

PROCESOS DE FABRICACION DE METALES FERROSOS

GUIA DE ESTUDIO DE LA UNIDAD IV

REFINACIÓN SECUNDARIA

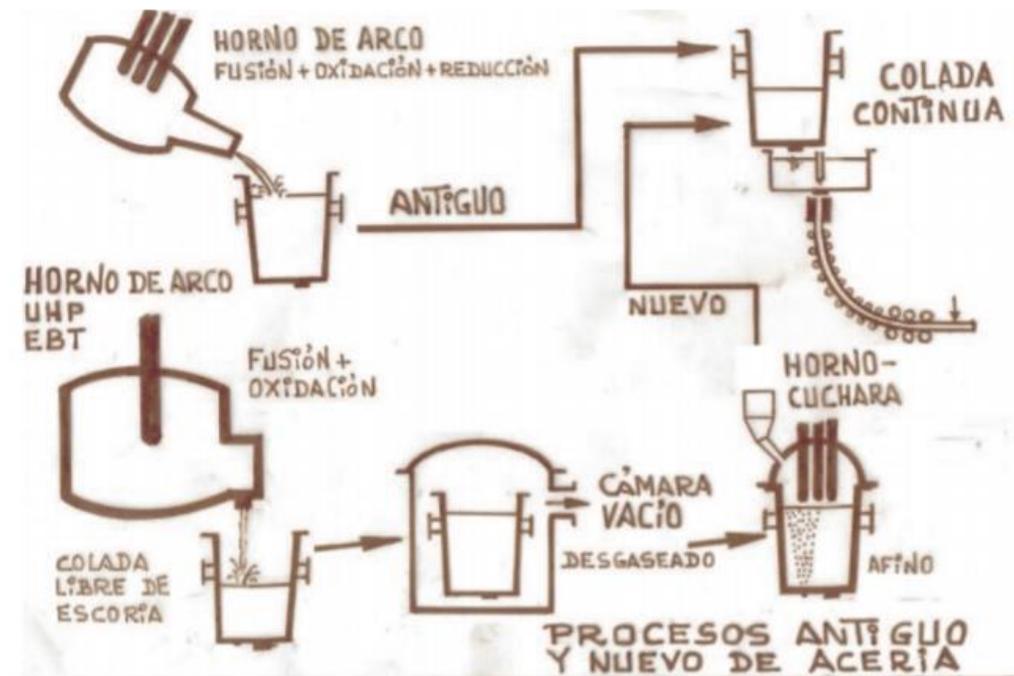
4.1. Procesos de Refinación Secundaria.

El acero es el metal más usado en la actualidad, y por tanto el de mayor producción mundial, consiste en una aleación de hierro junto con una cantidad variable de carbono entre un 0,05% y un 2% en masa. El acero tiene unas propiedades mecánicas muy buenas y esto permite que su aplicación sea muy amplia, para su fabricación se llevan a cabo diversos procesos de tratamiento que permiten obtener un acero de alta calidad.

La metalurgia secundaria es la eliminación de impurezas de metales en bruto y es un apartado dentro de la fabricación del acero, y se puede definir como el conjunto de procesos cuyo objetivo es transformar el acero líquido producido en el convertidor o en el horno eléctrico, a partir del arrabio, en un acero líquido calibrado y sin impurezas prácticamente listo para pasar a la etapa de solidificación sin ningún tipo de ajuste térmico.

El arrabio es la mezcla de hierro, carbón que no se ha quemado y algunas impurezas que aún no se han podido eliminar. La metalurgia secundaria también es conocida como la metalurgia en cuchara, el resultado final de este conjunto de procesos es un acero que cumple las especificaciones más estrictas.

Los procesos de antigua acería se basan en el tratamiento del acero obtenido del horno alto en un horno de arco eléctrico o en un convertidor donde se produce la fusión, oxidación y reducción para después bascular el acero en la cuchara para finalmente llevar a cabo la colada. En cambio los procesos de nueva acería están formados por un horno de arco eléctrico UHP donde ocurre la fusión y oxidación, de este horno se obtiene una colada libre de escoria que se bascula en una cuchara y es aquí cuando comienza el tratamiento o procesos de metalurgia secundaria. La principal diferencia entre procesos de nueva y antigua acería se puede ver gráficamente de forma simplificada mediante la siguiente figura.



- **Desventajas de la acería clásica**

- En el caso de acería eléctrica:

- ☒ Reacciones lentas por falta de interfase baño-escoria suficiente.
- ☒ Tránsito oxidación-reducción dificultoso.
- ☒ Escasa flexibilidad.
- ☒ Dificultad (por no decir imposibilidad) de hacer vacío.
- ☒ Rendimiento pobre de las ferroaleaciones.
- ☒ Adicionalmente se puede decir que no se saca suficiente partido de tecnologías difundidas como: Quemadores oxifuel, lanza de oxígeno, paneles refrigerados, diseños EBT y CBT, transformadores UHP, buza de corredera y todo el mundo de la Informática.

- En el caso de acería de oxiconvertidor:

- ☒ Reducción imposible en el convertidor.
- ☒ Omnipresencia de escoria fosforosa contaminante.
- ☒ Flexibilidad prácticamente nula.
- ☒ Dificultad de ajustar composición y temperatura.
- ☒ Presencia de inclusiones letales para la calidad.



Después de la extracción de materias primas, metales en bruto son entre 96 y 99 por ciento de pureza del principal metal, siendo el resto impurezas. Metales en bruto no pueden ser utilizados por la industria en esta etapa debido a la característica inferior en propiedades físicas, químicas, y propiedades mecánicas. Las impurezas que se encuentran en metales en bruto pueden tener un valor elevado en sí mismos, el oro y la plata recuperable de cobre, por ejemplo, pagar el costo total del proceso de refinación.

El acero fundido puede refinarse aún más para producir variedades de alta pureza y homogeneidad. Esto se logra removiendo los gases (oxígeno, hidrógeno y nitrógeno) que fueron absorbidos o formados durante el proceso de fabricación. Si los gases no se remueven antes de la solidificación reaccionan con otros elementos en el acero produciendo inclusiones (sólidos de óxido), bolsas de gas, grietas internas y fragilidad.

La desgasificación del acero fundido se lleva a cabo exponiéndolo al vacío, reduciendo enormemente la presión sobre la superficie del líquido haciendo que los gases escapen. El acero fundido para aplicaciones especiales o de alta calidad se refina adicionalmente para remover oxígeno, hidrógeno, azufre y elementos no metálicos, así como cambiar la composición de impurezas remanentes para mejorar su microestructura e incrementar su tenacidad y ductilidad.

Para una rápida desgasificación de gran cantidad de acero fundido se inyecta gas argón en un tubo sumergido en el acero fundido. Para ampliar las funciones de la refinación de este proceso también se realiza la descarburización y recalentamiento por inyección de oxígeno puro, mientras que la desulfurización y desoxidación son incrementadas al agregar fundente.



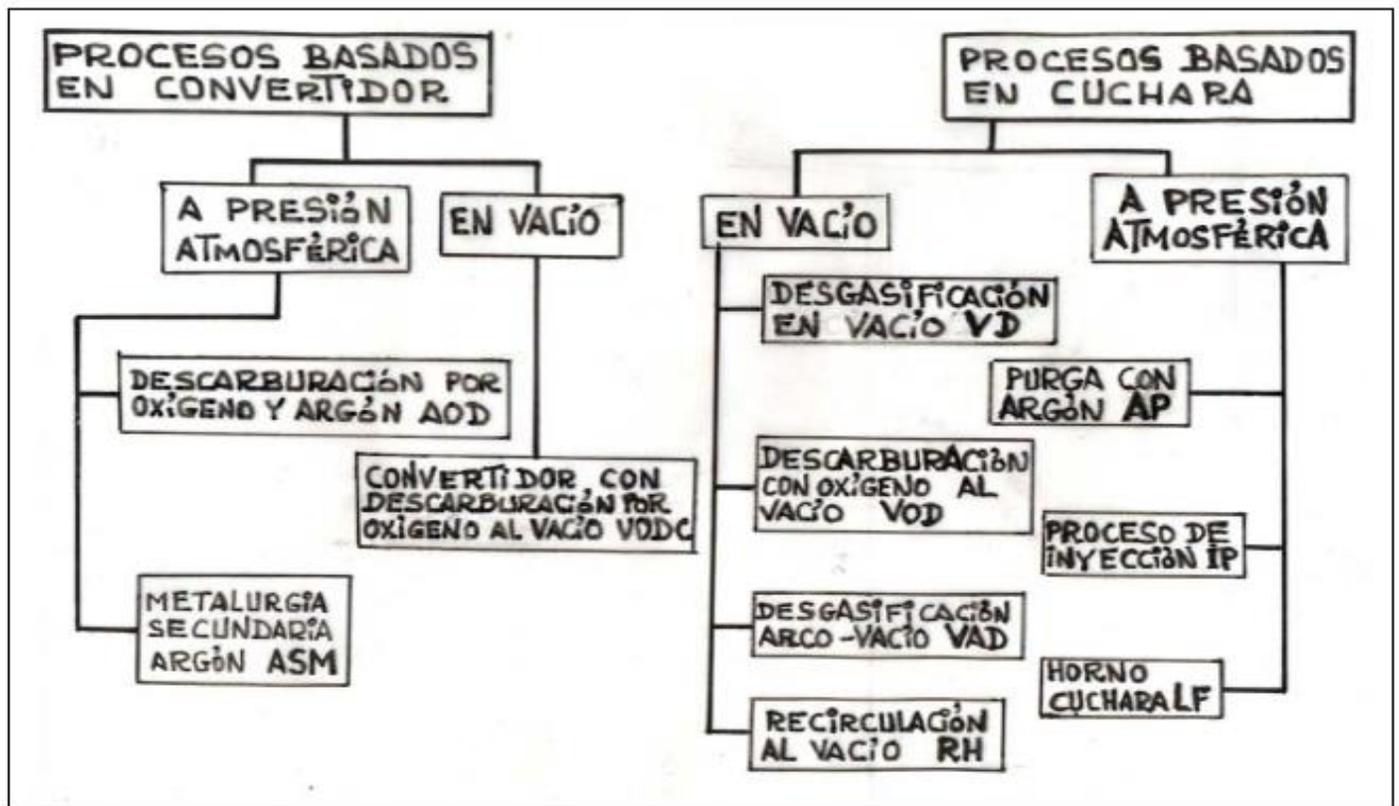
El acero procedente del horno eléctrico UHP es tratado mediante procesos por vacío o a presión atmosférica, ya sea en una cámara de vacío donde se introduce la cuchara o en la propia cuchara como se detallará más adelante. Existen diferentes tipos de tratamiento como veremos cuyo objetivo es desgasificar y ajustar en composición y temperatura el acero obtenido del horno UHP para generar la colada del acero ya libre de impurezas y con las especificaciones requeridas.

El acero obtenido en el horno eléctrico, e incluso el obtenido en convertidores de oxígeno tiene demasiadas impurezas, y hoy en día las especificaciones de los aceros son muy estrictas en cuanto a los contenidos de elementos como azufre, oxígeno, inclusiones no metálicas, principalmente óxidos, y deben ser eliminados. Para conseguir la eliminación de estas impurezas se utiliza la metalurgia secundaria, obteniendo un acero con unas características muy rigurosas listo para ser solidificado en moldes, lingotes, barras, etc.

Es importante añadir que no se debe confundir nueva acería con metalurgia secundaria, la nueva acería engloba el proceso de fabricación de acero de forma más global, la metalurgia secundaria simplemente son los procesos de tratamiento del acero líquido obtenido en el horno eléctrico o el convertidor cuyo objetivo es purificar el acero y mejorar sus propiedades.

El acero líquido que llega a los procesos de metalurgia secundaria puede proceder de dos vías diferentes, la acería eléctrica, es decir, los hornos de arco eléctrico u hornos eléctricos de ultra potencia, y de la acería al oxígeno, o lo que es lo mismo de los convertidores. De forma más rigurosa, la metalurgia secundaria se puede definir como el conjunto de procesos cuyo objetivo es la obtención de un acero libre de impurezas con una composición química correcta, con una temperatura apropiada en función de las especificaciones para ser solidificado y darle la forma adecuada para su futura aplicación.

Estos procesos incluyen operaciones de afino como la homogeneización, el ajuste de su composición, de los elementos de aleación, control de la temperatura, desulfuración, desoxidación y descarburación entre otras más que se detallarán más adelante.



Procesos de la Metalurgia Secundaria:

A.) Tratamiento de desgasificación: El acero contiene elementos perjudiciales que deben eliminarse. Entre éstos están los gases disueltos durante el proceso de fabricación; Hidrógeno; Oxígeno; Nitrógeno. Para reducir el tamaño al máximo del contenido de estos gases, se somete al acero líquido al vacío, según distintos procesos que pueden:

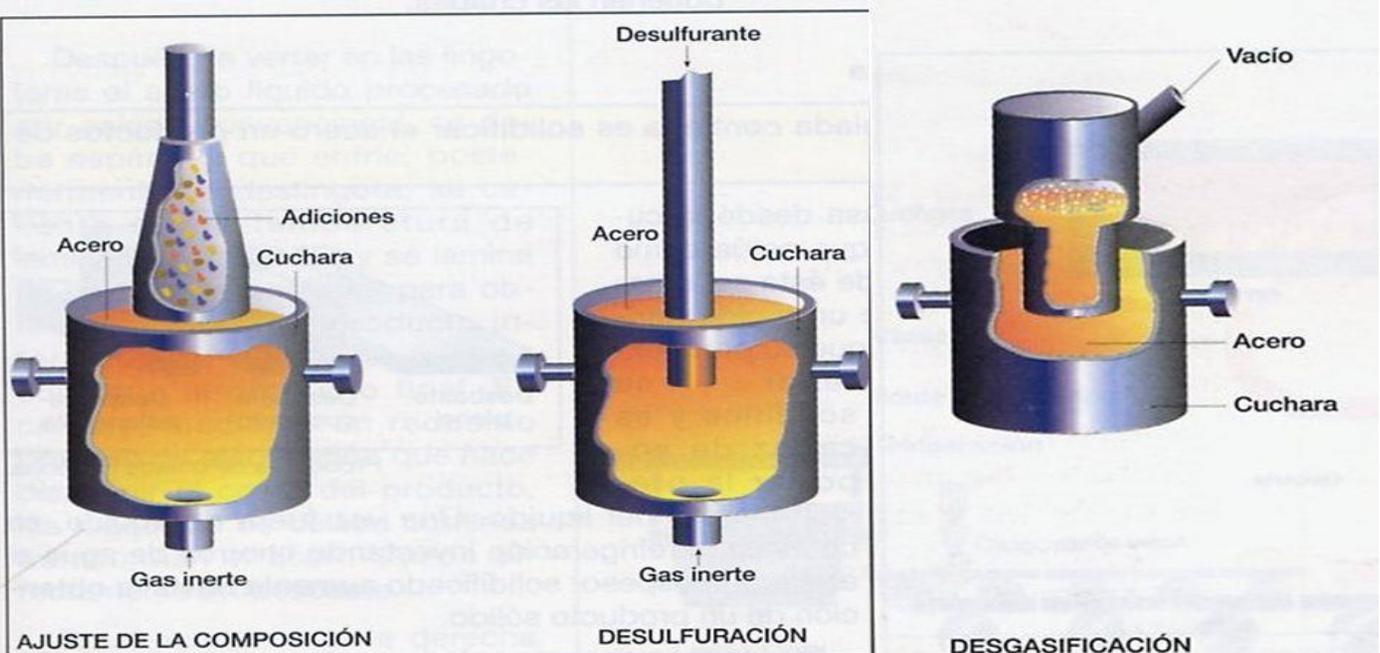
A.1.) Desgasificación del chorro de colada: Consiste en situar el recipiente receptor del acero líquido (cuchara o lingotera) en una cámara de vacío, sobre la que se ajusta la cuchara que contiene el acero líquido. El chorro de acero, por efecto del vacío, se fracciona en gotas que favorecen las eliminación de los gases.

A.2.) Desgasificación del acero en la cuchara: La cuchara se sitúa previamente en una cámara de vacío. Para facilitar la desgasificación, el acero se remueve por una corriente de gas inerte (Argón) o electromagnéticamente.

A.3.) Desgasificación por recirculación: Consiste en hacer circular repetidas veces el acero por un recipiente que actúa de cámara de vacío.



METALURGIA SECUNDARIA



- **Objetivos de la Refinación Secundaria**

El acero líquido obtenido en el convertidor o en el horno eléctrico de arco no es un producto final, en la actualidad, las especificaciones del acero son cada vez más exigentes y los clientes de acero exigen unos parámetros de calidad y costes muy rigurosos que el acero obtenido en el horno eléctrico o convertidor no cumple.

Algunos de los requerimientos básicos son un menor contenido de impurezas, menos inclusiones no metálicas (aceros más limpios), una cierta calidad y homogeneidad, micro aleaciones para obtener propiedades superiores etc. Estas son solo algunas de las exigencias por parte de clientes de aceros, y por ello, los principales objetivos de la metalurgia secundaria son los siguientes:

I. Ajuste de composición

Se basa en conseguir ajuste preciso requerido en la composición del acero de los elementos de aleación, carbono, manganeso, titanio, etc. Mediante el ajuste de la composición del acero se modificación de inclusiones presentes en el acero, que no son más que elementos como óxidos y azufre entre otros que perjudican la calidad del acero y sus propiedades.

