.2.2. Ferroaleaciones

Son productos manufacturados ricos en  $Fe$  y en otros elementos, a través de los cuales

(\*) N. del A.: Dolomía: refractario básico de 2.300 °C. de punto de fusión a base de una mezcla íntima de óxidos de  $Ca$  y de  $Mg$  producto de la calcinación de la dolomita,  $\text{CO}_3\text{Ca} \cdot \text{CO}_3\text{Mg}$ .

(\*\*) N. del A.: Bauxita:  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$  con impurezas a base de arcilla y óxidos de hierro.



se incorporan al baño los elementos de aleación deseados. Se usan tanto para ajustar la composición como para desoxidar o realizar tratamientos metalúrgicos. En estos materiales las características más significativas son la composición y la granulometría. Es muy importante el control de elementos residuales, en particular *C*, *S* y *N*, pues como se utilizan en la etapa final de acabado del acero ya no existe la posibilidad de eliminar esos elementos del baño.

Ferroaleaciones habituales son: *Fe-Si*, *Si-Mn*, *Fe-Al*, *Fe-Cr*, *Fe-V*, *Fe-Nb*...

### 4.3. Equipos e instalaciones

Son el propio convertidor, las lanzas de soplado, los sistemas de adiciones y los equipos de captación y depuración de humos.

El *convertidor* es un recipiente cilíndrico revestido interiormente de refractario básico a base de *magnesia* (\*) o *dolomía*. La parte superior es cónica y posee una boca de carga de grandes dimensiones y una piqueta lateral para el colado del acero líquido. El convertidor está montado sobre elementos que le permiten bascular en ambos sentidos y también rotar sobre su eje vertical.

Las *lanzas* son de acero y están refrigeradas. Constan de sistemas para su posicionamiento y control de altura sobre la superficie del baño. Habitualmente se dispone de una lanza principal y una secundaria o *sub-lanza*.

Los *equipos de manipulación y adiciones* comprenden desde las *bateas* y *cucharas*, donde se transportan respectivamente la chatarra y el arrabio para la carga al convertidor, a los sistemas de tolvas, básculas y canalones de descarga usados para la adición de fundentes y ferroaleaciones. También se incluyen las *cucharas* y *escorieros*, donde se maneja el acero y la escoria resultantes del proceso y que se mueven con la ayuda de grandes grúas y vagonetas.

Los *equipos de captación y depuración de humos*, por la cantidad de gases que se generan, son importantes. Comprenden los sistemas de refrigeración, separación de polvos y recuperación de gas combustible, que se utiliza en otras instalaciones de la planta.

### 4.4. Marcha del convertidor

Se inicia con la carga de la chatarra y, sobre ésta, la del arrabio, para lo cual el convertidor se inclina para recibirlas, como muestra la figura 7. El motivo del uso de la chatarra es doble: enfriar el líquido, pues las reacciones de oxidación que se desarrollan son fuerte-

(\*) N. del A.: Magnesita: refractario básico de 2.800 °C. de punto de fusión a base de  $MgO$ , producto de la calcinación de la magnesita  $CO_3Mg$ .

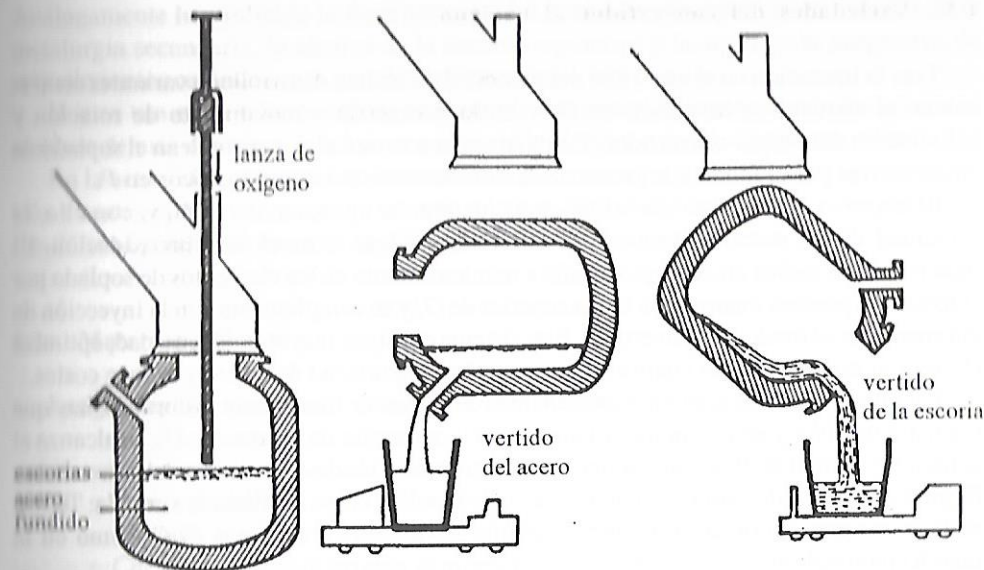


Figura 7

mente exotérmicas, alcanzándose temperaturas próximas a los 3.000 °C, y aumentar el rendimiento metálico del proceso.

