

*La industria del acero es la primera de las industrias y constituye el puntal de nuestra industrialización. Sin ella siempre seremos vasallos.*

*Gral. Ing Manuel N. Savio*

---

---

**Autor: Gustavo F. Merlone (Ing. Metalúrgico, Posgrado en Siderurgia).**

## **1. FABRICACIÓN DEL ACERO**

### **1.1. METALURGIA**

Abarca desde la **tecnología** para la extracción de minerales, **metalurgia extractiva**, hasta la obtención de los metales y sus aleaciones, la fabricación de productos semielaborados e incluso los tratamientos para mejorar sus propiedades, **ingeniería metalúrgica**. La **metalurgia física** es la **ciencia** que estudia la estructura, transformación y propiedades de esos materiales.

### **1.2. SIDERURGIA**

Es la metalurgia de las **aleaciones de Fe y C** (aceros y fundiciones) comprendiendo fundamentalmente los procesos de reducción (en alto horno o reducción directa), oxidación y desoxidación (en acería).

Los **productos siderúrgicos** contienen además: **residuales** (P, S, Si, Mn, etc.) provenientes de las materias primas utilizadas en su elaboración; algunos de estos residuales se consideran **impurezas** ya que perjudican las propiedades del producto (P, S, etc.) y eventualmente **aleantes**, elementos adicionados a propósito (Cr; Ni, Mo, etc.) con la finalidad de mejorar propiedades físicas (especialmente las mecánicas) y químicas (en particular la resistencia a la corrosión). La diferencia entre elemento residual o elemento aleante radica en el valor del porcentaje en peso del elemento en cuestión, así por ejemplo según la Norma Mercosur NM-ISO 4948-1:96, el silicio por debajo de 0,50% se considera residual y el manganeso se considera residual hasta 1,80%.

La terminología empleada normalmente es la siguiente:

- a - **hierro o fierro**: metal con impurezas < 0,15 % (dentro de ellas, C # 0,05 %) (en la jerga se emplea hierro para el elemento químico puro o para un material con pureza de 99,8 a 99,9 % de Fe); comercialmente se denomina hierro hasta un contenido de C de 0,18 %.
- b - **aceros**: aleaciones Fe-C con C < 2,14 %; pueden ser comunes o bien aleados;
- c - **fundiciones**: aleaciones Fe-C con 2,14 % < C < 6,67 %; también pueden ser aleadas.

La antigua división atribuida a propiedades metalúrgicas aparentemente específicas (forjabilidad en aceros; fragilidad en fundiciones; etc.) ya no presenta una estricta diferenciación, porque se han desarrollado aleaciones de una clase que poseen algunas características propias de la otra: fundición dúctil austemperada; aceros moldeados utilizables en condiciones brutas de colada. El Fe de elevada pureza (>99 %) tiene utilización exclusivamente para ciertos estudios científicos muy especiales (difusión).

La **importancia industrial** del acero como material para construcciones mecánicas y civiles se

fundamenta básicamente en razones técnico-económicas:

- **relativamente bajo costo de elaboración:** desde la extracción del mineral (abundancia del mineral de alta ley, facilidad de reducción) hasta la producción de semielaborados y fabricación de piezas terminadas en cantidades masivas;
- **elevadas propiedades mecánicas:** resistencia (estática y dinámica), y rigidez (alto módulo elástico) con adecuada confiabilidad (duración);
- **posibilidad de modificación de propiedades (mecánicas, físicas y químicas):** mediante tratamientos térmicos, termoquímicos, termomecánicos o bien por agregado de aleantes.
- **respaldo de la experiencia en servicio:** por ser una de las aleaciones más usadas por la humanidad (desde el año 2500 A.C. en forma continua) se tiene una gran experiencia sobre los usos que se le puede dar, los problemas que puede presentar y sus posibles soluciones.

### 1.3. MINERALES DE HIERRO

El hierro es uno de los metales más abundantes (5 % de la superficie terrestre). El consumo es aproximadamente  $1.000 \times 10^6$  t/año y las reservas mundiales se estiman en  $300.000 \times 10^6$  t.