A través del ajuste de composición del acero se controla la morfología de las inclusiones presentes, ya que, como es prácticamente imposible deshacerse de ellas al completo, de esta forma se puede modificar la composición y la forma de las inclusiones no deseables.

El objetivo es conseguir un producto final que cumpla los requisitos fijados, con unas determinadas características mecánicas y estructurales. Esto se consigue mediante la adición en la cuchara de elementos como calcio, zirconio, titanio, tierras raras, que modifican dichas inclusiones, y la mezcla y homogeneización óptima del caldo mediante el soplado de gas inerte mediante un tapón poroso ubicado en el fondo de la cuchara.

Afino del acero

Cualquiera que sea el proceso de obtención del acero, siempre trae consigo la presencia de impurezas, gases, incrustaciones y segregaciones que hacen necesario la implementación de procesos de refinación posterior, comúnmente conocidos como “afino” del acero.



¿Cómo se Producen?

- Se producen por acería eléctrica a partir de chatarra de acero inoxidable.

➔ Siderurgia no Integral

- Además de las cargas habituales se introduce Cr como ferrocromo y Ni mecánico.
- Se realizan los procesos habituales de fusión, conversión, desulfuración, ajuste de composición, afino y colada continua.

II. Desgasificación o eliminación de gases disueltos en el acero.

Se basa en la reducción de la concentración de gases letales para la calidad del acero como son el oxígeno, azufre, hidrógeno, nitrógeno y carbono. Estos elementos son conocidos como intersticiales porque ocupan espacios intersticiales en la red cristalina del hierro, para eliminarlos se introduce una campana conectada al vacío dentro de la cuchara y de esta forma se facilita su salida.

A la presencia de estas impurezas en el acero se les denomina inclusiones no metálicas, y provocan una reducción de las propiedades estructurales como la ductilidad, resistencia al impacto y la corrosión del acero.

El propósito de la desgasificación es la obtención de aceros más limpios, es decir, eliminando las inclusiones no metálicas, principalmente los óxidos, a través de un tratamiento de eliminación al vacío principalmente.

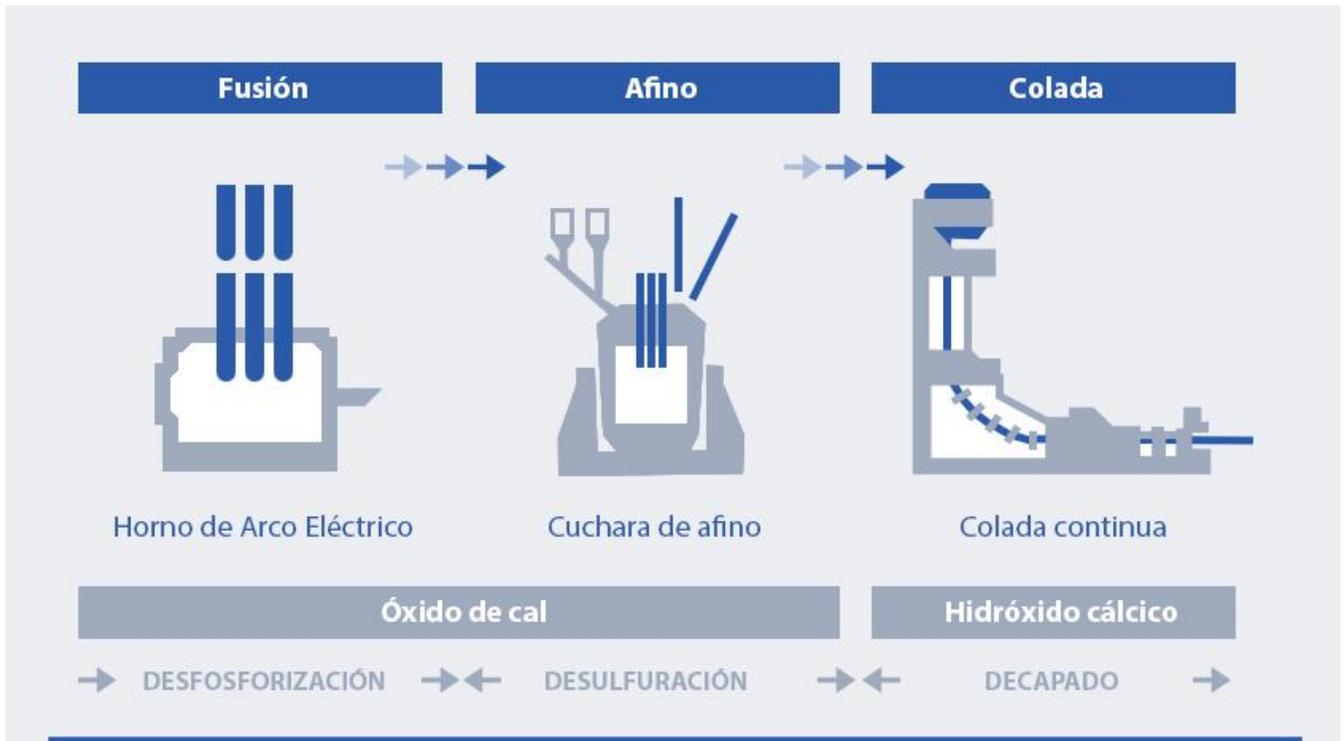
- ✓ Desoxidación, la finalidad es eliminar el exceso de oxígeno disuelto en el baño y obtener un acero limpio sin inclusiones de óxidos.
- ✓ Desulfuración, el objetivo es alcanzar contenidos en azufre reducidos, inferiores al 0,01% o incluso inferiores al 0,002%, y también una cantidad de fósforo reducida. Se reduce el contenido en azufre mediante la estimulación de reacciones entre metal y escoria y también con la adición forzada de ciertos elementos como el magnesio soplando simultáneamente gas inerte
- ✓ Eliminación de hidrógeno disuelto en el acero mediante un tratamiento en vacío, la finalidad de esta eliminación de hidrógeno es evitar la formación de grietas en frío.
- ✓ Descarburación, el carbono es un elemento intersticial en la red cristalina del hierro, generalmente no se elimina completamente, forma parte de las especificaciones del acero aunque todo depende de las aplicaciones finales del acero. Para conseguir reducir el contenido de carbono se utiliza una reacción carbono-oxígeno forzada por vacío o gases.
- ✓ Eliminación del nitrógeno presente en el acero



III. Ajuste de temperatura.

Se basa en un calibrado óptimo de la temperatura, es decir, garantizar que se consigue la temperatura exigida, que es muy importante a la hora de controlar la estructura de solidificación y las propiedades finales del acero.

La temperatura requerida se puede conseguir de varias formas, con un enfriamiento mediante chatarra o borboteo de gas, un calentamiento con caldeo eléctrico que eleva la temperatura debido al calor desprendido por un arco eléctrico, que salta entre unos electrodos a través del baño.



En definitiva, estos son los objetivos generales de la metalurgia secundaria, en la práctica todo depende de las especificaciones requeridas para el acero que se desea obtener, en función de cual sea su futura aplicación algunos objetivos serán más acentuados o trascendentales que otros.

Las impurezas nocivas presentes en el acero son azufre, fósforo, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno, estos elementos ocupan sitios intersticiales en la red cristalina del hierro y debido a esto se conocen como elementos intersticiales.

Los principales efectos de estas impurezas en el acero son la pérdida de ductilidad, de resistencia al impacto y de resistencia a la corrosión, cada elemento tiene su propia influencia característica sobre las propiedades del acero.

El oxígeno y el azufre también son constituyentes de partículas no metálicas presentes en el acero, conocidas como inclusiones, estas partículas también son perjudiciales para las propiedades del acero y deben ser eliminadas en tanto como sea posible.

El carbono también está presente como intersticial en la red de hierro, sin embargo, a diferencia de los otros elementos intersticiales, generalmente no se considera que es una impureza perjudicial y debe estar presente en el acero según la especificación exigida. No obstante, hoy en día, hay grados de acero en los que el carbono también debe ser lo más bajo posible como los aceros de ultra bajo carbono.

En Resumen:

- ✓ Reducir contenido de H y N gracias al incremento de la reacción entre el baño de acero y la fase gaseosa.
- ✓ Producir aceros con muy bajo contenido de carbono.
- ✓ Obtener bajo contenido de azufre.
- ✓ Ajustar la composición química requerida.
- ✓ Homogenizar la temperatura y composición química.
- ✓ Introducir calor adicional al baño para compensar las pérdidas de temperatura debido a los tratamientos efectuados utilizando arco eléctrico, inducción o medio químico.
- ✓ Facilitar la colada secuencial.
- ✓ Eliminar o reducir las inclusiones metálicas y no metálicas.
- ✓ Fabricar con cierta facilidad los aceros inoxidable y especiales.
- ✓ Facilitar la eliminación del fósforo.
- ✓ Incrementar la potencia de los dispositivos de fusión utilizándolos solo en las etapas de fusión y no en las de afino.

Objetivos y Ventajas de la Metalurgia Secundaria:

1. Productividad:

Optimización de las operaciones de acería.
Mayor aprovechamiento de los equipos productivos.
Disminución de los tiempos de colada tap-to-tap.
Flexibilidad óptima.
Trabajo más fácil de las máquinas de colada continua.



2. Costos:

Ahorro de energía gracias al mejor control de temperaturas y el aprovechamiento eléctrico que conlleva.
Mayor recuperación de ferroaleaciones y posibilidad de utilizar ferroaleaciones más baratas.

3. Calidad química:

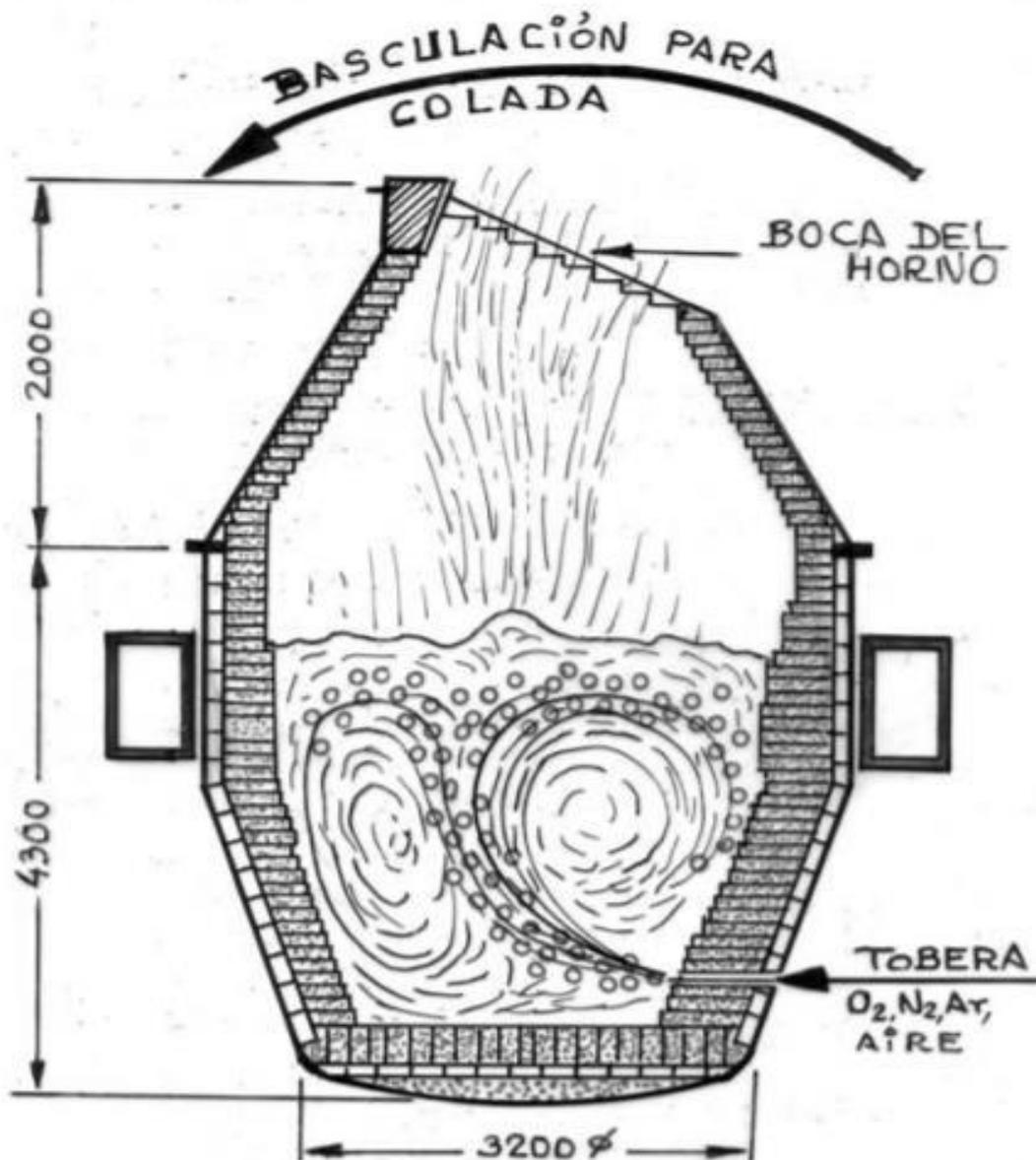
Posibilidad de encajar con precisión la composición química del acero fabricado.
Capacidad de alcanzar contenidos ultra bajos de carbono.
Posibilidad de desfosforar a fondo.
Se realizan con gran facilidad las operaciones básicas (desoxidación y desulfuración) de la segunda etapa (fase reductora) de la colada.
Los equipos nuevos están en condiciones de obtener una desgasificación completa, especialmente de gases tan letales para la vida en servicio como hidrógeno y nitrógeno.

4.1.1. Inyección de gases inertes al metal líquido.

El acero está formado principalmente por hierro, si bien se eliminan altos niveles de carbono (por ejemplo el 4 %) y se mantiene una cantidad controlada. La cantidad de carbono presente en el acero es muy importante para el modo en que se comporta el material después del tratamiento térmico.

La inyección de gas para agitar el metal fundido mejora la homogenización del baño metálico. El acero líquido obtenido en el convertidor o en el horno eléctrico de arco no es un producto final, en la actualidad, las especificaciones del acero son cada vez más exigentes y los clientes de acero exigen unos parámetros de calidad y costes muy rigurosos que el acero obtenido en el horno eléctrico o convertidor no cumple.

Algunos de los requerimientos básicos son un menor contenido de impurezas, menos inclusiones no metálicas (aceros más limpios), una cierta calidad y homogeneidad, micro aleaciones para obtener propiedades superiores, etc. Estas son solo algunas de las exigencias por parte de clientes de aceros, y por ello, los principales objetivos de la metalurgia secundaria son los siguientes:



- **Planta de fabricación de acero básico al oxígeno (BOF)**

El hierro fundido procedente del alto horno se transporta en contenedores especiales recubiertos de ladrillo refractario en vagonetas sobre raíles (con una capacidad que varía entre 200 y 450 toneladas) a la planta de fabricación, donde el hierro se refina para producir acero de la calidad y composición deseada.

En la planta de fabricación de acero, el hierro se trata en dos fases: primero se elimina el carbón y segundo se añaden aditivos que modifican las propiedades del acero.

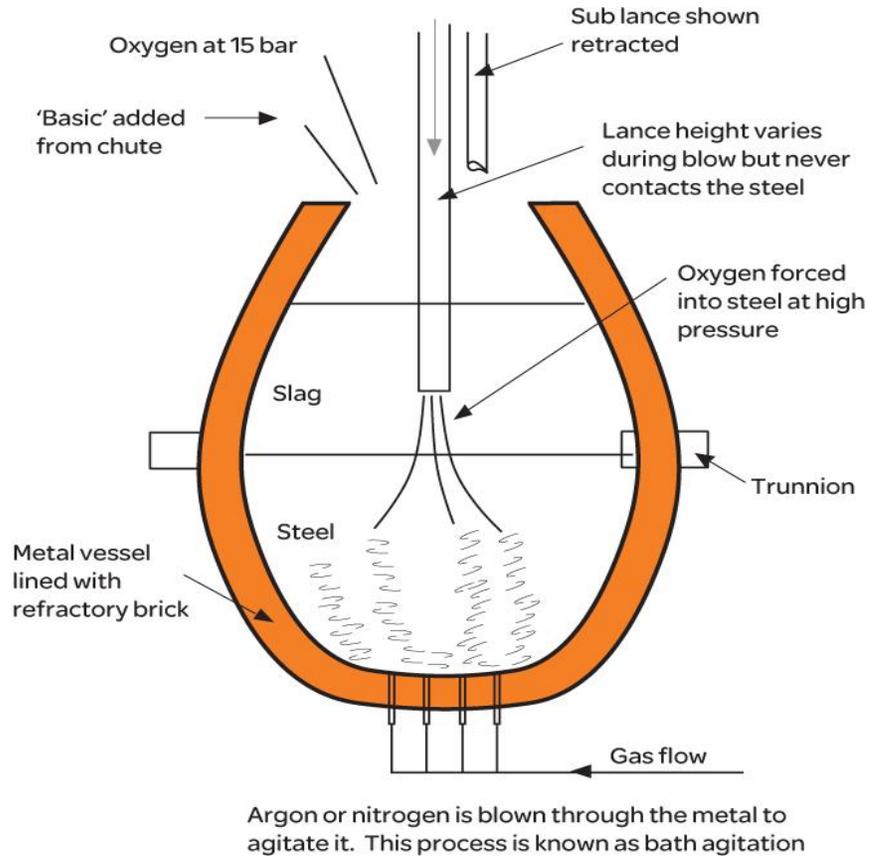


Figure 1: BOS converter

En la primera fase, el hierro se mezcla con residuos y fundente, se agita con gas inerte y se quema con oxígeno hasta que se alcanzan los niveles necesarios de carbono, que se miden con sondas de muestra. Este proceso de soplado de oxígeno se realiza en grandes tanques basculantes llamados convertidores. En las plantas modernas, es común encontrar tanques de acero básico al oxígeno capaces de convertir 350 toneladas de metal de un soplido.