Completada la carga, el convertidor retorna a la posición vertical y se inicia la *fase de soplado*, añadiéndose simultáneamente los *fundentes* y *escorificantes*. Durante el soplado, a velocidad supersónica, se va ajustando tanto la cantidad y energía del chorro de  $O_2$  como la distancia del extremo de la lanza al baño, que oscila entre 1 y 2 m. Estos tres parámetros son fundamentales para controlar la velocidad de reacción, la agitación del baño y la formación de escoria.



Las primeras reacciones son la decarburación del baño a través de la producción masiva de  $CO$  y  $CO_2$  y la oxidación del *Si*. Cuando el *C* se ha reducido a una décima parte aproximadamente del contenido original, empiezan las reacciones de oxidación del *P* y del *Mn* que, como  $P_2O_5$  y  $MnO$ , se combinan con el *Ca* y pasan a la escoria, y la del propio *Fe*. En efecto, una pequeña parte de *Fe* también se oxida y, como  $OFe$ , se pierde en la escoria. En el baño el contenido en *O* va aumentando y, al final, se hace necesaria la adición de ferroaleaciones desoxidantes que capturen parte de ese *O* disuelto en el acero. Para controlar la temperatura se agrega chatarra.

El acero, por último, a través de la piqueta de colada, se vuelca a la cuchara que lo trasladará a la instalación de *metalurgia secundaria* y la escoria, por la boca de carga, se vuelca a los conos de escoria.

#### 4.5. Variedades del convertidor al oxígeno

Tras la invención en el año 1950 del proceso *L.D.* se han desarrollado variantes centradas en el sistema de inyección de  $O_2$  y en la geometría y movimiento de rotación y basculación del propio convertidor. También existen variedades que emplean el soplado de gases inertes por el fondo y la *práctica de dos escorias*, para arrabios ricos en *P*.

El objetivo del *soplado por el fondo* es mejorar la agitación del baño y, con ello, la velocidad de las reacciones metal-escoria, reduciéndose el nivel de sobreoxidación. El inconveniente radica en el propio diseño y mantenimiento de los elementos de soplado por el fondo. El proceso mantiene la lanza superior de  $O_2$  y se complementa con la inyección de gas inerte por el fondo del convertidor. Este sistema consigue mayor productividad, optimiza el proceso metalúrgico en cuanto a limpieza y homogeneidad del acero y reduce costes.

Para tratar arrabios altos en *P*, procedentes de menas de hierro muy fosforadas, hay que realizar una *doble escorificación*. Cuando, tras la actuación de la lanza de  $O_2$ , se alcanza el contenido normal de *P*, se interrumpe la operación sangrándose la escoria del convertidor. El producto obtenido, fosfato tricálcico, se suele emplear como fertilizante agrícola. Terminada la sangría continúa la operación añadiendo al convertidor más  $CaO$ , como en la marcha habitual, para la generación de una segunda escoria.

### 5. FABRICACIÓN DE ACERO MEDIANTE HORNO ELÉCTRICO DE ARCO

#### 5.1. Fundamento del sistema

Los hornos eléctricos de arco, *HEA*, *EAF*, *Electric Arc Furnace*, se basan en la transformación de la energía eléctrica en calor que, aplicado a la carga, provoca la elevación de su temperatura hasta pasar al estado líquido. El arco eléctrico se origina al paso de la corriente eléctrica por un medio gaseoso entre dos electrodos separados. La soldadura por arco y los hornos de arco son procesos industriales con análogo fundamento.

Existen hornos de arco tanto de corriente alterna como continua. Los primeros disponen de tres electrodos situados sobre la carga a fundir, que está puesta a tierra, y el arco salta entre los electrodos a través de la carga de chatarra. Los segundos disponen de dos electrodos, el cátodo sobre la carga y el ánodo en la parte inferior de la misma y en contacto con ella, de manera que el arco salta entre el cátodo y la carga.

El origen de los hornos de arco se debe al investigador francés Paul Heroult, quien a finales del siglo XIX estudió la fusión de metales con la energía del arco entre dos electrodos. La primera colada industrial de acero en un horno de arco se realizó a principios del siglo XX. Durante buena parte de ese siglo los hornos de arco se caracterizaron por fabricar productos de alta calidad, aunque con bajo rendimiento, dedicándolos en exclusiva a producir aceros especiales y aleados. En los años setenta, al mejorar la potencia de los transformadores, aparecen los "hornos de alta potencia" y "ultra alta potencia". A partir de ese momento el proceso es rentable para fabricar aceros al carbono.

Innovaciones que han ido mejorando su rentabilidad han sido la incorporación de quemadores de combustibles líquidos o gaseosos y el creciente uso del soplado de  $O_2$ .

Análogamente han influido la incorporación del *horno de afino* para la realización de la metalurgia secundaria, la técnica de la *escoria espumosa* y la sustitución progresiva de revestimientos cerámicos por paneles refrigerados.

Hoy se usa en la fabricación de una amplísima gama de aceros, desde los aceros al carbono de más consumo, hasta aceros altamente aleados o de fabricación muy limitada.