Los minerales de hierro aparecen como óxidos, carbonatos, sulfuros o silicatos; pero su explotación principal es bajo la forma de óxidos. La producción de hierro y acero es rentable con minerales que posean leyes (contenidos de óxido de hierro) superiores al 65 %, en general el mineral se vende como “**calibrado**” (seleccionado granulométricamente). Cuando las leyes son inferiores o cuando la granulometría es demasiado pequeña (menor que 10 mm) se procede a concentrar al mineral en un lugar próximo a la explotación minera, se fabrican “**pellets**” o “**pelets**” (pelotitas) con mineral de hierro pulverulento concentrado y aglomerante (bentonita). Estos pellets en verde se piroconsolidan para aumentar su resistencia y facilitar su transporte (Fig.1).

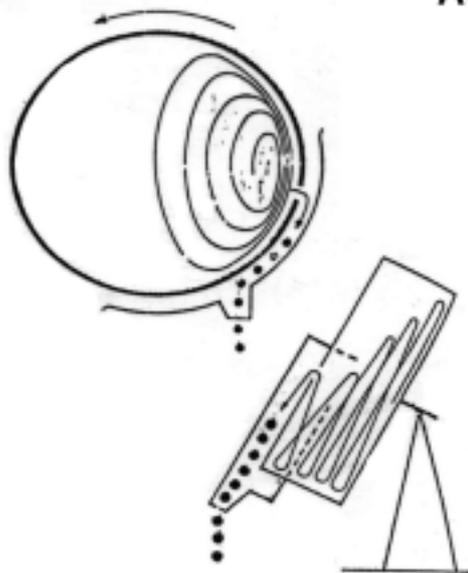
Otra forma de emplear el mineral de hierro pulverulento es bajo la forma de “**sínter**”. El sínter se fabrica en la planta siderúrgica para el aprovechamiento de los finos que se generan durante el proceso siderúrgico, ya sea durante la manipulación de los minerales de hierro, coque y fundente, como así también la cascarilla generada en los procesos de laminación en caliente. Todos estos finos se mezclan y se aglomeran mediante un proceso de sinterización (Fig.1). En la tabla 1 se presentan las principales diferencias entre los aglomerados de mineral de hierro.

| AGLOMERADO               | PELET                                 | SÍNTER   |
|--------------------------|---------------------------------------|--|
| FINOS QUE LO COMPONENTEN | Mineral de hierro + aglomerante       | Mineral de hierro + coque + fundentes + otros  |
| FORMA                    | Pelotita                              | Irregular                                      |
| PROPIEDADES              | Denso, buena resistencia al manipuleo | Poroso y frágil, baja resistencia al manipuleo |
| LUGAR DE FABRICACIÓN     | Mina                                  | Siderúrgica (próximo al alto horno)            |

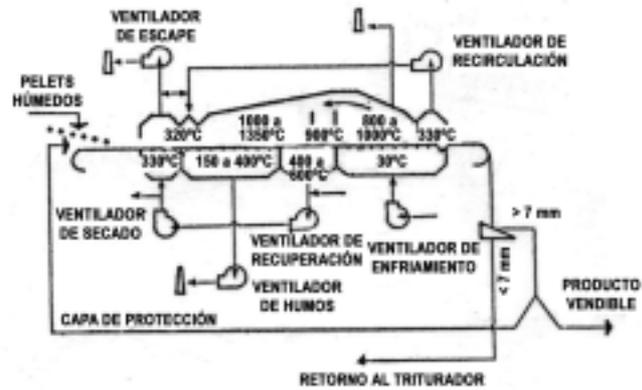
**Tabla 1. Principales diferencias entre los aglomerados de mineral de hierro.**

En la etapa de **reducción** interesan los elementos que no son óxido de hierro que están asociados al mineral (**ganga**) y en que cantidad se encuentran, ya que influyen en el proceso, como también en las operaciones metalúrgicas posteriores y comportamiento mecánico en servicio. Cuando se procesa el mineral mediante **alto horno** se debe tener en cuenta que:

## AGLOMERACIÓN

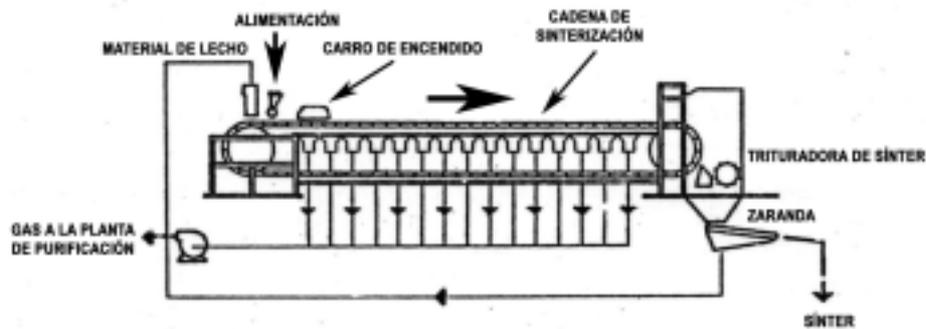


DISCO DE AGLOMERACIÓN

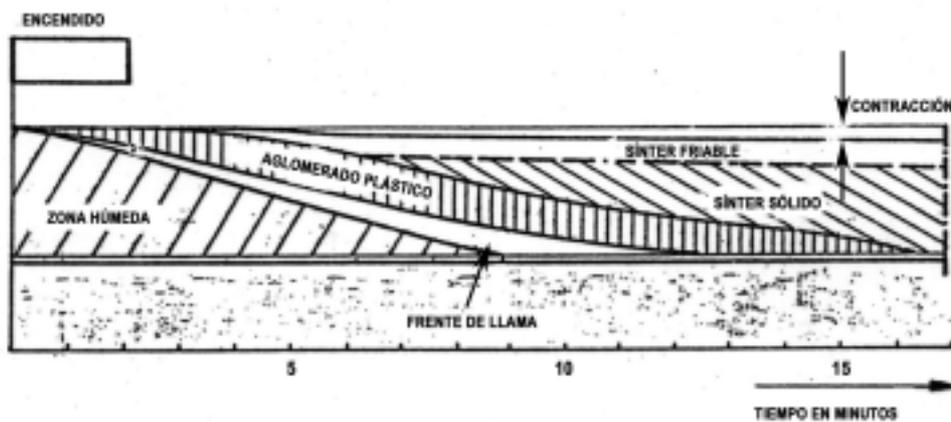


HORNO DE PARRILLA RECTA PARA PIROCONSOLIDACIÓN

## PELETIZACIÓN



ESQUEMA DE LA MÁQUINA DE SINTERIZACIÓN



## SINTERIZACIÓN

Fig.1. Procesos de fabricación de aglomerados de mineral de hierro.

- nunca pasan al arrabio: Ca, Mg, Al, Na y K;
- siempre pasan al arrabio: P, As, Cu, Ni, Co, Mn, Cr y V; parcialmente: Si, S, Ti;
- el Zn se volatiliza y el Pb decanta hasta el fondo del crisol;
- se elimina la humedad durante la primera etapa del calentamiento.

Entre los elementos más perjudiciales para el acero están el S y el P, sus contenidos deben ser lo más bajo posible. Cuando el mineral se procesa mediante **módulos de reducción directa**, se reduce el hierro pero la ganga pasa toda al siguiente proceso en acería, puesto que no hay fusión, por lo cual el mineral empleado en este caso debe ser de una mejor calidad que el destinado al alto horno.

Los mayores **productores** de mineral son: Brasil, Australia, URSS, EEUU, India, Alemania, Francia, China, Canadá, Suecia, Venezuela, Liberia y Sudáfrica. Los yacimientos ferríferos argentinos son abundantes pero de calidad muy inferior a los anteriores y se encuentran actualmente fuera de explotación:

- Zapla (Jujuy): descubierto en 1941, explotados anteriormente por Establecimientos Altos Hornos Zapla (DGFM), la ley varía entre 35 % al 43 %.
- Sierra Grande (Río Negro): descubiertos en 1945, explotados anteriormente por Hierro Patagónico S.A.M. (HIPASAM); el mineral contiene P = 1-1,30 %, pero más nocivo es el alto S = 0,3-0,7 %.
- Filo de la Cortadera (La Rioja); Tinogasta y Andalgalá (Catamarca); existen otros afloramientos menores.