El propio tanque convertidor pesa 650 toneladas. Normalmente, una planta de fabricación de acero básico al oxígeno cuenta con dos o tres convertidores disponibles para convertir hierro en acero, de los cuales habitualmente uno o dos están en funcionamiento simultáneamente y solo ocasionalmente funcionan todos a la vez.

En la segunda fase, el acero en bruto se mezcla con aditivos en tanques de menor tamaño y, a continuación, recibe un segundo ciclo de soplado antes de la fundición en la planta de fundición continua.

Es necesario eliminar las impurezas del hierro por oxidación debido a las potentes condiciones reductoras del alto horno. El carbono y el silicio residual se oxidan con la ayuda de los fundentes básicos añadidos.

- **Control del ángulo del convertidor**

El convertidor se coloca en el ángulo deseado mediante la comparación del ángulo deseado absoluto y el correspondiente ángulo real absoluto para accionar los motores de colocación en la dirección correcta. Los motores de colocación se accionan progresivamente a velocidades crecientes y posteriormente decrecientes de acuerdo con los intervalos de tiempo, tamaño y error hasta que la posición se encuentra dentro de la banda de tolerancia definida.

El convertidor es un tanque que bascula 180° desde la posición vertical en el lado de carga y más de 90° en el lado de extracción. El convertidor se inclina en alguno de los distintos ángulos predeterminados durante la secuencia. El convertidor gira hasta su posición de carga para cargarlo con residuos metálicos (50 toneladas), hierro fundido (300 toneladas), cal (15 toneladas) y los fundentes básicos, magnesio y caliza (6 toneladas).

El convertidor regresa a la posición vertical y la lanza principal baja e inyecta oxígeno a alta velocidad sobre la superficie de metal fundido durante 15 a 20 minutos. Después de inyectar una cantidad de oxígeno predeterminada, el soplado está completo y se retira la lanza principal. Al 80 % y 100 % del soplado de oxígeno, que se calcula mediante un modelo termoquímico, se baja una lanza secundaria para medir la temperatura, que se utiliza para calcular la retención de carbono.

Si se asume que la temperatura y el análisis de la muestra son aceptables, el convertidor gira desde la vertical hasta la posición de extracción. Después de la extracción, el convertidor gira de nuevo hasta la posición de vaciado de escorias, regresa a la posición vertical para añadir espesantes y, después, se balancea suavemente para lavar las escorias antes del vaciado, lo que se realiza colocando el convertidor en posición vertical invertida (180°).

La fabricación de hierro básico al oxígeno es un proceso secuencial centrado en la posición del convertidor y en el procesamiento de los contenidos. Es posible automatizar todo el proceso, desde la información de la receta del proceso almacenada centralmente hasta la instrumentación externa, al tiempo que se permite cierta intervención manual y pasos de reprocesamiento.

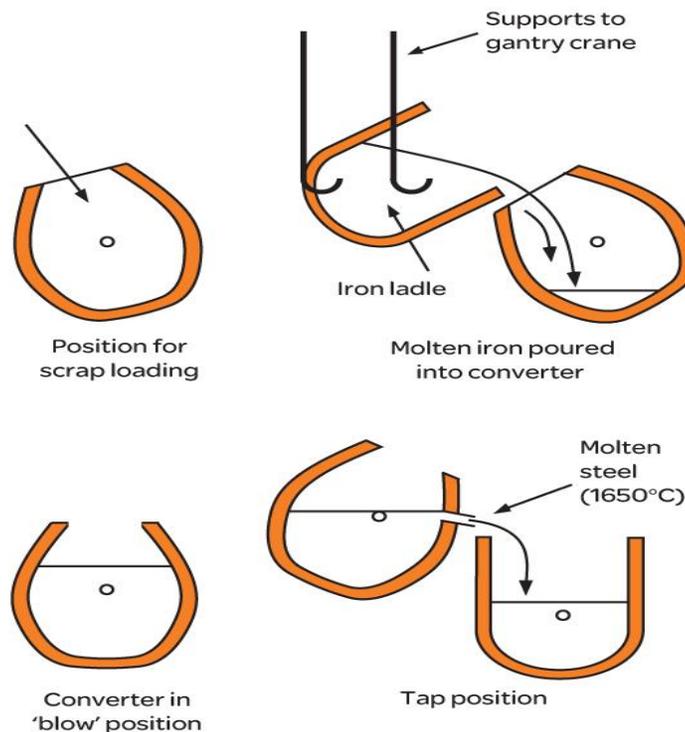
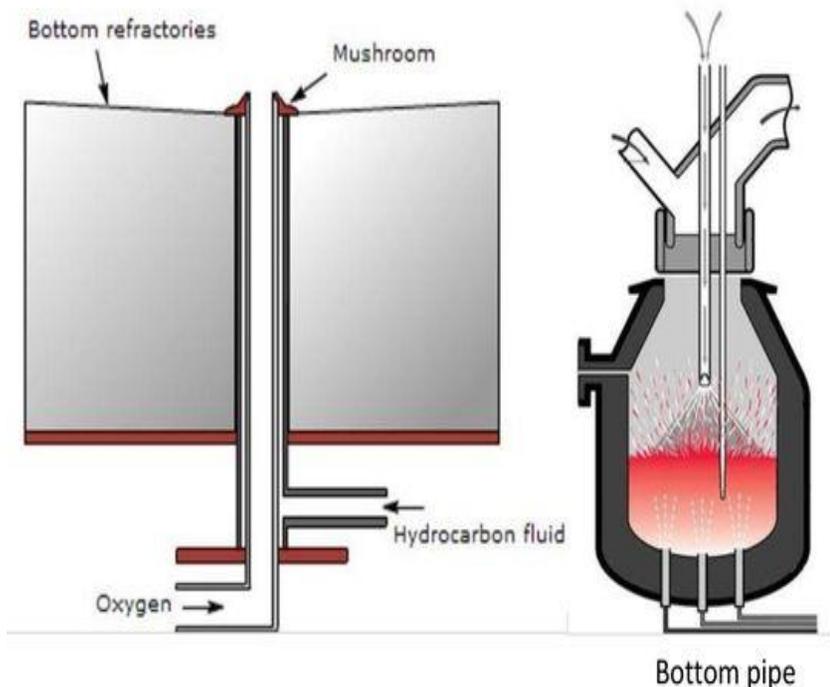


Figure 2: Converter positions

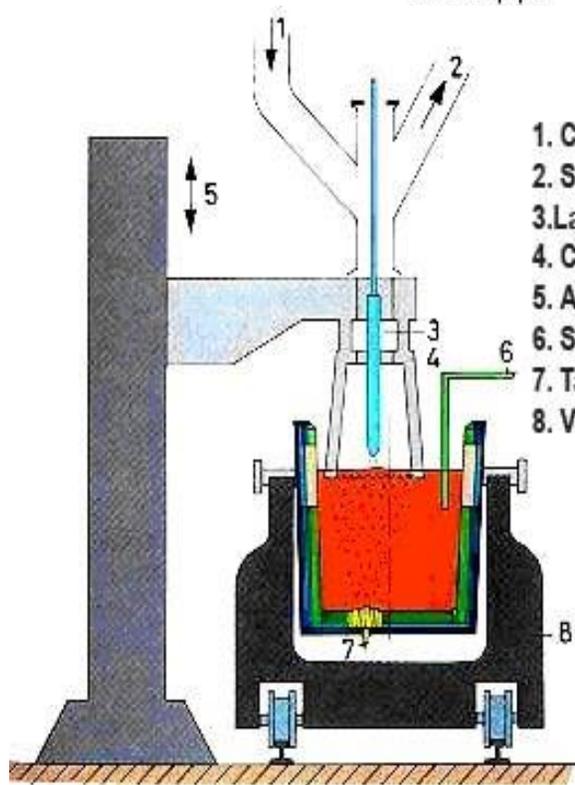
Diseño de la tobera para convertidores con soplado por el fondo: el oxígeno es inyectado a través del fondo del convertidor mediante una serie de 14 a 22 toberas. Las toberas están formadas por dos tuberías concéntricas; el oxígeno circula por el conducto central, y un hidrocarburo líquido que se usa como refrigerante circula por el espacio anular comprendido entre ambas tuberías. Generalmente, el caudal de oxígeno inyectado es de 4 a 4.5 m₃ por minuto por tonelada de acero. Se inyecta por lo general en el baño cal pulverizada mezclada con el oxígeno, lo que mejora la disolución de la cal y, por tanto, la formación de escoria durante el soplado.

En ocasiones se añade un hidrocarburo líquido (gas natural, propano, fuel-oil), mezclado con el oxígeno puro en la punta de la tobera para lograr un efecto de enfriamiento y de ese modo proteger la tobera. El hidrocarburo frío no se quema cuando entra en contacto con el chorro de oxígeno, sino que se descompone a través de reacciones muy endotérmicas. Más tarde el C y el H liberados se oxidarán, pero bien lejos de la zona sensible.



Las ventajas principales de los convertidores de soplado mixto son:

- Menor contenido de FeO en la escoria, con menor desgaste de refractario y mayor rendimiento en hierro.
- Reducción del oxígeno disuelto en el metal a causa de una mejor descarbonuración al final del soplado y durante la agitación posterior al soplado. Esto implica un ahorro de aluminio en la cuchara.
- Mayor contenido en Mn en el metal al vertido.
- Mejora en la eliminación de P y S.



1. Carga de FERROALEACIONES
2. Salida de gases.
3. Lanza de oxígeno.
4. CAMPANA.
5. Accioamiento de la Campana.
6. Sonda (temperatura y O₂).
7. Tapón POROSO (cuchara).
8. Vagón Portacucharas

- **Caudal de gas**

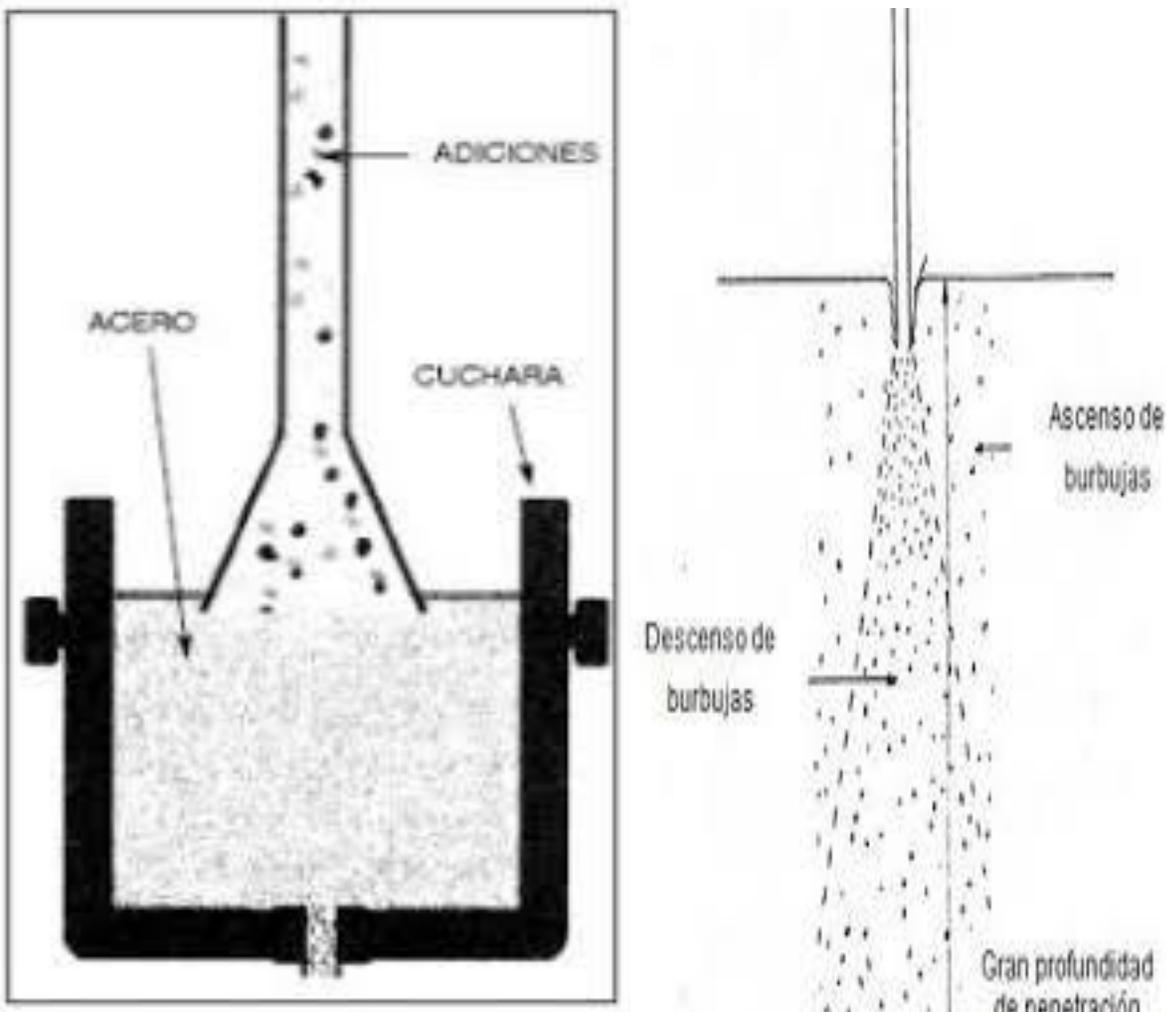
El proceso de acero básico al oxígeno utiliza gases costosos (argón, oxígeno y nitrógeno) y la correcta medición y cuantificación de estos gases permite operar de forma económica y controlar minuciosamente la calidad mediante el uso de estos valores para generar informes y registros en hojas de cálculo.

En la práctica, hay otros pasos intermedios en función de ciertas variables. Por ejemplo:

- ✓ Es posible que sean necesarios nuevos sopladados según la temperatura o el análisis.
- ✓ Puede ser necesaria una interrupción para evitar la realimentación incrementando el caudal de gas inerte durante un tiempo.
- ✓ Puede ser preciso agitar el incremento del caudal de gas inerte para reducir la temperatura.
- ✓ Durante todo el ciclo, circulan gases inertes como nitrógeno y argón (durante cada soplado y resoplado) para agitar o remover el contenido del convertidor y para mantenerlo limpio de elementos durante la duración de la campaña.

El resultado es un acero de bajo contenido en carbono. El porcentaje necesario para el tipo de acero que se fabrica será mayor, por lo que se añade una cantidad de carbono controlada para cumplir las especificaciones.

Después de extraer el metal, el ciclo comienza de nuevo y, si ningún problema retrasa a los metalúrgicos, se realizarán 8 sopladados por cada turno de 8 horas y se producirán casi 3.000 toneladas de acero.



- **Control de agitación del baño con gas inerte.**

Para remover el contenido del convertidor, se inyecta argón o nitrógeno a través de una serie de cilindros en la base del convertidor. El caudal total y el tipo de gas para cada paso de la secuencia están predeterminados en base a la receta de carga para el soplado actual.

El caudal total se divide por igual entre un número de controladores, uno por cada cilindro, para mantener una distribución uniforme, y se convierte en el punto de consigna del controlador remoto. Se compensa la masa del caudal medido con la temperatura y presión de cada cilindro y tipo de gas y se introduce en el módulo de control. Entonces, la salida de control de 4-20 mA modula la posición de la válvula.

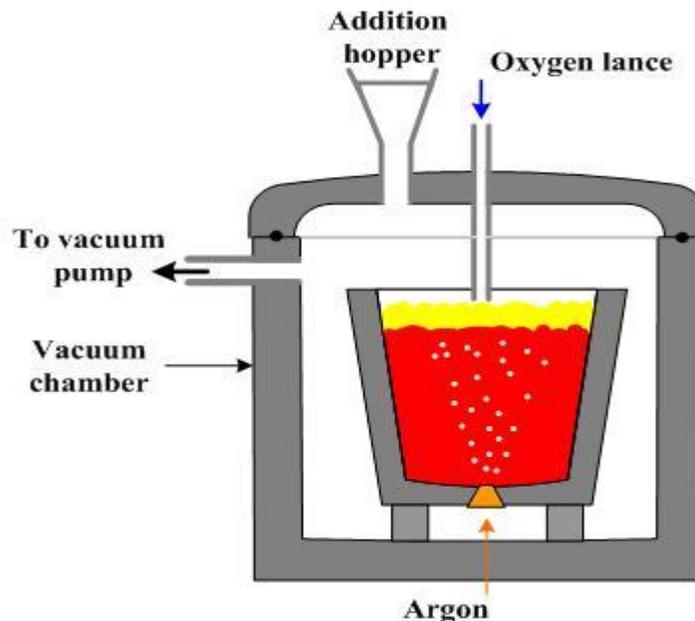
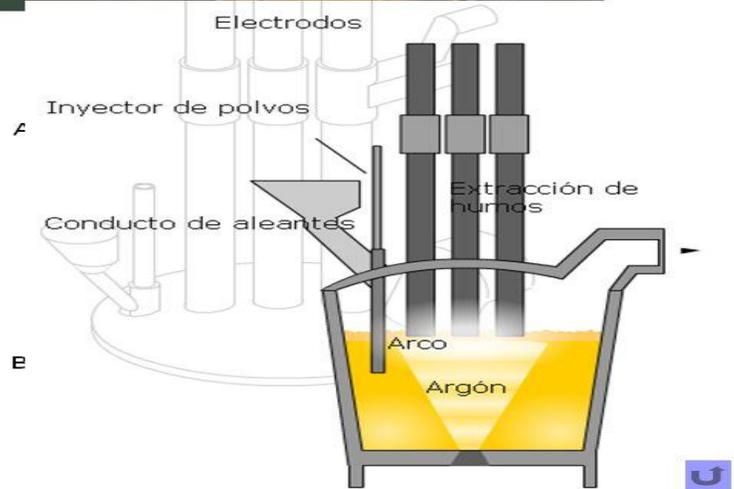
Si el cilindro queda cubierto por escorias pesadas, la presión descendente se incrementa. Si supera un límite preestablecido, el control pasa de controlar el caudal a controlar la presión y, a continuación, la válvula de control responde a un algoritmo de control diferente. Al reducirse la presión (por debajo del valor de histéresis), el control pasa de nuevo a controlar el caudal. El cambio entre ambos modos de control es automático y sin interrupciones, y el lazo inactivo sigue la salida del lazo activo.