En la actualidad presenta importantes ventajas respecto a otros métodos: menor inversión y costes operativos, pequeño tamaño relativo, facilidad de ubicación y versatilidad y flexibilidad para la fabricación de diferentes calidades y series cortas.

#### 5.2. Materias primas

Las principales materias primas de este proceso son:

- *Chatarra.*
- *Electricidad.*
- *Prerreducidos.*
- *Oxígeno.*
- *Carbón.*
- *Combustibles fósiles, tanto líquidos como gaseosos.*
- *Cal y escorificantes.*

Muchas de ellas son comunes con las del proceso integral, ya estudiado. Hacemos a continuación una mención más amplia de la chatarra y los prerreducidos.

##### 5.2.1. Chatarra

La chatarra es la materia prima básica del horno eléctrico de arco, en el que puede suponer el 100% de la carga y del convertidor, donde llega hasta el 25% de la misma.

Como chatarra se entienden las partes, piezas o conjuntos de piezas metálicas férricas que no tienen ninguna utilidad tecnológica y son susceptibles de ser recicladas para la fabricación de acero nuevo. Su origen y tipo es tan amplio como las aplicaciones de los aceros, existiendo las *chatarras de transformación*, procedentes de los recortes y virutas producidos en la fabricación de piezas y componentes de acero y las *chatarras de recuperación*, procedentes de los equipos que alcanzan el final de su vida útil, tales como electrodomésticos, embalajes y envases, estructuras, ferrocarriles, barcos, automóviles, etc.

Las chatarras se caracterizan por su:

- *Rendimiento metálico:* es decir, contenido en *Fe* metálico.
- *Contenido en elementos residuales metálicos no férricos*, que pueden afectar negativamente al producto a fabricar: *Cu, Sn, Zn, Cr, V, Mo, Ni...* Algunos se eliminan en el proceso, pero otros pasan inevitablemente al producto final.
- *Limpieza:* contenido en elementos no metálicos, tales como plásticos, espumas de poliuretano, tierra, pinturas, aceites.

- *Densidad*: peso por unidad de volumen de la chatarra, que condiciona el ritmo de operación de las cargas.
- *Tamaño*: rango y distribución de longitudes de las piezas. Junto con la densidad influye en el rendimiento del ciclo.
- *Seguridad*: ausencia de depósitos cerrados, de elementos radioactivos u otros agentes contaminantes.

Existen especificaciones y normas sobre chatarras para facilitar su clasificación según las anteriores características. Sin embargo, su evaluación es un problema bastante complejo.

Previamente a su uso la chatarra se trata para modificar alguna de las características mencionadas. Así, existen *equipos de compactación* de restos voluminosos y poco densos, como bidones, recortes de estampación, chapas ligeras, de *cizallado y fragmentación*, sistemas de *limpieza*, basados en el cribado y separación magnética y *métodos fisicoquímicos*, electrolíticos, disolución, etc., para eliminar elementos residuales.

La producción de chatarra de un país es función de múltiples factores que incluyen el tipo y nivel de consumo de acero en el pasado, la estructura industrial pasada y presente de la nación y las rutas de su recuperación y tratamiento. Es habitual que, como ocurre con cualquier otra materia prima, se den situaciones de países con excedentes y países deficitarios. España es altamente deficitaria en chatarra y acude al mercado internacional para satisfacer la demanda de su siderurgia.

### 5.2.2. Prerreducidos

Se emplean como sustitutivo parcial de la carga de chatarra. Proceden de la *Reducción Directa* del mineral de Hierro, HRD o DRI, *Direct Reduction Iron*, ofreciendo un alto contenido férrico y bajo en elementos residuales.

Fe total	Fe metal	C	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
93%	87%	1.8%	1.7%	0.5%	0.3%

Aunque el principio del proceso es muy antiguo, su aplicación no surge hasta mediados del siglo XX, cuando se producen los primeros síntomas de escasez de chatarra. Se basa en la reducción directa del mineral de hierro a temperaturas inferiores a la de fusión, mediante un agente fuertemente reductor como gas natural o carbón.

Se han patentado varios procesos, la mayoría en lecho fluidificado, con gas natural como agente reductor y otros, minoritarios, donde este papel lo desempeña el carbón. Son viables sólo en países que cuentan con minas de hierro de buena calidad y aquellos combustibles a bajo precio. Los principales productores mundiales son: México, Venezuela, Trinidad y Tobago, Sudáfrica e Irán.

Los prerreducidos, por su bajo contenido en elementos residuales *Cu, Sn, Mo,...* y de *N*, inevitables en la chatarra, permiten obtener en el horno de arco eléctrico aceros equivalentes a los procedentes de convertidor. Por otra parte, su homogeneidad y regularidad de tamaño facilitan la preparación de las cargas.

Las características principales del HRD vienen definidas por los siguientes parámetros: grado de metalización, grado de reducción y contenido en ganga. El *grado de metalización* es la relación entre el hierro metálico total del prerreducido y el original del mineral, el *grado de reducción* es la relación entre el contenido de oxígeno del prerreducido y el original del mineral y el *contenido en ganga*, muy importante, ya que como no hay paso al estado líquido toda la escoria está atrapada en el prerreducido.