#### 1.4. MÉTODOS DE FABRICACIÓN DEL ACERO

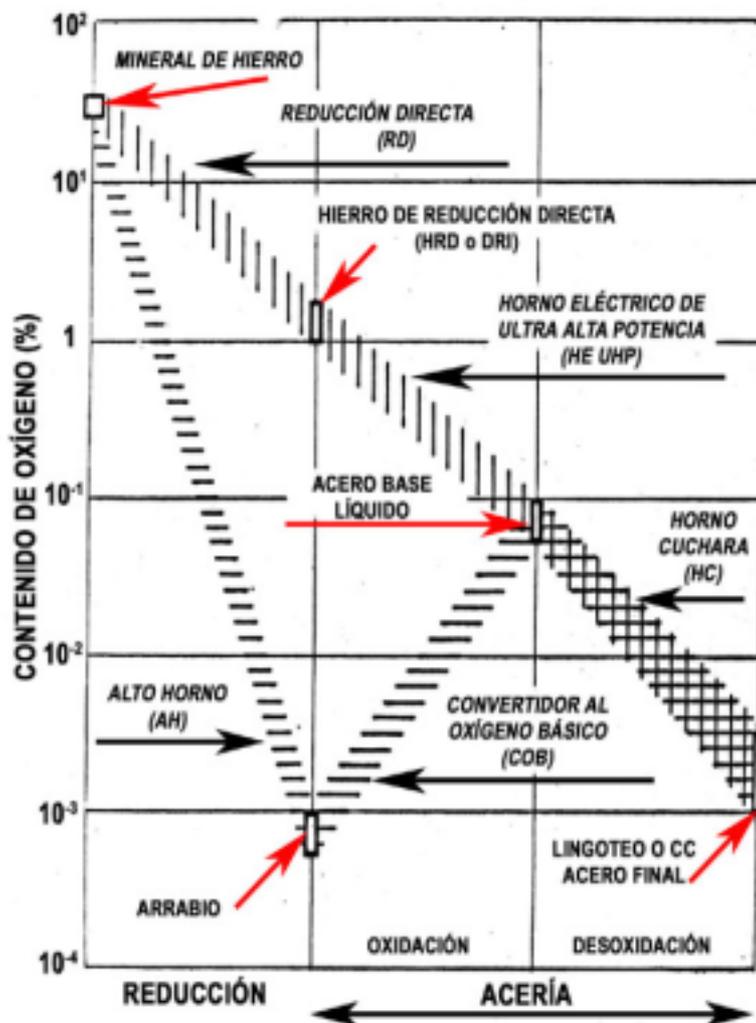


Fig.2. Evolución del contenido de oxígeno.

En general los procesos que se emplean para la fabricación de acero a partir del mineral se caracterizan por tener etapas de reducción, oxidación y desoxidación, en las que se eliminan el

oxígeno y los elementos no deseados (Fig. 2).

Actualmente los métodos empleados para producir acero son cuatro (Fig. 3):

- **Alto horno - convertidor al oxígeno:** el alto horno da, a partir de mineral, el arrabio que no siempre es homogéneo, pues depende de la composición química del mineral. Además, no resulta apto para posteriores operaciones metalúrgicas (laminación, forja, extrusión) ni para aplicaciones mecánicas (exigen propiedades de resistencia) y esto obliga a otra etapa de transformación para obtener aceros y fundiciones de moldeo. Para la fabricación de aceros debe realizarse el afino del hierro de primera fusión (**arrabio**) (pig iron) mediante un convertidor al oxígeno, consistente en: oxidación con disminución del contenido de C, disminución o eliminación de elementos nocivos, especialmente P, resulta así un “**acero base**”.
- **Reducción directa - horno eléctrico de ultra alta potencia:** mediante módulos de reducción directa se procesa mineral y se produce el **hierro de reducción directa (HRD)** (DRI) (antes llamado hierro esponja), que posteriormente se procesa en la acería mediante horno eléctrico (HE) de ultra alta potencia (UAP) (UHP), mediante el que se funde el DRI, se efectúa la oxidación con disminución del contenido de C, disminución o eliminación de elementos nocivos, especialmente P, obteniéndose un “**acero base**”.
- **Reducción-fusión - convertidor al oxígeno:** proceso llevado a cabo en un módulo compuesto por 2 reactores, se efectúa en uno la reducción parcial o total del mineral, luego pasa a otro en donde se mezcla con carbón y fundente; mediante insuflado de oxígeno se obtiene **arrabio**, que es posteriormente procesado mediante convertidor; obteniéndose un “**acero base**”.