Metalurgia secundaria

METALURGIA DE CUCHARA

Como vimos, tanto del convertidor BOF, como del horno EAF se obtiene un "acero base", generalmente un acero al carbono o de baja aleación. Luego, las operaciones finales para la obtención de la aleación definitiva, se realizan en la cuchara y son las siguientes:

- inyección de ferroaleantes
- Desoxidación con Al y Si,
- Desulfuración con Ca y Al,
- Coalescencia y flotación de inclusiones con Ca,
- Homogeneización química,
- Ajuste de temperatura final.
- Degasificación,



- **Utilización de Gases Inertes**

Este movimiento del acero se realiza bien mediante inyección por la solera de la cuchara de un gas inerte (Ar) a través de un tapón poroso, bien mediante una bobina de inducción, o bien por pulverización del acero al hacerlo pasar una cámara a vacío.

Al introducir un gas inerte por la solera de la cuchara se suministra una energía al baño que proporciona un movimiento al líquido. Esta energía proviene del flujo del gas y es transmitida al baño por dos mecanismos:

1. A través del trabajo realizado por las fuerzas de flotación de las burbujas, las cuales son proporcionales a la diferencia de densidad gas-acero.
2. El trabajo realizado por las burbujas al ir expansionándose según va disminuyendo la presión ferrostática al ascender.

La agitación del baño será directamente proporcional a la energía suministrada por el gas. Este flujo del gas desde la parte inferior de la cuchara se vio que arrastraba a las inclusiones no metálicas (Sí O₂, Al₂ O₃, etc) hacia la superficie donde eran captadas por la escoria.

Estas inclusiones no metálicas tienden a ascender pero lo harán muy lentamente sin una ayuda exterior. Así, la velocidad a la cual ascenderá una partícula de 5 μ en el seno del baño es de 25 mm/h y si la partícula es del orden de 1 μ es muy probable que se mantenga en el seno del acero fundido, debido a que las fuerzas de tipo browniano en este tamaño de partícula son más significativas que las de ascensión.

Al introducir un gas creamos una corriente que va desde la solera a la superficie y si queremos que ésta ayude a eliminar las inclusiones no metálicas debemos conservar siempre un flujo laminar, es decir, mantenemos siempre dentro de la ley de Stokes, según la cual la resistencia a la ascensión de partículas está determinada por los factores de viscosidad y depende linealmente de la velocidad y tamaño de la partícula. Por lo tanto, lo ideal al introducir un gas es que éste forme una nube de burbujas de muy pequeño tamaño.

También la introducción de un gas inerte ayuda a la eliminación de gases en disolución por difusión desde el baño al interior de la burbuja de gas que asciende. Como la velocidad de difusión es proporcional al área de contacto del gas, parece lógico utilizar burbujas de gas de muy pequeño tamaño, pero como también es proporcional al gradiente de presión del gas fuera y dentro de la burbuja, este gradiente disminuirá enseguida debido al pequeño tamaño de la burbuja del gas inerte, por lo que serán necesarias burbujas de tamaño intermedio para que la desgasificación mediante este mecanismo sea efectiva.

Por lo tanto, resumiendo, se puede decir que la forma como se introduce el gas inerte tiene su importancia. Así, si se quiere agitar el baño necesitaremos burbujas grandes; si deseamos eliminar inclusiones burbujas muy pequeñas y si se quiere eliminar gases, burbujas de tamaño intermedio.

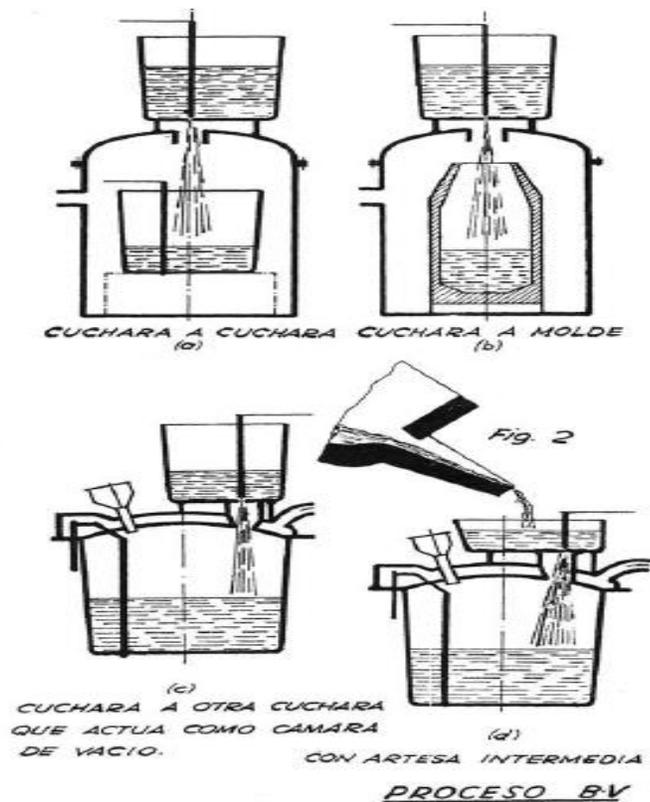
- **Métodos de Desgasificación más empleados.**

- Desgasificación en chorro. (B - V)
- Procedimiento por elevación intermitente (D - H).
- Procedimiento por elevación y circulación (R - H).
- Procedimientos ASEA-SKF y FINKL-MOHR.

➤ Desgasificación en chorro (B-V)

Este sistema lo desarrolló en Alemania la empresa Bochumer-Verein, en 1952 y se basa en la desintegración que sufre el chorro de acero cuando es vertido en una cámara la cual está a vacío. Esto produce finas gotas de acero, con lo que la difusión de los gases hacia el exterior del acero es muy rápida. Mediante este sistema se consiguen valores muy bajos de H₂.

El sistema B-V tiene muchas variantes. La pérdida de temperatura del acero es uno de los problemas que tiene este sistema B-V. Esto se soluciona subiendo inicialmente la temperatura del acero en el horno donde se ha procedido a la fusión y/o afino, lo cual crea problemas de desgastes fuertes de revestimientos refractarios.



➤ Método de desgasificación D-H

El método D-H Dortmund-Horder consiste en colar el acero a una cuchara normal desde la cual es transferido a una cámara que está a vacío. En la fig. 3 a) se puede ver el principio de funcionamiento del sistema D-H. La cámara de vacío propiamente dicha, se mantiene a una temperatura de unos 1500 °C mediante resistencias de grafito, para de esta forma evitar enfriamientos del acero durante el tratamiento. El mecanismo de funcionamiento es el siguiente:

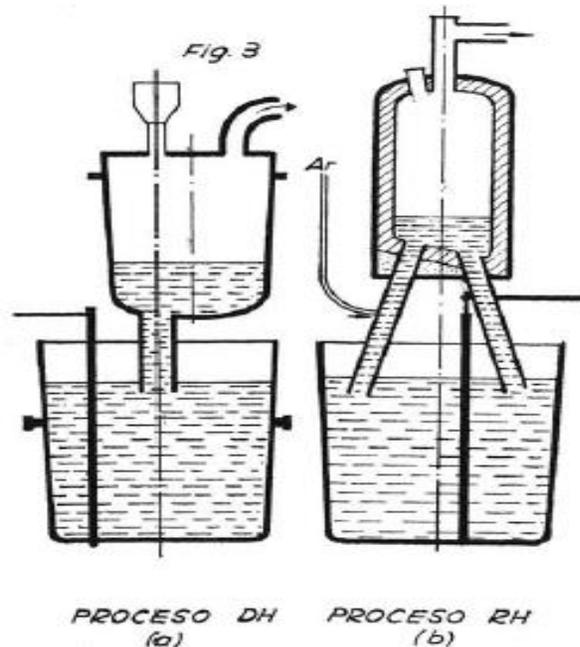
El acero llega en una cuchara de colada normal y se coloca debajo del sistema D-H, el cual se hace descender hasta que una buza que éste tiene en la parte inferior penetra dentro del caldo. En este momento se hace el vacío en la cámara y debido a la diferencia de presión, una columna de acero de aproximadamente 1.3 / 1,4 mts., asciende por la buza, entrando de esta forma el acero a la cámara de vacío, donde se produce una desgasificación del metal.

El acero permanece en esta cámara unos 30 segundos, pasado este tiempo se sube la instalación unos 0,5 mts, con lo que el acero vuelve a la cuchara bruscamente. Este proceso se repite unas 30-50 veces, pasando en cada ciclo entre un 10 y 15 % del acero total. Se supone que al final del tratamiento el acero ha pasado 3 ó 4 veces por la cámara a vacío.

➤ Método de desgasificación R-H

Este proceso de desgasificación fue desarrollado por la empresa alemana Ruhstahl AG. Como en el proceso D-H, el R-H consta de una cámara de vacío que se coloca sobre la cuchara que contiene el acero. Entre otras cosas se diferencia del sistema D-H en que posee dos buzas, las cuales se introducen en el caldo, y en que el tamaño de la cámara es menor.

Por una de las buzas se inyecta un gas inerte, normalmente. El sistema de funcionamiento es el siguiente: Se introducen las dos buzas en el acero fundido, haciendo pasar un chorro de Ar. por una de ellas. Se realiza el vacío en la cámara y el acero sube por las dos buzas sufriendo una desgasificación al entrar en la cámara. El gas, al ascender por una de las buzas va arrastrando el caldo, produciéndose de esta forma un movimiento continuo del acero de la cuchara a la cámara de vacío.



➤ Sistema ASEA-SKF y Sistema FINKL-MOHR.

El procedimiento ASEA-SKF se desarrolló en la fábrica de Hellefors de SKF hasta 1965 para la producción de aceros especiales. Este sistema es uno de los más completos y casi se podría decir que este no es un método para simplemente desgasificar sino que su función es la de fabricar el acero y como característica específica que permite igualmente desgasificar.

Para poder trabajar así, el sistema ASEA-SKF cuenta con una serie de elementos, como son:

- ✓ Una tapa de cierre hermético para desgasificar con un orificio en el centro para introducir una lanza de O₂.
- ✓ Otra tapa con tres electrodos, que sirve para calentar el baño.
- ✓ La cuchara dispone además de una bobina de inducción para la agitación del acero líquido. Esta bobina puede hacer mover el caldo en dos sentidos; uno se utiliza en la etapa de afino por O₂ y el otro en la desulfuración.

Durante el afino el acero sube por el centro y baja por las paredes, de esta forma el contacto entre el O₂ y el acero es mayor. La gran flexibilidad de trabajo de una cucharada ASEA-SKF permite realizar operaciones muy diferentes según sean los requisitos de cada acero.

Así, si la deshidrogenación del baño es el principal objetivo, se puede colar el acero semidesoxidado, desgasificarlo, desoxidarlo y encajarlo en temperatura y composición para colar. Si lo importante en una buena desulfuración, se desoxida el baño en la cuchara ASEA-SKF, se prepara para una buena escoria básica y se agita el acero para conseguir una rápida desulfuración. Si de lo que se trata es de fabricar aceros inoxidable, se afina con O_2 el acero bajo vacío, consiguiendo que las pérdidas de Cr en la descarburación sean mínimas.

Por lo tanto, en el horno eléctrico simplemente se funde la chatarra y se realiza un afino con escoria básica oxidante. Esto permite aumentar la capacidad de producción de la acería, siendo este aumento entre 30 y 50 % dependiendo de la potencia del horno y del tipo de acero fabricado. Con este proceso se consigue un 90 % de colada con contenidos de $H_2 < 2$ p.p.m.

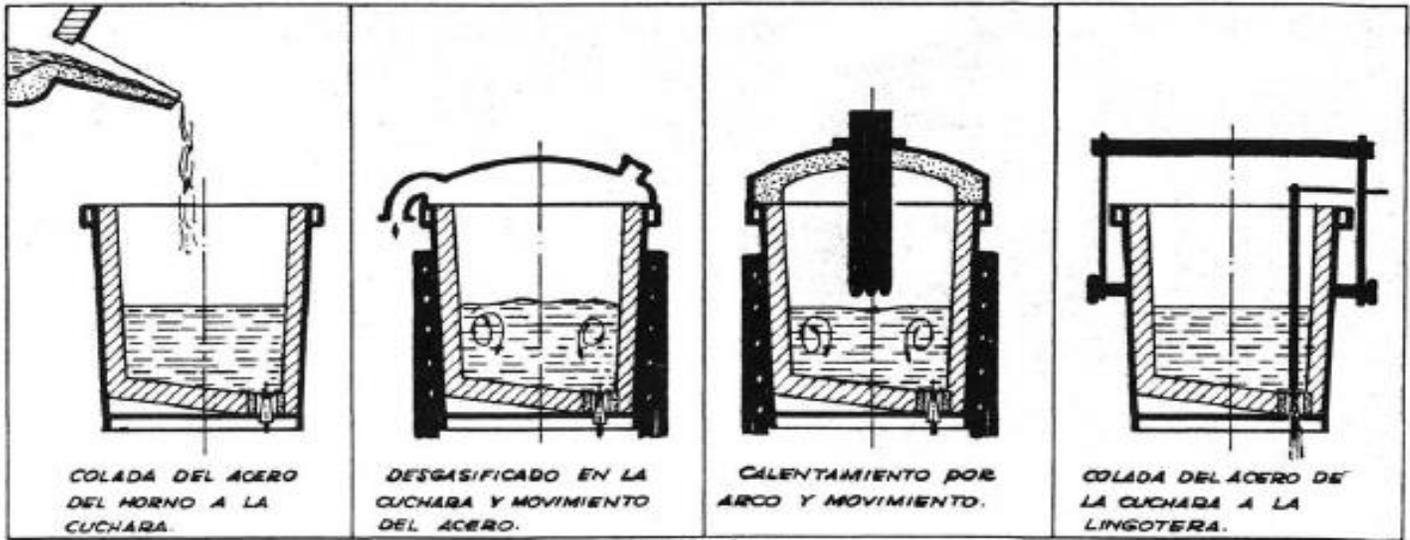


Fig. 4 a)
PROCEDIMIENTO DE DESGASIFICADO ASEA-SKF

El sistema FINKI-MOHR es muy similar al ASEA-SKF en sus características de trabajo. La principal diferencia entre los dos sistemas se basa en la forma de agitación del caldo ya que en el FINKI-MOHR ésta se realiza mediante la introducción de Ar a través de un tapón poroso por la solera, y en que la cuchara en este sistema no actúa como tanque de desgasificación.

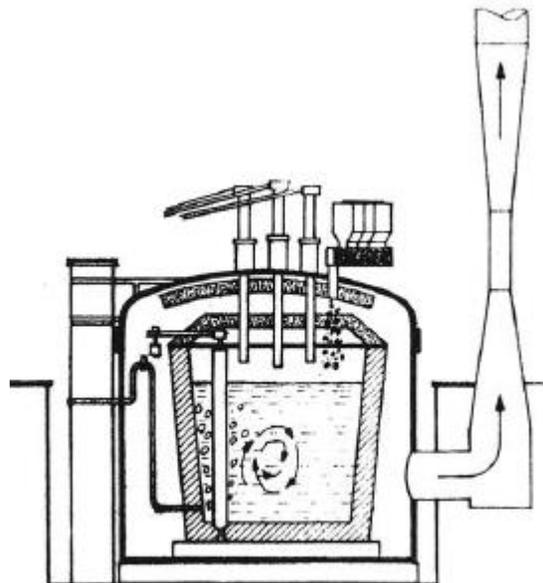


Fig. 4b
Sistema Finkl-Mohr

4.1.2. Tratamiento del metal al vacío

Los procesos al vacío consiguen resultados notables, incluso espectaculares, en la consecución de los objetivos descritos anteriormente. Los procedimientos realizados a presión atmosférica no consiguen resultados tan brillantes. Sin embargo, la relación resultados/inversión obtenida a presión atmosférica es compensatoria en una acería que fabrica aceros muy especiales sólo en ocasiones contadas que no compensan una fuerte inversión en equipos y operaciones. Tanto unos como otros pueden realizarse sin aportación térmica adicional o con caldeo posterior. Los procesos más importantes son:

1. Procesos vacío sin aportación térmica:

Dentro de este conjunto hay dos grupos que son la desgasificación en vacío y la circulación del acero:

1.1. Desgasificación en vacío (Vacuum Degassing, VD)

Pueden ser:

- Estáticos en cámara desgasificadora, sin agitación o con agitación, la cual puede realizarse por gas o por inducción eléctrica.
- En chorro de metal (Bochümer Verein für Gusstahlfabrikation AG, después Fried. Krupp Hüttenwerke AG, de Bochum) del horno a la cuchara, de ésta a otra de colada o de ella a la lingotera (caso de grandes forjas).