## 5.3. Equipos e instalaciones

Se agrupan en tres grandes conjuntos: los equipos eléctricos, los mecánicos y los auxiliares.

### 5.3.1. Equipos eléctricos

*Transformador*: tiene la misión de transformar la corriente de alta tensión a la de trabajo del horno. El secundario del transformador dispone de múltiples escalones de tensión.

*Cables de potencia*: conjunto de cables flexibles refrigerados que conducen la corriente de alta intensidad a los electrodos.

*Sistema de regulación y accionamiento de los electrodos*: encargado de regular la estabilidad y potencia del arco eléctrico, mediante la elevación y descenso de los electrodos.

### 5.3.2. Equipos mecánicos

*Solera y cuba del horno*: destinados a contener la chatarra y, posteriormente, el acero líquido. Geométricamente conforman un cilindro de planta circular o ligeramente ovoidal. La solera está recubierta interiormente de refractario ácido o básico, aunque es más común éste último y cuenta con un sistema de apertura y cierre por el fondo, *puerta de colada*, destinada al vaciado del acero fundido. La cuba o paredes del horno está formada por paneles refrigerados fabricados de chapa y tubos de acero, o de cobre los situados en la línea de escoria. La cuba cuenta con una *puerta de desescoriado* diametralmente opuesta a la piqueta de colada. Por esta puerta, además de sangrarse la escoria es habitual introducir lanzas de oxígeno y gas, siendo también el lugar de la toma de muestras y por donde se proyecta el refractario. El esquema de la figura 8 muestra el aspecto de un horno eléctrico de arco.

*Bóveda*: está formada por paneles refrigerados y, a veces, su centro por material cerámico. Los orificios pasantes son varios: por un lado los destinados a los electrodos: 3 para c.a. y 1 para c.c., otro para la evacuación directa de humos y gases y, en algunos casos, otro más para las adiciones directas. La mayoría de las bóvedas son móviles para permitir la carga superior del horno. La bóveda se eleva y pivota respecto a un eje externo a la cuba.

*Brazos portaelectrodos:* forman un pórtico que accionado desde el sistema de regulación sube y baja los electrodos.

*Sistema de basculación:* accionado por cilindros hidráulicos permite bascular el conjunto completo del horno en ambos sentidos para desescoriar y colar el acero.

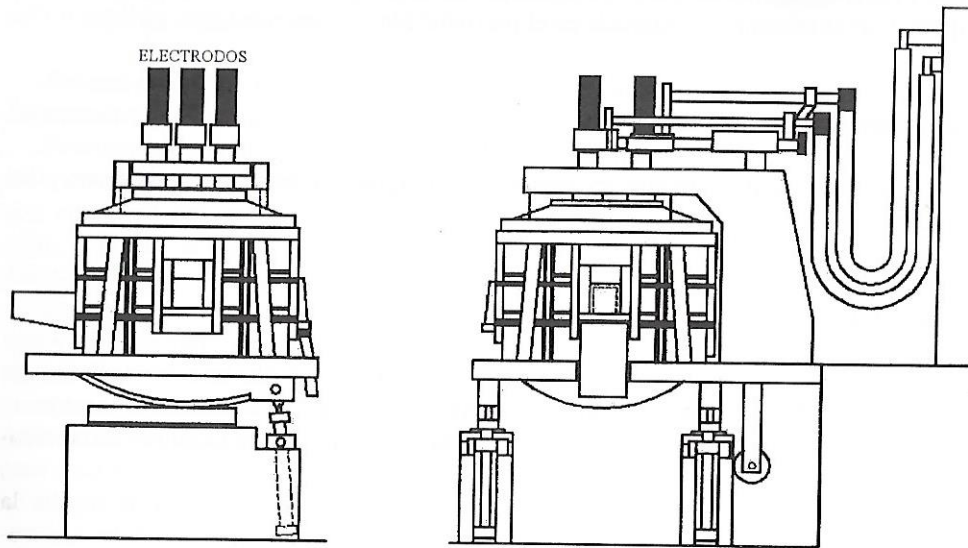


Figura 8

### 5.3.3. Equipos auxiliares

*Sistemas de cestas y manejo de chatarra:* incluye grúas, cestas de apertura inferior para el transporte y descarga de chatarra en el horno y vagonetas para el transporte de la carga sobre el pavimento.

*Sistemas de aspiración y tratamiento de humos:* destinados a captar y filtrar los humos recogidos directamente del interior del horno y los que escapan a las naves en las fases de carga, desescoriado y vuelco.

*Equipos de inyección de combustibles, oxígeno y escorificantes:* dentro de este apartado se encuentran las instalaciones destinadas a la inyección de carbón y cal, basados en sistemas de arrastre neumático, los inyectores de  $O_2$  mediante lanzas y los mecheros o quemadores de combustibles líquidos o gaseosos.

## 5.4. Marcha del horno eléctrico

Se divide en dos etapas: la de fusión de la carga y la de afino.