1.2. Circulación del acero

Esta circulación puede ser:

- Discontinua (Dortmund Hörder - Hüttenunion, DH)
- Recirculación (Ruhrstahl - Heräus, RH), la cual puede realizarse mediante insuflación de gas inerte (Gas Lift) o inductivamente (Induction Lift, Thermoflow, Proceso Stokes).

2. Procesos vacío con aportación térmica adicional

La agitación y ebullición del acero en los procesos vacío provoca un enfriamiento que en algunos casos puede ser prohibitivo para las operaciones posteriores. Para obviar esta dificultad se han desarrollado los procesos con aportación térmica adicional, la cual puede realizarse por energía eléctrica o por inyección de oxígeno.

2.1. Caldeo eléctrico.

En este grupo de procesos el calentamiento se hace posicionando la cuchara bajo una bóveda de horno de arco de diámetro igual que el de la cuchara, todo ello en condiciones de vacío. Aunque el fundamento de los procesos es el mismo, el diseño particular varía de unos a otros, especialmente en la forma de mantener el vacío durante la operación. Puede decirse que todos ellos son variaciones de detalle del procedimiento ASEA-SKF.

Los más importantes son:

- ASEA-SKF.
- Desgasificación por Arco en Vacío (VAD).
- Finkl-Mohr, variante del VAD.
- Stein Heurtey - S.A.F.E. Electric Steel Works.
- Fusión en Vacío (VM).
- Diado Ladle Furnace (LF) colaborando Davey McKee, Electromelt y Vacmelt.

2.2. Caldeo por oxígeno

En este grupo se aprovecha el carácter fuertemente exotérmico con que en condiciones de vacío se desarrolla la reacción Vacher-Hamilton de combustión del carbono por el oxígeno inyectado sobre el baño. Entre otros, se pueden citar los siguientes procesos principales:

- Descarburación por oxígeno en vacío VOD.
- Convertidor descarburación por oxígeno en vacío VODC.
- VOD/LD VAC (Edelstahlwerk-Republic Steel).
- ASV.
- V-R.
- AVR (Allegheny Vacuum Refining).
- RH-OB (Nippon Steel).

3. Procesos atmosféricos sin aportación térmica

Los efectos de creación de interfases, aceleración de reacciones, desgasificación, desoxidación, eliminación de inclusiones, etc, se consiguen mediante inyección de argón y otros gases más o menos inertes, que puede ir acompañada de adición forzada de escorificantes y ferroaleaciones.

Algunos de estos procedimientos que implican inyección de gases inertes, especialmente argón, han sido desarrollados por los fabricantes o comercializadores de estos mismos gases, ya que la adopción de una tecnología basada en gases lleva a la consecución de un mercado cautivo bastante importante. Entre éstos métodos se encuentran:

- Metalurgia secundaria argón, ASM.
- Purga con argón, AP (Union Carbide).
- Inyección desulfurante por lanza, IP y TN.
- Inyección entubada o encapsulada.
- Alimentación de hilo de Al, Ca...
- Lanzamiento de proyectiles.
- Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling, CAS.
- Sealed Argon Bubbling, SAB.
- Capped Argon Bubbling, CAB.

4. Procesos atmosféricos con aportación térmica adicional

Al igual que ocurría en el vacío, la inyección de gases o de materiales sólidos provoca un enfriamiento del baño de acero que en algunos casos puede imposibilitar las operaciones posteriores, especialmente en la máquina de colada continua. Esto da lugar a la aparición de los procesos con aportación térmica adicional que, al igual que al vacío, puede hacerse mediante caldeo eléctrico o caldeo por oxígeno. Los más notables son:

4.1. Caldeo eléctrico

- Horno cuchara, Ladle Furnace, LF.
- Gas Refining Arc Furnace, GRAF.
- Proceso BBC-CEM-IRSID

4.2. Caldeo por oxígeno

- Argon Oxygen Decarburisation, AOD, (División Linde, Union Carbide).
- Creusot-Loire-Uddeholm, CLU.
- CAS con inyección de oxígeno (CAS-OB)

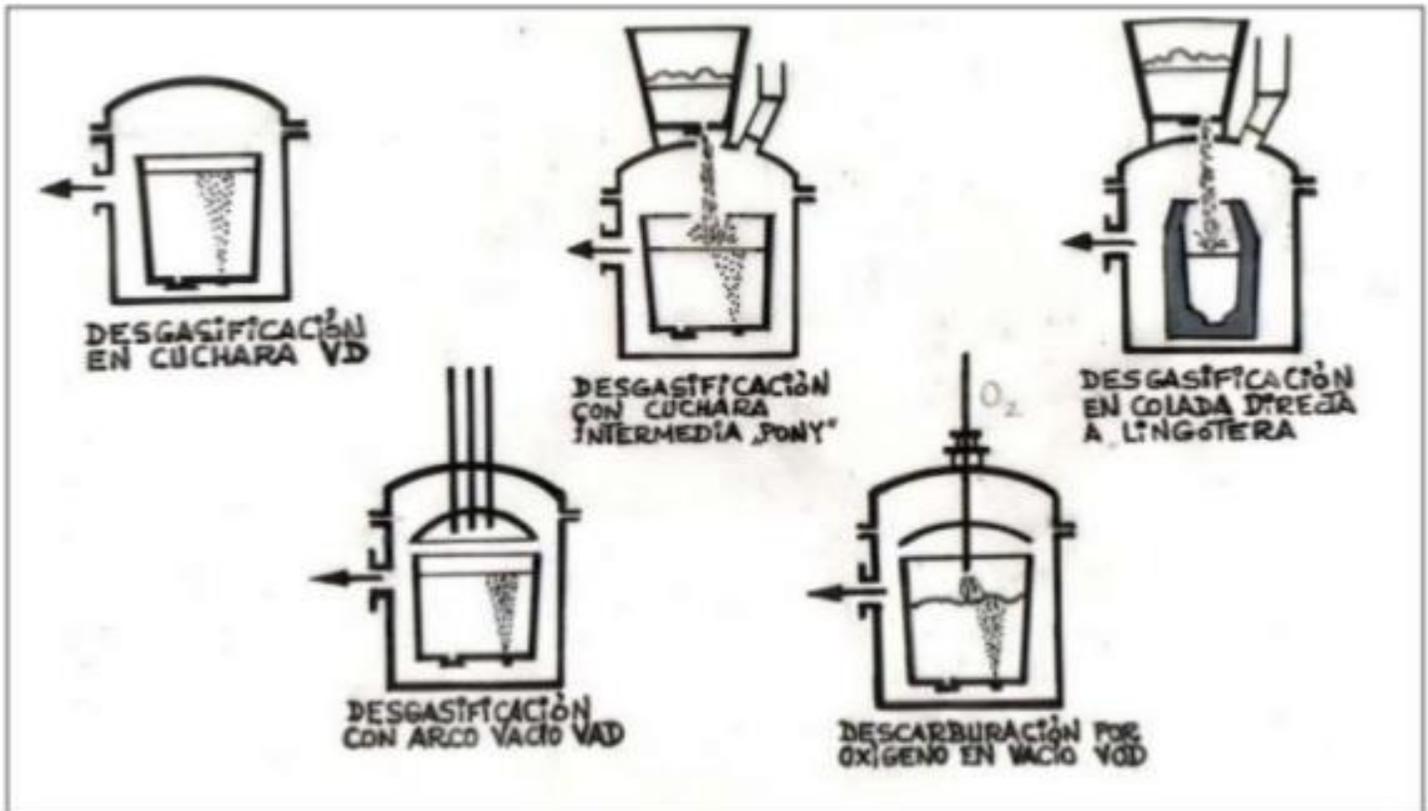
La desgasificación al vacío de los aceros, se desarrolló por la necesidad de obtener aceros calmados para forja con bajos niveles de H₂, que eliminaran los largos tratamientos térmicos de las piezas, para de esta forma evitar la aparición de copos o fisuras.

Estos defectos se originan por la salida del H₂ al exterior debido al descenso de la solubilidad del H₂ en el acero al disminuir la temperatura. Es notoria la solubilidad del H₂ en el hierro puro en función de la temperatura en la cual se observa que dicha solubilidad desciende desde 25 p.p.m. a 8 p.p.m. al solidificar el hierro y al enfriarlo más aún ésta desciende a 1.2 p.p.m.

La eliminación por difusión del H₂ a través del acero se realiza a velocidades aceptables entre 300° y 700° C, siendo muy lenta, esta velocidad, por debajo de los 290° C. Esto es debido a que a temperaturas altas el hidrógeno se encuentra en el acero en estado atómico, el cual se difunde bien, pero a 290° C el hidrógeno atómico pasa a molecular, el cual tiene una velocidad de difusión muy pequeña. Por esta razón las piezas de forja fabricadas con aceros altos en H₂ se mantienen a temperaturas entre 400° y 600° C, para de esta forma bajar los niveles de H₂ por debajo de 2 p.p.m., de una forma relativamente rápida, con el fin de asegurar que al enfriar la pieza a temperatura ambiente no apareciesen copos.

El tiempo que era necesario mantener este tratamiento térmico dependía del tamaño de las piezas y del nivel inicial de H₂ en el acero. Así, la siguiente tabla nos da el tiempo necesario para bajar el contenido en H[^] de 6 p.p.m. a 2.5 p.p.m. manteniendo las piezas a 600°C, en función del tamaño de su sección.

Se ha visto que la idea de desgasificar el acero fue exclusivamente la de eliminar el H₂ como gas disuelto en él. Pero no sólo el H₂ se encuentra disuelto sino que también existen otros gases como son el N₂ y el O₂. El H₂ penetra en el acero mediante: la humedad del medio ambiente, las aleaciones, la utilización de Cal precalcina, etc.



El N₂ viene fundamentalmente del aire, ya sea de la atmósfera situada sobre el caldo o del aire utilizado para el afino del acero, el cual se hace borboteo por la parte inferior del convertidor. Esta última fuente de N₂ hoy en día está desechada al utilizarse oxígeno para el afino. El O₂ proviene ya sea de la atmósfera ó del sistema de afino.

El N₂ produce una disminución en características mecánicas del acero, como puede ser reducir la ductilidad y comunicarle fragilidad. La solubilidad del N₂ disminuye al bajar la temperatura, como ocurre con los otros dos gases. El contenido de O₂ disuelto en el acero fundido viene de terminado por el contenido en C ya que el C y el O₂ se encuentran en equilibrio en el acero líquido.

Al aplicar la desgasificación a vacío a los aceros para forja se observó una serie de mejoras en las características de los aceros, lo cual hizo que se desgasificarán no sólo estos aceros sino una gama mucho más amplia. Entre las mejoras que se encontraron se pueden citar: ductibilidad, propiedades frente a la fatiga, etc.

Estas mejoras estaban ligadas directamente a que la desgasificación producía aceros con niveles bajos de N₂; las inclusiones no metálicas eran mucho menores en tamaño y cantidad debido a la desoxidación que se produce en el baño etc. También hay que citar aquí la eliminación del H₂, cuyas mejoras en las calidades de ciertos aceros se han citado ampliamente.

La eliminación del H₂ se realiza por difusión del gas hacia el exterior del baño. La solubilidad del H₂ en el acero fundido viene regulada por la ley de Sievert, la cual dice que su solubilidad es proporcional a la raíz cuadrada de la presión parcial del H₂.

Por lo tanto, al bajar la presión total a la cual está sometido el acero se disminuye la solubilidad del hidrógeno y este difunde hacia el exterior. La eliminación del N₂ es más difícil que la del H₂ pues aunque la solubilidad de este gas en el acero también sigue la ley de Sievert, su velocidad de difusión es mucho menor y si el acero es calmado, parte del N₂ está en forma de nitruros que son producto de la reacción del N₂ con los desoxidantes como Al.

Al bajar la presión sobre el acero, también se incide sobre el equilibrio entre el C y el O₂ en el baño. $C + CO$ (gas), desplazando la reacción hacia la derecha. Este permite una desoxidación del baño casi completa sin tener que añadir desoxidantes, los cuales son los causantes de la formación de inclusiones no metálicas. Por lo tanto, la cantidad de desoxidantes necesarios para calmar un acero desgasificado es mucho menor, lo cual nos produce un acero mucho más limpio.



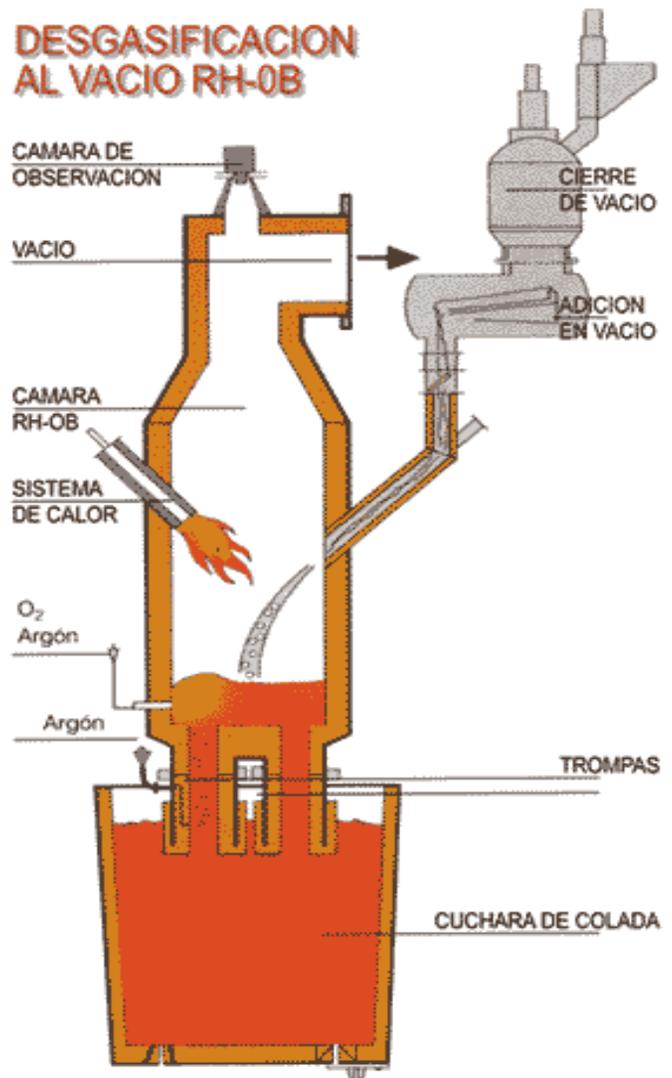
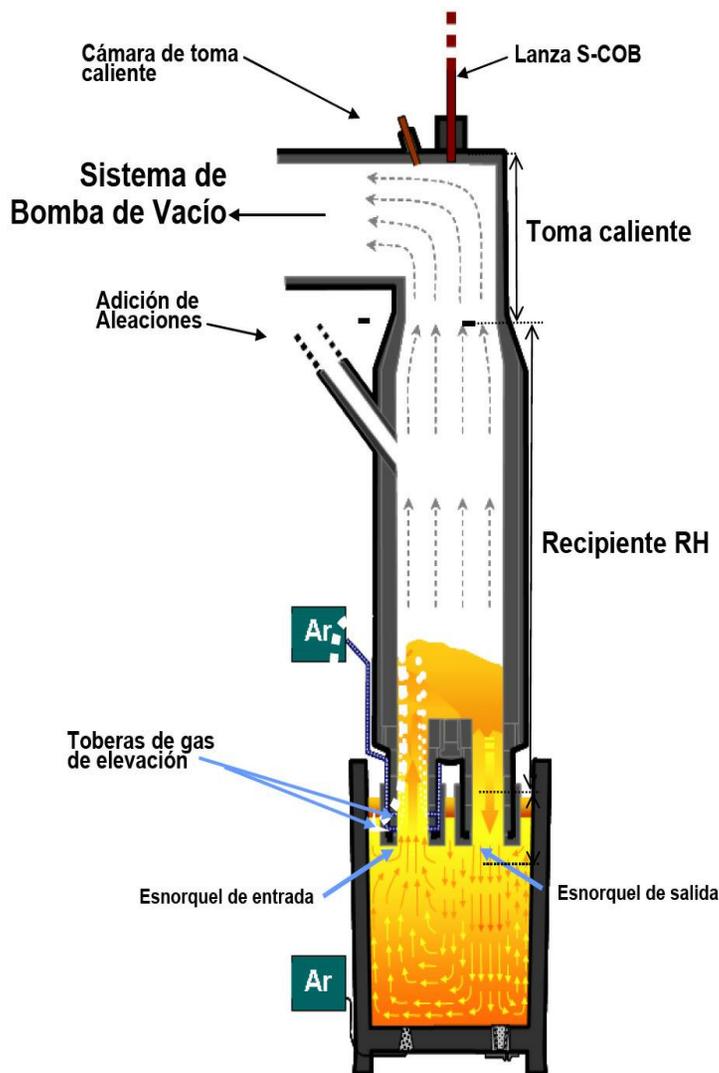
- **Instalaciones de Desgasificación**

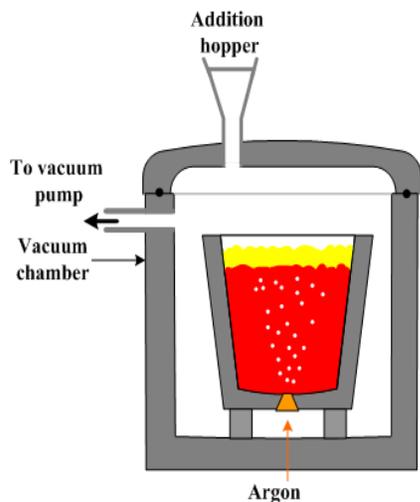
Los procesos de tratamiento por vacío se basan en el uso de bombas de vacío para conseguir desgasificar el acero de forma adecuada, dentro de este tipo de tratamientos podemos diferenciar procesos de vacío sin aporte térmico y con aporte térmico. La principal diferencia entre ambos procesos radica en la aportación adicional de un calentamiento del baño de acero para solventar los problemas de enfriamiento que se producen en los procesos de desgasificado.