La etapa de fusión se inicia con la carga, mediante cestas, de la chatarra, prerreducidos,

carbón y escorificantes. Dada su poca densidad es habitual que sean necesarias varias cestas para completar la capacidad del horno. En este caso, tras cada carga se cierra la bóveda y se aplica tensión a los electrodos, haciendo saltar el arco para fundir los materiales cargados. Al fundirse liberan espacio dentro del horno permitiendo así una nueva carga. Un horno industrial requiere entre dos y cinco cestas de carga.

Durante la fusión la tensión de los electrodos varía con el tipo de carga y el grado de fusión. El objetivo es alcanzar un equilibrio entre tiempo y energía consumida. Se habla de *arco corto*: baja tensión e intensidad elevada, y *arco largo*: alta tensión e intensidad reducida. Estos últimos son los más convenientes, pues permiten usar mayores potencias con menor consumo de electrodos, mayor factor de potencia y mejor rendimiento eléctrico. Sin embargo, perjudican más al refractario y a las paredes de paneles refrigerados. A la vez que se aplica tensión a los electrodos se usan sistemas auxiliares para acelerar la fusión, como los quemadores de combustibles líquidos y gaseosos, que trabajan como mecheros, y las lanzas de  $O_2$ , que actúan sobre la chatarra una vez precalentada, a modo de oxicorte.

El período de fusión finaliza cuando todo el material para elaborar la colada está fundido. Entonces comienza la etapa de afino.

La etapa de afino tiene tres fases: el *afino oxidante*, destinado a eliminar elementos indeseables en forma de óxidos, el *afino reductor* destinado a eliminar el  $S$  y a reducir el contenido de  $O$  del metal y el *ajuste de composición final*.

Durante el *afino oxidante* se inyecta  $O_2$  que provoca la oxidación de los elementos  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ , que pasan a formar óxidos y quedan retenidos en la escoria. De igual manera el  $C$  disuelto en el acero y el añadido con la carga se oxida, produciendo  $CO$  que se evacúa en forma gaseosa.

La escoria que se forma en esta etapa está compuesta por la cal añadida con las cargas y los productos resultantes de la oxidación antes mencionada. La principal función de la cal es servir como absorbente y depurador de los elementos no metálicos que contiene el acero y que se van combinando con el oxígeno. Según evoluciona el afino la escoria se va saturando en esos elementos, debiendo realizarse el desescoriado a la vez que se inyecta más cal fresca para regenerarla.

Como la potencia eléctrica requerida para la etapa de afino es muy inferior a la requerida para la de fusión, con la intención de reducir costes y optimizar el rendimiento de la instalación, las fases de afino reductor y de ajuste de composición se ejecutan fuera del horno de fusión, incorporándose a la metalurgia secundaria en el horno de afino. De esta manera *el proceso de horno eléctrico de arco comprende únicamente la fusión de la carga y el primer afino oxidante*. Esto se conoce como "*marcha a una escoria*", a diferencia de cuando se realiza la etapa completa de afino, que da lugar a la "*marcha a dos escorias*".

Mención especial merece la técnica denominada *escoria espumosa*. Tiene por objeto la generación de una importante cantidad de gases, básicamente  $CO$ , en la interfase entre el metal y la escoria, de manera que la evolución de las burbujas aumente el volumen de la escoria hasta que ésta llegue a cubrir la totalidad del arco. Para su ejecución se inyecta simultáneamente  $O_2$  a alta velocidad y productos carbonosos en la interfase metal-escoria, de manera que se produzca de manera casi inmediata la generación de abundante  $CO$ . La

inyección se realiza a través de toberas distribuidas radialmente o por lanzas manipuladas a distancia, como se observa en el esquema de la figura 9, a través de la puerta de desescoriado. Las ventajas de esta técnica son energéticas, porque la totalidad de la energía del arco es recibida por el sistema metal-escoria, y operativas, porque se elimina la radiación directa del arco hacia las paredes del horno, causa de daños en el refractario y en los paneles refrigerados.

El afino oxidante termina cuando se han eliminado en suficiente medida los elementos no deseados. Una vez conseguido sólo queda el ajuste de temperatura y el vuelco del acero sobre la cuchara de transporte. En la actualidad los hornos se sangran por la solera, lo que reduce al mínimo el paso de residuos de escoria con el caldo.

En este punto confluyen las dos grandes rutas de fabricación integral y no integral. El tratamiento que el acero reciba a partir de ahora, *metalurgia secundaria* y *solidificación*, ya no está condicionado por su origen, sino por el producto a fabricar.

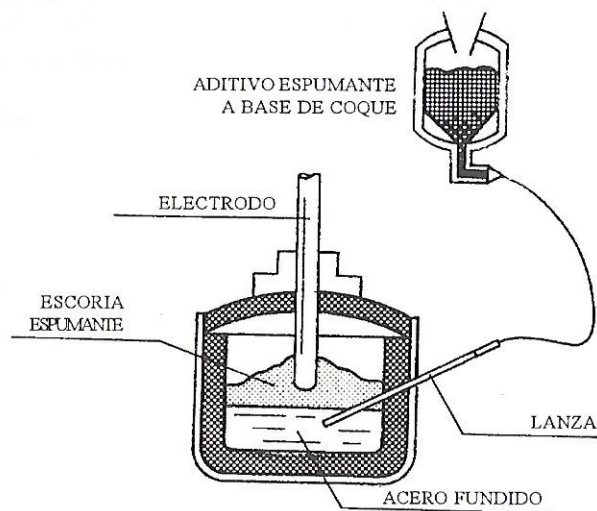


Figura 9

### 5.5. Nuevos desarrollos en horno eléctrico

Se centran en la mejora de la eficiencia energética y el incremento del aporte de energía no eléctrica. En esta línea cabe destacar el precalentamiento de la chatarra y la inyección de gases inertes y de combustibles por el fondo.

El precalentamiento de la chatarra, usando el calor residual de los humos se plantea como un sistema susceptible de proporcionar un considerable ahorro energético. Con la entalpía de los humos y el calor conseguido al quemar el  $CO$  contenido en los mismos a  $CO_2$ , se puede conseguir en la chatarra una temperatura de  $500\text{ }^\circ\text{C}$ . Si, además, este calentamiento se combina con el conseguido con la ayuda de quemadores es posible alcanzar los  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , aunque en este caso la cantidad de gas necesaria supera con mucho el ahorro de energía eléctrica obtenido.

La inyección por el fondo se realiza a través de tapones cerámicos porosos que permiten introducir gases inertes,  $N_2$  ó  $Ar$ , para la agitación del baño y gas natural y  $O_2$  para la combustión. La eficacia se basa no sólo en el aporte energético del gas natural, sino en la mejora de la conducción térmica dentro del baño líquido provocada por las corrientes inducidas desde el fondo de la cuba.

Por otro lado, y buscando el aumento de productividad y la reducción del tiempo de ciclo, se han ideado sistemas de alimentación continua de chatarra, que eviten la discontinuidad que supone la carga con cestas por la bóveda, e instalaciones de doble cuba o cuba gemela, en la que se trabaja alternativamente con un solo grupo de electrodos sobre las dos cubas, de manera que durante los momentos sin tensión en una cuba pueda aplicarse ésta en la otra.

## 6. METALURGIA SECUNDARIA

### 6.1. Fundamento de la operación

El acero líquido, tal y como sale del convertidor o del horno eléctrico de arco, no puede considerarse totalmente acabado.

Los objetivos de la *metalurgia secundaria*, *LMF*, *Ladle Metallurgy Facility*, son múltiples y combinan los de carácter metalúrgico con los económicos. Entre estos últimos cabe destacar la mejora en la eficiencia de las instalaciones de cabecera al trasladar operaciones de poco consumo energético a instalaciones secundarias, reduciéndose así los tiempos de ciclo de hornos eléctricos y convertidores que pueden dedicarse en exclusiva a las tareas para las que son imprescindibles.

Los objetivos técnicos de la metalurgia secundaria son:

- Reducción del contenido de gases  $H$ ,  $O$ ,  $N$ .
- Reducción del contenido de  $S$ .
- Mejora de la limpieza del acero, eliminando inclusiones no metálicas.
- Control de la morfología de las inclusiones residuales.
- Ajuste preciso de la composición química a la exigida en la especificación.

Los procesos de afino o de metalurgia secundaria utilizan varias técnicas que incluyen el trabajo bajo vacío o a presión atmosférica, con o sin fuente de calentamiento externo y con soplado de gases inertes o activos.

### 6.2. Equipos e instalaciones

Son tan variados como los métodos de afino, pero los más significativos son los hornos cuchara y las instalaciones de vacío.

El *horno cuchara* consiste en una bóveda que se acopla a la parte superior de la cuchara que contiene el acero y un conjunto de equipos auxiliares para el soplado de gases y adición de ferroaleaciones, fundentes y otros aditivos. La bóveda cuenta con tres electrodos, alimentados por un transformador, que calientan la colada por arco eléctrico, compensando las pérdidas térmicas durante el período de afino.

Para asegurar la homogeneidad del caldo, tanto en composición como en temperatura, se dispone de sistemas de agitación. El más habitual es el soplado de gases inertes,  $N_2$  ó  $Ar$ , por el fondo la cuchara. También se han desarrollado equipos de agitación por inducción electromagnética.

Las instalaciones de vacío más habituales son: *desgasificación del chorro de colada*, en el que se hace pasar el chorro de acero entre dos cucharas a través de una cámara de vacío, la *desgasificación en la cuchara*, en donde la bóveda cierra herméticamente sobre la cuchara y posteriormente se hace el vacío y la *desgasificación por recirculación*, sistema en el que se hace circular el acero repetidas veces por una cámara donde se ha hecho el vacío. La figura 10 muestra esquemáticamente las instalaciones descritas.