Las primeras instalaciones a nivel de planta piloto que se realizaron para desgasificar consistían en una cámara, la cual tenía una tapa de cierre hermético. Dentro de la cámara se colocaba la cuchara con el acero a desgasificar y por un orificio que tenía la tapa se realizaba el vacío.

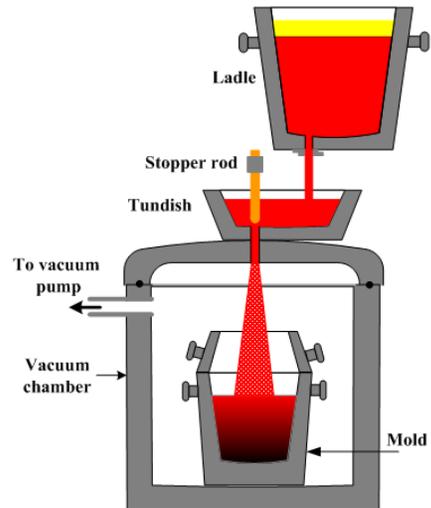
Al empezar a bajar la presión se notaba una evolución de gases desde el interior del baño, la cual al cabo de un tiempo cesaba. Esto indicaba que la desgasificación se había terminado; pero al analizar el baño se podía observar que el nivel de gases disueltos todavía era alto. Esto era debido a que el vacío estaba actuando sobre la superficie del baño y debido a la presión ferrostática el efecto del vacío quedaba anulado a partir de una distancia determinada de la superficie.

Esto lleva a que todos los sistemas de desgasificación deban tener como característica común la de que el acero debe de estar en movimiento para poner cada porción del baño en contacto con el vacío.

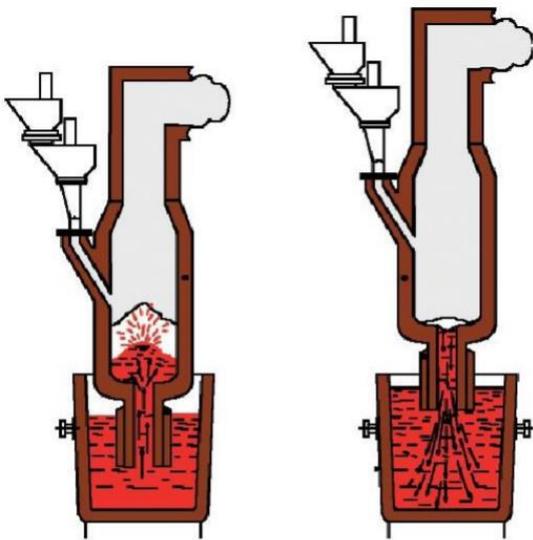




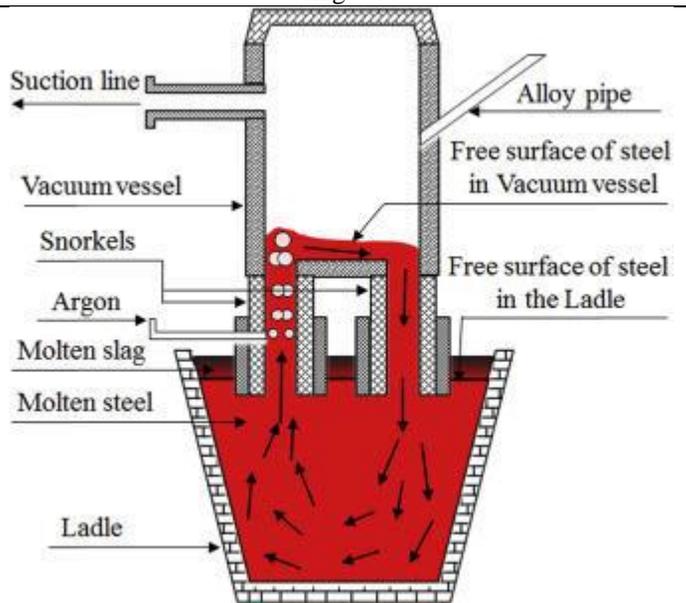
Esquema del proceso Vacuum Degassing o tanque desgasificador



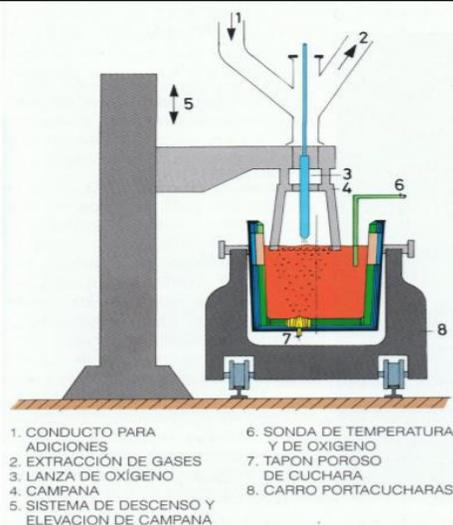
Esquema del proceso de desgasificación en chorro, de cuchara a lingotera



Esquema del proceso de elevación intermitente (DH)

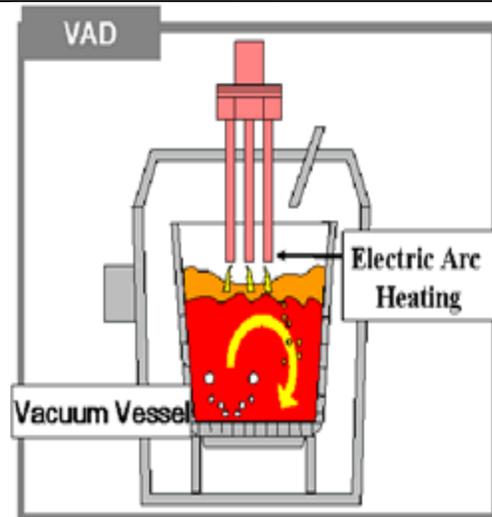


Esquema del proceso de desgasificación por recirculación (RH)



1. CONDUCTO PARA ADICIONES
2. EXTRACCIÓN DE GASES Y DE OXIGENO
3. LANZA DE OXIGENO
4. CAMPANA
5. SISTEMA DE DESCENSO Y ELEVACION DE CAMPANA
6. SONDA DE TEMPERATURA Y DE OXIGENO
7. TAPON POROSO DE CUCHARA
8. CARRO PORTACUCHARAS

Esquema del proceso CAS-OB



Esquema del proceso Vacuum Arc Degassing

4.1.3. Tratamiento del metal con escoria sintética.

Las nuevas exigencias en la producción de acero implican grados cada vez más aleados, libres de inclusiones y desulfurados. Esta metalurgia requiere el empleo de escorias sintéticas y aditivos de escoria más complejos y eficientes. Por lo que actualmente se han desarrollado una importante gama de productos destinados a la preparación de escorias para el proceso metalúrgico.

Debido a la versatilidad, las acerías eléctricas son cada vez más requeridas para la fabricación de aceros de alto carbono y bajo carbono, estructurales, ligas especiales y de construcción mecánica, los cuales poseen elevados requisitos de resistencia, tenacidad y limpidez. Sin embargo, la inadecuada calidad de las materias primas utilizadas aumenta las dificultades del proceso debido a la presencia de elementos residuales perjudiciales tales como el azufre, fósforo, hidrógeno, inclusiones no metálicas de SiO_2 e Al_2O_3 , entre otros.

Para las acerías eléctricas, se debe contar con una gama completa de escorias sintéticas sinterizadas y polvos de cobertura, que actúan de modo específico en cada proceso. Tales productos son a base de aluminatos de calcio, silicatos de calcio y magnesio, pseudo silicatos y aluminatos y otros.

- **Ventajas**

La gama de escorias sintéticas sinterizadas tiene como objetivo principal remover elementos indeseados en el acero (S e inclusiones no metálicas) y evitar el pick up de hidrógeno. Éstas se aplican en hornos olla con excelente esparcibilidad, ejerciendo también otras funciones importantes en el refinado secundario del acero, tales como:

- ✓ Protección del metal líquido al evitar su contacto con la atmósfera
- ✓ Consecuentemente, la absorción de gases indeseados y la minimización de las pérdidas térmicas, volviendo controlable la caída de la temperatura a la que el acero está sujeto;
- ✓ Impiden la exposición del arco eléctrico de los electrodos durante el calentamiento en horno olla,
- ✓ Reducción al desgaste del refractario y de la abóveda;
- ✓ Reducción del tap to tap y consecuente disminución del consumo de energía eléctrica;
- ✓ Formación de coating en la olla, lo que aumenta la vida útil de los revestimientos refractarios;
- ✓ Reducción del efecto flicker en virtud de la mayor estabilidad del arco eléctrico.

Además de eso, las escorias sintéticas sinterizadas hacen posible la fabricación de aceros con tenores reducidos de hidrógeno, inclusive en usinas que no poseen equipos de desgasificación.

- **Resultados**

- ✓ Remoción profunda de inclusiones no metálicas, lo que hace posible la fabricación de aceros especiales;
- ✓ Elevadas tasas de desulfuración;
- ✓ Posibilidad de fabricación de aceros con tenores de hidrógeno inferiores a 5,0 ppm;
- ✓ Aumento significativo de la vida útil de las ollas;
- ✓ Reducción del consumo de electrodos;
- ✓ Reducción del consumo de energía eléctrica.

Las escorias sintéticas sinterizadas actúan de modo específico en cada proceso. Tales productos son a base de aluminatos de calcio, silicatos de calcio y magnesio, pseudo silicatos y aluminatos y otros. Además de las escorias, se debe contar con equipos necesarios para la aplicación de estos productos, tales como sistemas de adición o inyección de agentes y el seguimiento de operación que son llevados a cabo por un equipo especializado.



- **Ejemplo de Escoria Sintética:**

- Aluminatos cálcicos

- ⌘ Aplicaciones metalúrgicas:

- ✓ Formación de escorias sintéticas homogéneas
 - ✓ Fluidificante alternativo al CaF₂
 - ✓ Buena protección frente a pick up de H₂ /N₂/O₂
 - ✓ Capacidad de retención de S
 - ✓ Alta capacidad de absorción de inclusiones del acero
 - ✓ Escorias libre de fluoruros
 - ✓ Aporte de MgO para disminución de ataque de refractarios
 - ✓ Alta velocidad de fusión

Composiciones típicas CaO/Al₂O₃/MgO

COMPOUND	ALUCAL 40	ALUCAL 55	ALUCAL 55
CaO	40,5 %	35,5 %	26 %
Al ₂ O ₃	50,5 %	51 %	51 %
SiO ₂	3,5 %	5,2 %	5,5 %
MgO	3%	4%	10,7%
Fe ₂ O ₃	1,5 %	1,8 %	2 %
TiO ₂	1 %	1 %	1 %
C	0,65%	0,75%	0,75%
Cristal fases	C12A7, CA	C12A7, CA	CA, C12A7, MA
Melting Point	<1350 °C	<1380 °C	<1440 °C

- **Fluidificantes de Escoria**

- **Ventajas del uso de Fluidificantes y Fluxes**

- ✓ Evitar las pérdidas de hierro en la escoria de desulfuración, que es uno de los costes importantes del proceso de desulfuración.
- ✓ La formación de escorias durante el proceso desulfuración y la propia agitación del mismo, hace que gránulos de arrabio puedan quedar atrapados en la escoria si esta no es lo suficientemente fluida.
- ✓ La fluidez de la escoria puede verse afectada por la incorporación de carbón durante el proceso y la formación de escorias con alto punto de fusión.
- ✓ La forma más eficiente para disminuir los puntos de fusión de la escoria es el aporte de fluxes al proceso.
- ✓ Existen una amplia variedad de fluxes basadas en diferentes mezclas de criolitas potásicas.
- ✓ Las principales ventajas de estos fluxes en comparación con criolitas sódicas y espato flúor serían:
- ✓ Menor punto de fusión: 650°C frente a 1100 y 1400°C para Na₃AlF₆ y CaF₂ respectivamente.
- ✓ Coste inferior debido a la necesidad de menores dosificaciones: 1% Flux ST es equivalente a 1,3% de Na₃AlF₆ y 4% de CaF₂.
- ✓ Disminución del aporte de fluoruros a la escoria final: mejora medioambiental.

- **Desoxidantes de escoria**

La necesidad de aceros cada vez más desulfurados precisa de escorias básicas con una actividad de oxígeno lo más baja posible. El paso de escorias del EAF y BOF durante el proceso de sangrado hace que la calidad de las escorias generadas no sea siempre óptima y sea necesario desoxidar las escorias previamente al proceso metalúrgico. Existen diferentes productos con contenidos en Al metálico variable y en diferente formato de presentación.

Composiciones Típicas

	Deoxal 70G	Deoxal 50G
Al metálico	60-62%	50-55
Si metálico	5-6%	5-5.5
CaO	0.5-3%	0.5-3%
SiO ₂	2-8%	2-8%
Al ₂ O ₃	22-25%	35-40%
MgO	1-3%	<1
Fe ₂ O ₃	0.5-3.5%	0-0.1
C	0-1%	0-1%
Grain size	1-3mm 3-6 mm 6-30mm	1-3mm 3-6 mm 6-30mm

4.1.4. Inyección de materiales en forma de polvo, alambre y encapsulado.

- **Inyección de materiales en forma de polvo**

La búsqueda por eficiencia en el proceso de desulfuración (reducción de los tenores de azufre) del hierro de arrabio resultó en nuevos procedimientos e innovaciones en equipos, que aumentaron significativamente la calidad final del acero y redujeron el consumo de energía, además de transformar los residuos tóxicos en material inerte. Los procesos actuales de desulfuración utilizan agentes desulfurantes de alta reactividad, que son compuestos básicamente de óxido de calcio, carburo de calcio, magnesio metálico y otros elementos que reaccionan con el azufre contenido en el seno metálico, transformándolo en sulfato y convirtiéndolo en escoria.

Considerando que el ambiente reductor es factor esencial para la reacción de desulfuración, los procesos requieren, además de los compuestos balanceados, una adición controlada, constante y homogénea de los agentes en el seno metálico. Para ello, se usa el gas inerte (Nitrógeno) para el transporte y difusión del agente desulfuración. Las operaciones de desulfuración incluyen desde un proceso de simple adición del agente en la olla de arrabio, hasta el proceso más sofisticado de inyección profunda, por inmersión de lanza refractaria rotativa en carros torpedo o en ollas.

Los procesos de desfosforización del arrabio (reducción de los tenores de fósforo) consisten en la oxidación del fósforo y en la combinación de éste con el calcio y otros componentes, los cuales se inyectan en profundidad en el metal líquido, formando compuestos que se transfieren a la escoria y, de este modo, se remueven del metal. Siendo el arrabio líquido la principal materia prima para la producción del acero, para el cual se exige, cada vez más, resistencia y aplicabilidad, aumentan las demandas por procesos de desulfuración y desfosforación, pues altos tenores de fósforo, azufre y otras inclusiones no metálicas en el acero provocan mayor fragilidad en caliente y menor resistencia al impacto, entre otros perjuicios.

Los productos que se utilizan a lo largo del proceso de transformación del hierro de arrabio en acero líquido tienen inicio con la reducción del tenor de azufre contenido en el arrabio, en la Estación de desulfuración. Enseguida, en la estación desfosforadora, se aplica al arrabio el agente desfosforador, como primer refinado, buscando la reducción del tenor de fósforo.

De la estación desfosforante, el arrabio sigue hacia los conversores u hornos eléctricos de la acería, donde se transforma en acero. De los conversores u hornos eléctricos, el acero pasa al horno olla, estación de burbujado o de calentamiento químico, donde se aplica la escoria sintética como segundo refinado y se inyecta el agente desulfuración por micropulverizado. La etapa siguiente es la desgasificación al vacío, donde el acero se refina por tercera vez, utilizándose otras especificaciones de escoria sintética. Luego de este tratamiento, el acero sigue rumbo a la cadena de laminado/trefilado.

Los procesos de refinado primario del hierro de arrabio, requieren de una gama completa de agentes desulfurantes, desfosforadores y desicilizadores para aplicación en ollas. Los productos personalizados para actuar según las necesidades de cada proceso son los agentes a base de óxido de calcio, carburo de calcio, magnesio metálico y otros. También, los equipos necesarios para la aplicación de estos productos, tales como sistemas de adición o inyección de agentes. Los proyectos, montajes, partidas y el seguimiento de operación son llevados a cabo por un equipo especializado.

- **Ventajas del uso de polvos**

La línea de agentes desulfurantes, desfosforadores y desicilizadores tienen como objetivo principal:

- ✓ Promover la remoción del azufre y del fósforo del seno metálico,
- ✓ Además de llevar a cabo retirada del silicio cuando fuera necesaria, proporcionando, de ese modo, la fabricación del más noble arrabio.

- ✓ Los productos se aplican por inyección profunda en ollas a través de la utilización de lanzas refractarias y de gas de arrastre.
- ✓ Entre las principales ventajas mencionamos: reducidos consumos específicos, altas tasas de desulfuración o desfosforización, alta velocidad de tratamiento y bajo costo por tonelada tratada.

- **Resultados**

- ✓ Remoción del azufre y fósforo a niveles extremadamente bajos, lo que permite la fabricación de aceros nobles y de exigentes aplicaciones.
- ✓ Tasas de desulfuración y desfosforado superiores al 90%;
- ✓ El tratamiento del hierro de arrabio se lleva a cabo con bajo consumo específico del agente, garantizando un mejor costo beneficio, lo que hace posible la utilización de materias primas menos nobles en el Alto Horno;
- ✓ Tiempo de tratamiento a la medida para cada proceso.
- ✓ Los agentes desulfurantes micropulverizados a base de óxido de calcio permitirán tratamientos de desulfuración y control de inclusiones.
- ✓ Remoción profunda de inclusiones no metálicas, lo que hace posible la fabricación de aceros especiales;
- ✓ Elevadas tasas de desulfuración;
- ✓ Posibilidad de fabricación de aceros con tenores de hidrógeno inferiores a 5,0 ppm;
- ✓ Aumento significativo de la vida útil de las ollas;
- ✓ Reducción del consumo de electrodos;
- ✓ Reducción del consumo de energía eléctrica.

- **Inyección de materiales en forma de alambre (Cored wire)**

Es un sistema más complejo que los anteriores, de forma simplificada consiste en la adición de aluminio, calcio y ferroaleaciones principalmente a elevada velocidad mediante una envoltura o tubería de acero, de forma conjunta con una inyección de Argón por el tapón poroso de la parte inferior de la cuchara. La incorporación de aluminio mediante alambre es útil para homogeneizar el baño de acero y favorecer la desoxidación, y el calcio permite modificar la morfología de las inclusiones.

La adición de calcio comenzó a utilizarse con este método, debido a que el calcio tiene un punto de ebullición inferior a la temperatura a la que se encuentra el baño de acero. El sistema completo consta de una plataforma giratoria sobre la que están dispuestos los equipos de alimentación de alambre, la máquina de inyección del alambre, el brazo de sujeción para el sistema de toma de muestras, sensores de temperatura, y en muchos sistemas también cuenta con un slab de refrigeración para refrigerar el baño de acero cuando sea necesario y una lanza de inyección de Argón.

Se muestra el proceso de inyección de aditivos mediante alambre. Existen otros sistema de inyección menos empleados, pero que también son efectivos, entre los que se pueden destacar la inyección vehiculada de aluminio con nitrógeno o la inyección de proyectiles de aluminio y calcio a gran velocidad para que lleguen al fondo de la cuchara sin fundirse antes.

En el refinado secundario del acero se llevan a cabo los tratamientos complementarios de desulfuración, ajustes finales de composición química y control de inclusiones. Normalmente se utilizan equipos que hacen posible el calentamiento eléctrico (horno olla) o químico (CAS-OB, AHF o IRUT) o simplemente con el burbujeo de gas inerte. La corrección de la composición química se lleva a cabo a través de la adición de ligas a través de silos o alambres. Se pueden utilizar equipos auxiliares para el uso de agentes desulfurantes micropulverizados.

Los tratamientos, cuando realizados en fase intermedia entre el Alto Horno y la Acería, le dan gran versatilidad a las usinas al hacer posible la fabricación de diversos tipos de aceros, inclusive aquellos con rígidos requisitos.

Buscando cumplir con los procesos de refinado primario del hierro de arrabio, estos agentes desulfurantes, desfosforadores y desicilizadores para aplicación en carros torpedo o en ollas. Son productos a base de óxido de calcio, carburo de calcio, magnesio metálico, entre otros.

- **Ventajas del uso de alambres**

- ✓ La remoción de elementos de azufre y fósforo del seno metálico, resultando en la fabricación de aceros nobles.
- ✓ Los agentes se aplican por inyección profunda en carros torpedo o en ollas a través de lanzas refractarias y de gas de arrastre.
- ✓ Reducidos consumos específicos, altas tasas de desulfuración, alta velocidad de tratamiento y bajo costo por tonelada tratada.

- **Resultados**

- ✓ Remoción del azufre y fósforo a niveles extremadamente bajos, lo que permite la fabricación de aceros nobles y de exigentes aplicaciones.
- ✓ Tasas de desulfuración y desfosforado superiores al 90%;
- ✓ El tratamiento del hierro de arrabio se lleva a cabo con bajo consumo específico de los agentes, garantizando un mejor costo beneficio, lo que hace posible la utilización de materias primas menos nobles en el Alto Horno;
- ✓ Tiempo de tratamiento a la medida para cada proceso.

- **Inyección de materiales en forma de capsulas**

En este proceso, el acero derretido se inyecta o se sumerge cierto tipo de pastillas o capsulas a través de conductos o lanzas en la olla de colada. Se hace descender un recipiente de vacío calentado de modo que su boquilla de absorción quede por debajo del nivel líquido del acero fundido.

La presión atmosférica impulsa el acero fundido hacia arriba dentro de la cámara de vacío, en donde los gases revientan y se extraen mediante la bomba de vacío. La elevación del recipiente de vacío permite que el acero fundido fluya de vuelta, por la fuerza de gravedad, dentro de la olla de colada.

Este ciclo se repite varias veces hasta que la totalidad el acero fundido en la olla se ha desgasificado y se utiliza el proceso para inyectar las capsulas o pastillas que sirvan para propósitos específicos de eliminación o remoción de elementos nocivos del acero.

Con la constante de evolución tecnológica, estas técnicas están al final de la cadena de fabricación de aceros, por lo que se vuelven puntos extremadamente estratégicos en ollas de colada. Estos procesos de inyección de capsulas en las acerías son a base de aluminatos de calcio, silicatos de calcio y magnesio, pseudo silicatos y aluminatos y otros.

- **Ventajas del uso de capsulas**

- ✓ Remover inclusiones no metálicas por encima del metal líquido con excelente esparcibilidad, ejerciendo también otras funciones importantes tales como:
- ✓ protección del metal líquido al evitar su contacto con la atmósfera, lo que minimiza las pérdidas térmicas;
- ✓ Reducción del desgaste refractario, lo que aumenta la vida útil del mismo;
- ✓ Promoción de mejoras de las condiciones operativas.

- **Resultados**

- ✓ Remoción profunda de inclusiones no metálicas, lo que hace posible la fabricación de aceros especiales;
- ✓ Protección del acero contra reoxidación;
- ✓ Reducción de las pérdidas térmicas;
- ✓ Punto de fusión adecuado a cada proceso;
- ✓ Protección del revestimiento refractario;
- ✓ Aumento de la vida útil del refractario.
- ✓ Ajuste de composición
- ✓ Obtención segura de un análisis concreto.
- ✓ Garantizar intervalos más estrechos de composición.
- ✓ Mejorar rendimiento de adición de ferroaleaciones.
- ✓ Adición exacta de ferroaleaciones.
- ✓ Mezclado y homogeneización correcta del caldo.

Actualmente pueden ser utilizados en los procesos DH, RH, VAD, CAS, CAB, LF, durante la fase de refinado.



G.) Adición de Aluminio y Calcio por medio de alambre o de proyectiles: El alambre se introduce a gran velocidad en el acero mediante un mecanismo especial. Al mismo tiempo se remueve el acero de la cuchara inyectando Argón. En el caso de adición por proyección, los proyectiles se lanzan a una velocidad controlada para que almacenen el fondo de la cuchara, por medio de un aparato que funciona como una metralleta de aire comprimido.

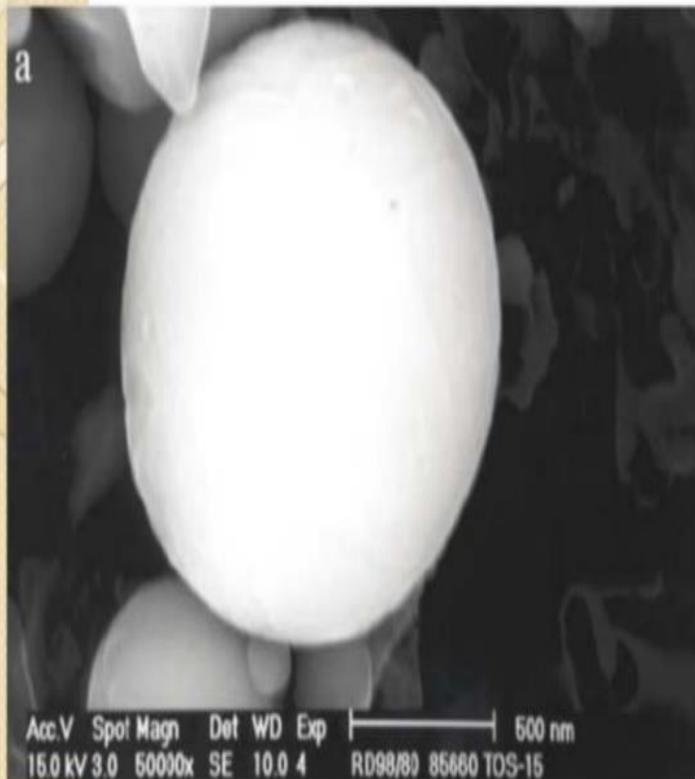
H.) Re fusión por arco bajo vacío (VAR) y bajo escoria electro conductora (E.S.R.): Por estos métodos se producen lingotes de acero de gran pureza. Ambos métodos consisten en la re fusión de un electrodo de la composición química deseada, en un crisol enfriado por agua, realizándose simultáneamente la fusión del electrodo y la solidificación del acero.

B.) Tratamiento de afino de los aceros inoxidables: La chatarra se funde en un horno eléctrico de arco de inducción. Después de colada la cuchara con el acero fundido en la cámara y hecho el vacío, se inyecta oxígeno con una lanza situada en la parte superior, que elimina el carbono con un mínimo de oxidación metálica. Al mismo tiempo, se pasa Argón a través de un tapón poroso situado en el fondo de la cuchara, para homogeneizar la masa del acero líquido.

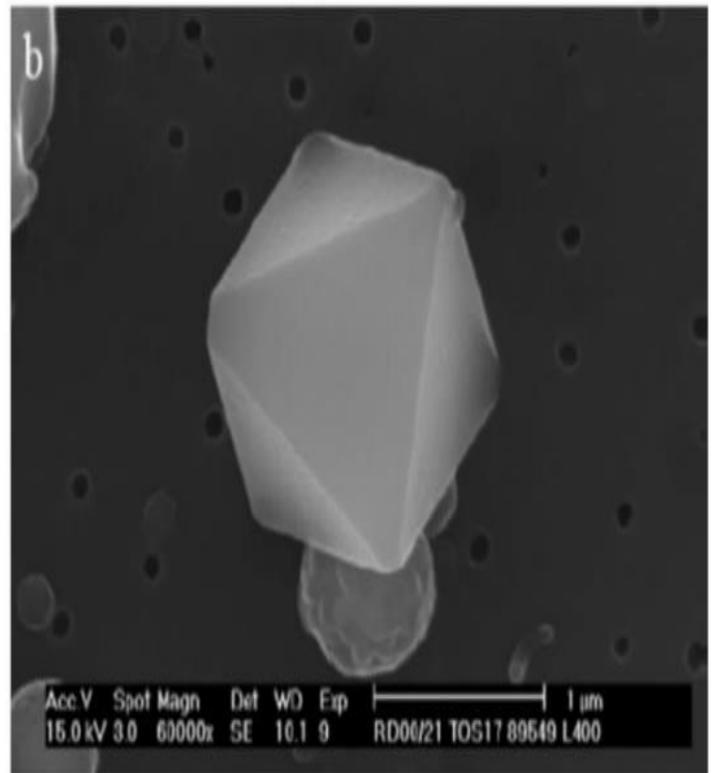
C.) Tratamiento de homogeneización por barboteo: Consiste en la agitación del baño mediante la inyección de un gas inerte, generalmente Argón, a través del fondo de la cuchara o por una lanza.

D.) Tratamientos de desulfuración y desoxidación: Se insuflan estos productos en polvo, a través de una lanza, por medio de un gas inerte. Los productos más frecuentes para insuflar son el (SILICIO-CALCIO) "Si-Ca" y diversas escorias sintéticas. La agitación del acero por el paso del gas produce excelente homogeneidad de composición y temperatura del baño y una mejora de la limpieza.

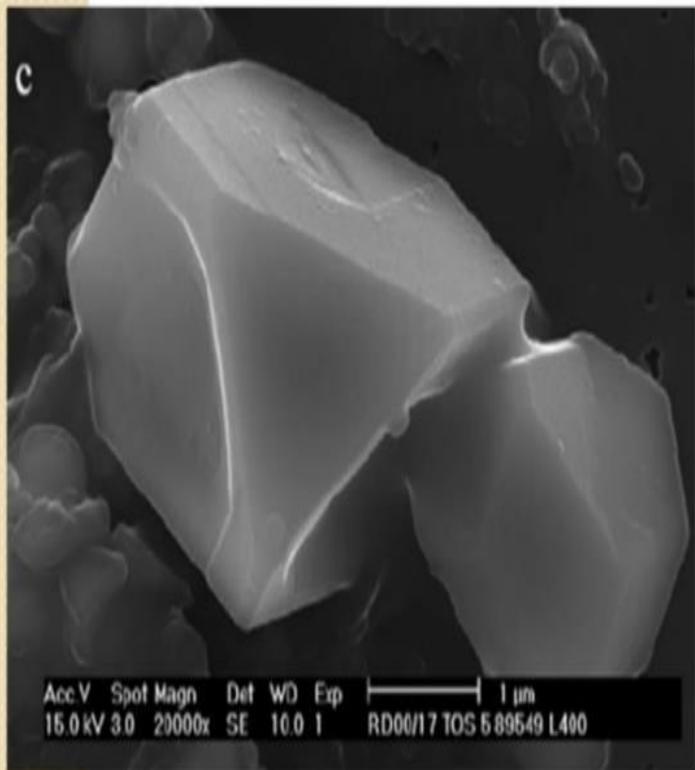
Small spherical inclusion



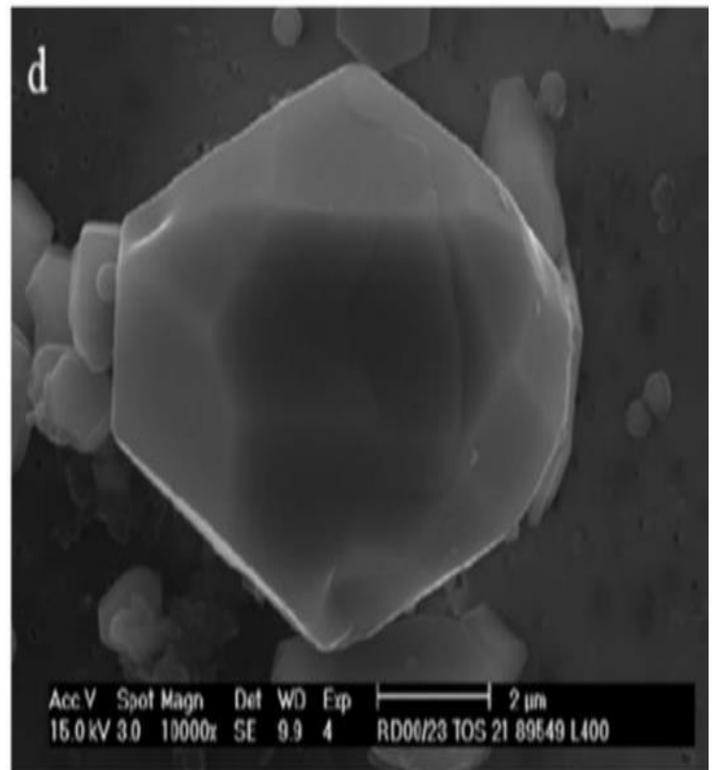
Octahedral inclusion



Small polyhedral inclusion



Large polyhedral inclusion



4.1.5. Tecnologías alternativas para la fabricación de aceros de alta calidad y/o especiales

La industria siderúrgica suele caracterizarse en el avance en materia tecnológica generalmente está impulsado por requerimientos específicos de la demanda y las regulaciones en materia ambiental. La industria siderúrgica evidencia una intensa actividad tecnológica y capacidades concretas de avanzar en tecnologías específicas cuyo impacto podría ser más visible en materia de crecimiento, de los procesos y la sustentabilidad ambiental, mientras que las tecnologías de producto están orientadas a la diferenciación y la captación de demandas hacia una mayor calidad o diversidad de infraestructura.

Fue necesario esperar varias décadas para que se descubrieran las propiedades más interesantes del acero. Inicialmente, la atención se centró en la gran dureza del acero y en su extraordinaria capacidad de resistir al desgaste. Se hicieron muchas herramientas para maquinar aceros que podían trabajar por horas sin necesidad de aliarse con frecuencia. Muchos años después se descubrió que la velocidad de corte de las herramientas podía incrementarse notablemente. El acero de Mushet es el antecedente de los modernos aceros de "alta velocidad".