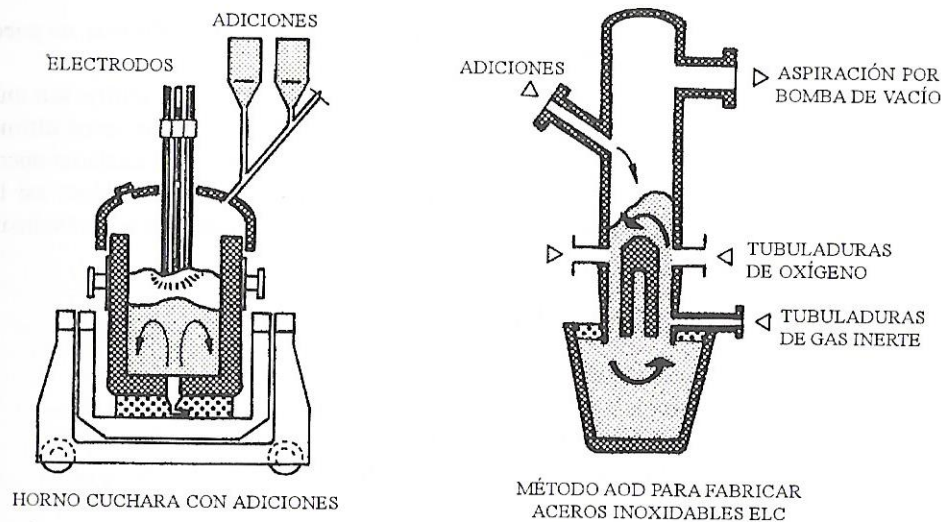


Figura 10

### 6.3. Marchas de metalurgia secundaria

Existen muchos sistemas y patentes relativos a tratamientos de metalurgia secundaria, aunque todos se basan en los mismos planteamientos. Se tratan aquí los principios básicos de la marcha de afino.

#### 6.3.1. Afino en vacío

Se plantea en muchas instalaciones siderúrgicas como una primera etapa de la metalurgia secundaria, que luego continúa con el afino reductor a presión atmosférica.

La desgasificación en vacío, utilizada para la eliminación del  $H$  y, en menor medida, del  $N$ , se basa en el cambio de la presión parcial de los gases disueltos de manera que éstos evolucionen espontáneamente fuera del acero. Su eficacia está condicionada por la cinética de la reacción y la nucleación de las burbujas, que se favorece por la presencia de una corriente de gas inerte que realiza un efecto de "lavado". La operación se realiza en 10-20 minutos.

Es importante su uso en la fabricación de aceros inoxidable, donde el vacío tiene como función principal la decarburación mediante el soplado de  $O_2$ , *VOD*, *Vacuum Oxygen Decarburization* o de una mezcla de  $Ar$  y  $O_2$ , *AOD*, *Argon Oxygen Decarburization* a través del acero bajo vacío, de manera que se elimina el  $C$  en forma de  $CO$  sin afectar al  $Cr$ . Este último se muestra en la página 10.

#### 6.3.2. Afino reductor

Se aplica directamente cuando no se exige al acero una fuerte reducción del contenido en gases disueltos.

La primera etapa está dedicada a la desoxidación del acero procedente del horno eléctrico o del convertidor. La reducción de  $O$  se consigue mediante la adición de agentes con gran afinidad por ese elemento que a la temperatura de tratamiento, unos  $1600^\circ C$  aproximadamente, reaccionan formando óxidos sólidos que con una conveniente agitación quedarán retenidos mayoritariamente en la superficie en forma de escoria. Los productos desoxidantes más habituales son  $Al$  y  $Si$ , añadidos en forma de ferroaleaciones.

La escoria de afino reductor se genera agregando cal, espato de flúor y carburo cálcico, que se tiene que ir renovando a medida que se absorben los óxidos ácidos, fundamentalmente  $SiO_2$ , procedentes del baño.

Como complemento, puede resultar necesario un tratamiento de las inclusiones no atrapadas en la escoria y que quedan en suspensión en el acero. Existen métodos basados en el uso de  $Ca$  para obtener una morfología más favorable de estas inclusiones.

Una vez conseguidas características reductoras en la escoria, se dan las condiciones propicias para la reducción del  $S$ , que se realiza en forma de  $SCa$  cuando la actividad del  $O$  es suficientemente baja.

Simultáneamente a la evolución de la desulfuración, y cuando ya el nivel de  $O$  es bajo, se van añadiendo el resto de aleantes  $Cr$ ,  $Ni$ ,  $V$ ,  $Mn$ ,  $Nb$ ,  $Mo$ , en forma de ferroaleaciones, según la especificación y grado de calidad del acero.

Durante la operación se mantiene el baño agitado soplando gases por el fondo, normalmente  $N_2$  o  $Ar$ , para garantizar tanto la interacción del líquido con la escoria como la homogeneidad de la composición química y de la temperatura. De igual manera se aplica tensión a los electrodos para adecuar la temperatura del baño.

## 6.4. Técnicas de refusión

Se describen dos técnicas orientadas exclusivamente a la fabricación de aceros ultralimpios: la *refusión bajo vacío* y la *refusión bajo electroescoria*. Se aplican a aceros que han sido fundidos, afinados y solidificados por métodos convencionales.

Ambas se basan en la fusión de un electrodo de acero, que ya presenta la composición deseada, dentro de un crisol refrigerado y en unas condiciones que promueven la depuración de gases o de elementos residuales como *S* o inclusiones no metálicas.