Hoy las herramientas para maquinar, llamadas herramientas de corte, se hacen con aceros de alta velocidad. A principios del presente siglo los aceros de alta velocidad llevaban un alto porcentaje de tungsteno, alrededor del 18%. Contenían cromo, en un 4%; además del carbono, el manganeso y el silicio. Durante la segunda Guerra Mundial y la Guerra de Corea hubo una tremenda escasez de tungsteno.

El molibdeno pronto destacó como sustituto y, para cuando los conflictos bélicos se habían apaciguado, el molibdeno estaba completamente firme en el mercado. En la actualidad, la mayoría de los aceros de alta velocidad emplean al molibdeno en lugar del tungsteno.

Aparte de los aceros para herramientas de corte existen aceros especiales para el conformado de piezas en forjas y troqueles donde, además de la resistencia al desgaste, por fricción, se logra una gran tenacidad para absorber muchísimos golpes. Propiedades similares se esperan de las herramientas para cizallar y agujerar, las cuales, además, deben tener una gran estabilidad dimensional en los tratamientos térmicos.

La selección del acero apropiado para cada tipo de herramienta es todo un arte. No es nada fácil establecer una relación directa entre la adición de un aleante específico y la característica del acero que se modifica. Además, hay que tomar en cuenta variables como el procesado y los tratamientos térmicos, que suelen tener gran influencia.



- **Tipos de Acero Especial, Composición y Fabricación**

Los diferentes tipos de acero se comportan casi como materiales completamente diferentes bajo diferentes condiciones. Hay que observar la estructura interna del acero bajo un microscopio electrónico y la respuesta se reduce en gran medida a la cantidad de carbono que contiene el hierro y cómo se distribuye.

El acero consiste en granos hechos de diferentes tipos de hierro y carbono, algunos de los cuales son duros, mientras que otros son blandos. Cuando predominan los tipos más duros, se obtiene un material duro y quebradizo; cuando hay tipos más blandos en el medio, el material puede doblarse y flexionarse para que pueda trabajar y darle forma más fácilmente.

Dentro del acero se incluyen algunos (o todos) de los siguientes compuestos:

- Ferrita: Hierro relativamente puro con pequeñas cantidades de carbono que es suave y fácil de moldear. Da al hierro su propiedad magnética.
- Cementita (carburo de hierro): Hierro con mucho más carbono (y a veces otros elementos) que es muy duro y quebradizo. Se comporta esencialmente como un material cerámico.
- Grafito: Cristales de carbono puro, que hacen que las aleaciones de hierro sean duras y quebradizas.
- Perlita: Mezcla de capas alternas de ferrita y cementita que se asemeja a la madreperla bajo un microscopio.
- Austenita: Una aleación de hierro y carbono presente en el acero calentado a altas temperaturas.
- Martensítica: Similar a la ferrita pero mucho más dura.

Diferentes tipos de acero contienen diferentes cantidades de estos ingredientes dispuestos en diferentes estructuras cristalinas. Hacer aleaciones de hierro o acero por un método u otro cambiará las cantidades relativas de los ingredientes, alterando sus propiedades.

El tratamiento del acero de diferentes maneras después de su fabricación cambia sus propiedades físicas al alterar su estructura cristalina interna. Por ejemplo, el acero tratado térmicamente transforma la austenita que se encuentra en su interior en martensita, lo que hace que su estructura interna sea mucho más dura.

El acero martillado y laminado rompe los cristales de grafito y otras impurezas que acechan en su interior, cierra las brechas que podrían conducir a debilidades y, en general, produce una estructura cristalina más regular.

Los aceros de bajo carbono, conocidos en ocasiones como aceros suaves, contienen normalmente menos de 0.25% de carbono. Estos aceros se trabajan fácilmente en caliente y se producen en grandes cantidades para la fabricación de vigas y otros productos estructurales.

Los aceros de medio carbono contienen entre 0.25 y 0.70% de carbono; se emplean más frecuentemente en componentes de máquinas que requieren resistencia mecánica alta y, en especial, buena resistencia a la fatiga.

Los aceros de alto carbono contienen más de 0.70% de carbono y constituyen una categoría especial a causa de su dureza alta y tenacidad baja. Esta combinación de propiedades hace que los aceros de alto carbono sean ideales, por ejemplo en los cojinetes, donde se requiere una resistencia alta al desgaste y las cargas compresivas disminuyen la posibilidad de que se produzca una fractura frágil, al contrario de lo que sucede con cargas de tensión.

Los aceros clásicos a que forman la primera serie y que se obtienen por los procedimientos indicados, son:

- 1°. El acero natural obtenido directamente de los minerales y que puede ser batido y refinado.
- 2°. El acero de cementación, con sus variedades Wootz y damasquino.
- 3°. El acero de forja con sus diferentes clases de acero crudo, acero pudelado, acero colado, etc.
- 4°. El acero fundido.

Los tres procesos principales de fabricación de acero son:

- ❑ **Proceso básico de oxígeno:** El acero se fabrica en un recipiente gigante en forma de huevo, abierto en la parte superior, llamado horno de oxígeno básico, que es similar a un alto horno ordinario, sólo que puede girar hacia un lado para verter el metal acabado. La corriente de aire utilizada en un alto horno se sustituye por una inyección de oxígeno puro a través de un tubo llamado lanza.
 - ❑ **Proceso de corazón abierto:** Un poco como una chimenea gigante en la que el hierro en bruto, la chatarra y el mineral de hierro se queman con piedra caliza hasta que se fusionan. Se añade más hierro, el carbono no deseado se combina con oxígeno, las impurezas se eliminan como escoria y el hierro se convierte en acero fundido. Trabajadores calificados toman muestras del acero y continúan el proceso hasta que el hierro tenga exactamente el contenido de carbono adecuado para fabricar un tipo particular de acero.
 - ❑ **Proceso de horno eléctrico:** Con un horno eléctrico, que utiliza arcos eléctricos (chispas gigantescas), se funde el hierro o la chatarra de acero. Como son mucho más controlables, los hornos eléctricos se utilizan generalmente para fabricar aceros de aleación, de carbono y para herramientas de mayor especificación.
- **Elementos aleantes del acero y mejoras obtenidas con la aleación**

Las clasificaciones normalizadas de aceros como la AISI, ASTM y UNS, establecen valores mínimos o máximos para cada tipo de elemento. Estos elementos se agregan para obtener unas características determinadas como templabilidad, resistencia mecánica, dureza, tenacidad, resistencia al desgaste, soldabilidad o maquinabilidad.16 A continuación se listan algunos de los efectos de los elementos aleantes en el acero:17 18

- ☉ Aluminio: se usa en algunos aceros de nitruración al Cr-Al-Mo de alta dureza en concentraciones cercanas al 1 % y en porcentajes inferiores al 0,008 % como desoxidante en aceros de alta aleación.
- ☉ Boro: en muy pequeñas cantidades (del 0,001 al 0,006 %) aumenta la templabilidad sin reducir la maquinabilidad, pues se combina con el carbono para formar carburos proporcionando un revestimiento duro. Es usado en aceros de baja aleación en aplicaciones como cuchillas de arado y alambres de alta ductilidad y dureza superficial. Utilizado también como trampa de nitrógeno, especialmente en aceros para trefilación, para obtener valores de N menores a 80 ppm.
- ☉ Cobalto: muy endurecedor. Disminuye la templabilidad. Mejora la resistencia y la dureza en caliente. Es un elemento poco habitual en los aceros. Aumenta las propiedades magnéticas de los aceros. Se usa en los aceros rápidos para herramientas y en aceros refractarios.
- ☉ Cromo: Forma carburos muy duros y comunica al acero mayor dureza, resistencia y tenacidad a cualquier temperatura. Solo o aleado con otros elementos, mejora la resistencia a la corrosión. Aumenta la profundidad de penetración del endurecimiento por tratamiento termoquímico como la carburación o la nitruración. Se usa en aceros inoxidable, aceros para herramientas y refractarios. También se utiliza en revestimientos embellecedores o recubrimientos duros de gran resistencia al desgaste, como émbolos, ejes, etc.

- ☉ **Molibdeno:** es un elemento habitual del acero y aumenta mucho la profundidad de endurecimiento de acero, así como su tenacidad. Los aceros inoxidable austeníticos contienen molibdeno para mejorar la resistencia a la corrosión.
- ☉ **Nitrógeno:** se agrega a algunos aceros para promover la formación de austenita.
- ☉ **Níquel:** es un elemento gammageno permitiendo una estructura austenítica a temperatura ambiente, que aumenta la tenacidad y resistencia al impacto. El níquel se utiliza mucho para producir acero inoxidable, porque aumenta la resistencia a la corrosión.
- ☉ **Plomo:** el plomo no se combina con el acero, se encuentra en él en forma de pequeñísimos glóbulos, como si estuviese emulsionado, lo que favorece la fácil mecanización por arranque de viruta, (torneado, cepillado, taladrado, etc.) ya que el plomo es un buen lubricante de corte, el porcentaje oscila entre 0,15 % y 0,30 % debiendo limitarse el contenido de carbono a valores inferiores al 0,5 % debido a que dificulta el templado y disminuye la tenacidad en caliente. Se añade a algunos aceros para mejorar mucho la maquinabilidad.
- ☉ **Silicio:** aumenta moderadamente la templabilidad. Se usa como elemento desoxidante. Aumenta la resistencia de los aceros bajos en carbono.
- ☉ **Titanio:** se usa para estabilizar y desoxidar el acero, mantiene estables las propiedades del acero a alta temperatura. Se utiliza su gran afinidad con el carbono para evitar la formación de carburo de hierro al soldar acero.
- ☉ **Wolframio:** también conocido como tungsteno. Forma con el hierro carburos muy complejos estables y durísimos, soportando bien altas temperaturas. En porcentajes del 14 al 18 %, proporciona aceros rápidos con los que es posible triplicar la velocidad de corte de los aceros al carbono para herramientas.
- ☉ **Vanadio:** posee una enérgica acción desoxidante y forma carburos complejos con el hierro, que proporcionan al acero una buena resistencia a la fatiga, tracción y poder cortante en los aceros para herramientas.
- ☉ **Niobio:** Se utiliza para darle dureza, flexibilidad y elasticidad al acero, principalmente se utiliza para el acero estructural y para aceros automotrices.

CROMO	NÍQUEL	MOLIBDENO
Formador de Ferrita y Carburo	Formador de Austenita	Formador de Ferrita y Carburo
<ul style="list-style-type: none"> - Principal responsable de la resistencia a la corrosión y de la formación de la película de óxido - No presenta aporte significativo en la resistencia a altas temperaturas y al creep 	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora la resistencia general a la corrosión en líquidos no oxidantes. Mejora la tenacidad y la ductilidad. - Se añade a los grados con cromo para mejorar las propiedades mecánicas. - Aumenta la resistencia eléctrica, la fatiga y aumenta la capacidad de ser soldado. - Reduce la conductividad del calor 	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora la resistencia a temperaturas elevadas y al creep - Mejora la resistencia general a la corrosión en medios no oxidantes, y la resistencia a la corrosión por picadura en todos los medios

- **Fabricación del acero inoxidable**

El acero inoxidable es una aleación. El contenido de cromo lo convierte en un metal no corrosivo y brillante. Este metal libre de óxido y de manchas es parte fundamental de nuestra vida diaria por su uso en cubiertos y otros artículos del hogar.

Se define metalúrgicamente al acero inoxidable como una aleación de acero con un 11 % de cromo. El porcentaje de cromo y otros componentes varía según el grado deseado de acero. Su uso es popular en aparatos industriales y domésticos ya que no se corroe, se mancha o se oxida tan fácil como el acero regular. A pesar de que se le llama “inoxidable”, no es totalmente a prueba de óxido.

También se le llama CRES, por sus siglas en inglés, o acero resistente a la corrosión, en especial cuando la aleación no tiene grado. Se encuentra disponible en varios grados y acabados de superficie para cumplir con los requerimientos industriales y domésticos y del ambiente el cual se expone el metal. Diferentes grados de acero inoxidable tienen diferentes cantidades de cromo para generar la lámina deseada de óxido de cromo, que previene el que óxido se extienda.

El acero inoxidable está hecho de acero, cromo, níquel, manganeso y nitrógeno. La fabricación del acero inoxidable comprende una serie de pasos. Primero, se funden las materias primas en un horno eléctrico. Se someten, al menos, a 12 horas de calor intenso.

La mezcla es moldeada en desbastes rectangulares, planchas o palanquillas parecidas a barras antes de tomar una forma semisólida. Esta forma inicial de acero es procesada a través de la operación de formado que incluye la laminación en caliente en barras, cables, láminas y planchas de acero.

Luego, el metal es recocido. Este es un tratamiento térmico donde primero se calienta el metal y luego es enfriado en condiciones extremas controladas. En consecuencia, se trata el metal con tensión interna y es debidamente suavizado y fortalecido. Este proceso también es conocido como “endurecimiento por precipitación”.

Requiere un monitoreo cuidadoso de la temperatura y de los tiempos de calentamiento y enfriado. La temperatura envejecida afecta las propiedades del metal de manera masiva; las temperaturas bajas causan una alta fortaleza y baja resistencia a la rotura (ej. más frágil que dúctil), mientras que las altas temperaturas resultan en un material más resistente de baja fortaleza (ej. más dúctil que frágil).

Un enfriamiento rápido puede proporcionar un acero resistente sin una pérdida significativa de fortaleza. El tratamiento térmico utilizado en el acero inoxidable depende del tipo y del grado de acero que se produzca. El recocido o tratamiento térmico puede desarrollar un precipitado, conocido como incrustación. Estas incrustaciones pueden ser eliminadas a través de diferentes métodos, como el decapado (baño con ácido nítrico-fluorhídrico), electrolimpieza (aplicación de corriente eléctrica, usando ácido fosfórico y un cátodo), etc.

El desincrustado del material en el proceso de fabricación se lleva a cabo en momentos distintos, dependiendo del tipo de acero que se produce. Aunque los cable y las barras de acero se han tratado de forma tradicional con laminación en caliente, forjado y extrusión, las láminas y las banda pasan por el desincrustado luego de la laminación en caliente.

Las operaciones de cortado en el proceso de fabricación son esenciales para obtener la forma y el tamaño deseado del producto final. El corte mecánico involucra el uso de guillotinas y cuchillas de acero de alta velocidad para perforar (dar forma mediante cizallamiento) y picar (realiza un aserie de huecos superpuestos). También se puede cortar con soplete, un proceso que involucra el uso de una llama generada por oxígeno, propano y polvo de hierro. El método de corte con llama de plasma usa una columna de gas ionizado para derretir y cortar el metal.

El acabado de la superficie, el paso final en la fabricación de acero inoxidable, es crítico para obtener la superficie suave y reflectiva por cual el metal es popular. Este último paso proporciona al producto la resistencia deseada a la corrosión y deja el metal listo para otros pasos específicos de fabricación industrial según se requiera. En la etapa del acabado de la superficie, el metal es sometido a tratamiento según apariencia física deseada: un acabado opaco, un acabado brillante o un acabado tipo espejo.

Fabricar los productos finales requiere dar mayor forma a través de la laminación en caliente, prensado, forjado y extrusión. Luego, se une el material con soldadura y se le da la forma deseada. El proceso de control de calidad es monitoreado a lo largo de la fabricación del acero inoxidable. Se revisa de manera constante el material para lograr propiedades mecánicas óptimas para superar el paso del tiempo. La atención constante al detalle más mínimo hace que el acero inoxidable un material aplicable universalmente.

Tipo de acero inoxidable	Aplicación
Austenítico (resistente a la corrosión)	<ul style="list-style-type: none"> ••• equipos para industria química y petroquímica ••• equipos para industria alimenticia y farmacéutica ••• construcción civil ••• vajillas y utensilios domésticos
Ferrítico (resistente a la corrosión, más barato)	<ul style="list-style-type: none"> ••• electrodomésticos (cocinas, heladeras, etc.) ••• mostradores frigoríficos ••• monedas ••• industria automovilística ••• cubiertos
Martensítico (dureza elevada)	<ul style="list-style-type: none"> ••• cuchillería ••• instrumentos quirúrgicos como bisturí y pinzas ••• cuchillos de corte ••• discos de freno

VENTAJAS	EXPLICACIÓN DETALLADA
Resistencia a la corrosión	Los aceros de baja aleación, resisten la corrosión en condiciones atmosféricas; los aceros inoxidables altamente aleados pueden resistir la corrosión en la mayoría de los medios ácidos, incluso a elevadas temperaturas.
Resistencia a la alta y baja temperatura	Algunos aceros resisten grandes variaciones térmicas y mantendrán alta resistencia a temperaturas muy altas, otros demuestran dureza excepcional a temperaturas criogénicas.
Facilidad para la fabricación	La mayoría pueden ser cortados, soldados, forjados y mecanizados con resultados satisfactorios
Resistencia mecánica	La característica de endurecimiento por trabajo en frío de algunos aceros inoxidables se usa en el diseño para reducir espesores y así, los costos. Otros pueden ser tratados térmicamente para hacer componentes de alta resistencia
Estética	Está disponible en muchas terminaciones superficiales. Se mantiene fácilmente dando por resultado una alta calidad.
Propiedades higiénicas	La facilidad de limpieza lo hace la primera opción en hospitales, cocinas, e instalaciones alimenticias y farmacéuticas
Ciclo de trabajo	Es durable, y es la opción más barata considerando el ciclo vital