El método de refusión bajo vacío, *VAR*, *Vacuum Arc Remelting*, consiste en hacer saltar un arco entre el electrodo consumible de acero y el fondo del crisol en un entorno en el que se ha hecho el vacío. A medida que se va produciendo la fusión del acero, se va solidificando un nuevo lingote con la forma del crisol, pero que por efecto del vacío y de las altas temperaturas ofrece un contenido en gases, particularmente *H*, mucho menor que el del acero de partida y unas segregaciones mínimas.

La refusión bajo electroescoria reductora, *ESR*, *Electro Slag Remelting*, tiene lugar de forma muy análoga a la anterior, pero se incorpora una escoria sintética que envuelve el extremo del electrodo de acero que se está fundiendo. Las pequeñas gotas de metal fundido se mezclan íntimamente con la escoria, que realiza una labor de afino desulfurante y de retención de inclusiones. La figura 11 describe esquemáticamente esta instalación. De esta manera se obtienen aceros con contenidos extraordinariamente bajos en *S* y muy limpios de inclusiones.

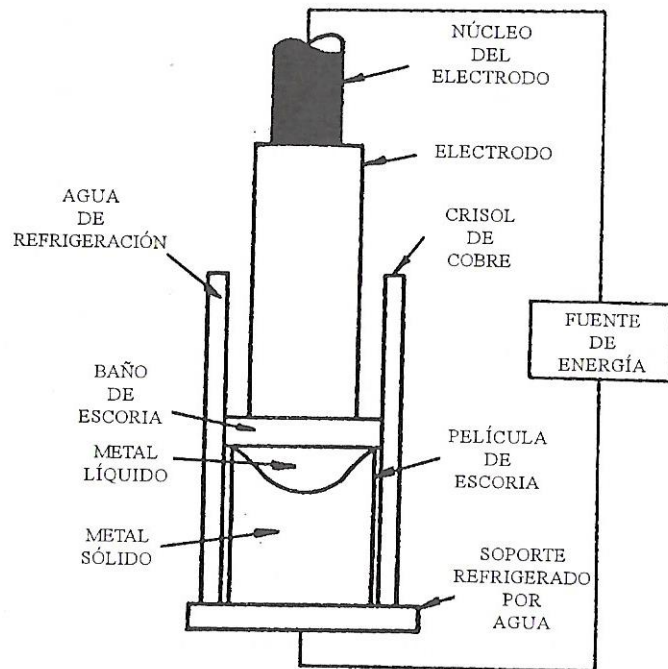


Figura 11

## 7. SOLIDIFICACIÓN MEDIANTE COLADA CONTINUA

### 7.1. Fundamentos y características del proceso

La colada continua, *CC*, *Continuous Casting*, es un proceso para fabricar semiproductos en el que el acero se vierte directamente sobre un molde sin fondo, del que se extrae y solidifica al mismo ritmo que el líquido se aporta a la *artesa*. El molde tiene una sección transversal que se corresponde con la del semiproducto a fabricar, cuadrada para desbastes y palanquillas, rectangular para chapas y cualquier otra especial para otros productos, como redondos, preformas, etc.

La característica que diferencia este proceso de solidificación respecto a cualquier otro es la *continuidad*. El semiproducto sale sin interrupción de la máquina mientras exista suministro de acero líquido. Los demás procesos de solidificación están condicionados por un tamaño de lote, limitado por el número de lingoteras o moldes disponibles y la secuencia de operaciones de colada, solidificación y desmoldeo. En la colada continua todo ello se realiza simultáneamente, permitiendo alcanzar unos niveles de productividad desconocidos para cualquiera de los métodos por lotes.

Desde mediados del siglo XX, cuando esta técnica empieza a implantarse en el mundo, su crecimiento ha sido espectacular, habiendo superado los problemas de calidad que presentaban ciertos tipos de aceros y llegando a la situación actual de absoluta preponderancia como método de fabricación de semiproductos de acero.

España en la actualidad procesa mediante colada continua el 96% de la producción de acero. Únicamente quedan fuera de este método los tochos de gran dimensión para forja, algunos aceros de muy alta aleación y el acero moldeado.

Los retos que ha tenido que superar el sistema de colada continua frente a los sistemas "tradicionales" han sido la homogeneidad en las características de todo el producto, el control y reducción de los defectos internos y las exigencias de un buen acabado superficial.

Las ventajas inherentes a este sistema incluyen la alta productividad, tanto por la capacidad de las instalaciones como por la reducción de los tiempos de ciclo, la reducción de operaciones, con el consiguiente ahorro en mano de obra y energía, la posibilidad de fabricar semiproductos para laminación que eliminan la transformación de lingotes a desbastes y el aumento del rendimiento metálico de la instalación al eliminar la mayoría de los despuntes, saneados, mazarotas, etc.

### 7.2. Equipos e instalaciones

Siguiendo el flujo del acero en el proceso, los elementos principales de una instalación de colada continua son:

- *cuchara*
- *artesa*
- *sistemas de extracción y enderezado*
- *equipos de corte*