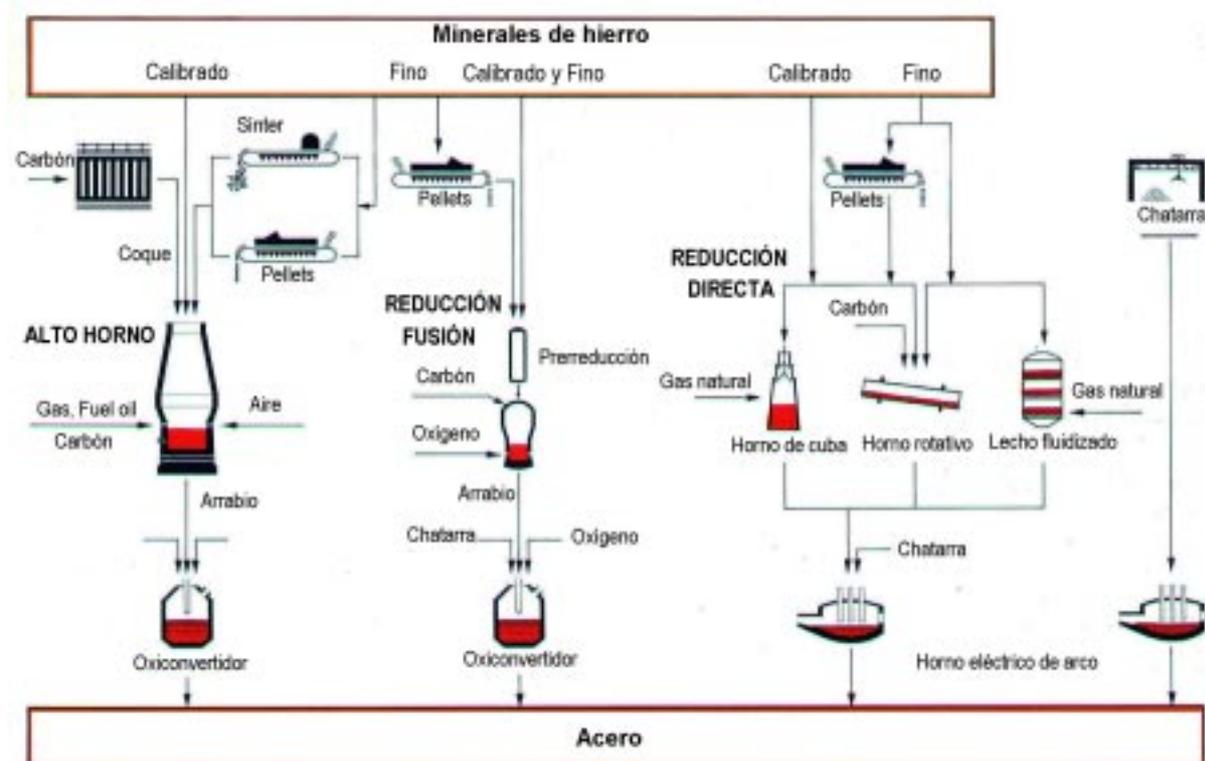


Fig. 3. Métodos modernos empleados en la fabricación de acero.

- **Horno eléctrico de ultra alta potencia:** se emplea para el procesamiento de chatarra de acero.
- **Otros procesos:** existen otros procesos industriales o de tipo experimental aplicados en menor proporción, en algunos países aún se emplean varios que prácticamente son obsoletos tales como los hornos de solera tipo **Siemens-Martin** e incluso convertidores **Thomas**.

Posteriormente sigue un proceso de **desoxidación** (reducción), que involucra la desulfuración y el agregado de aleantes para alcanzar las propiedades tecnológicas requeridas (**fabricación del acero final**), que generalmente se efectúa en el **horno cuchara**. Debe tenerse en cuenta que los métodos de fabricación actuales de aceros de calidad, exigen que el acero se fabrique mediante la aplicación de métodos de **metalurgia secundaria** tales como: horno cuchara, desgasificación en vacío, técnicas de agregado de elementos de aleación, etc..

## 1.5. PROCESOS DE REDUCCIÓN DEL MINERAL

### 1.5.1. ALTO HORNO

El **alto horno** (AH) sirve para transformar el **mineral de Fe**, ya sea como calibrado, pellet o sinter, en **hierro de primera fusión** (arrabio), que es una fundición de hierro de elevado contenido de C (de 3 a 4 %) e impurezas. Constituye la instalación más grande de cualquier planta siderúrgica; su diseño global, pese a algunas variantes y agregados, ha mantenido su geometría durante los últimos 600 años. Consta de las siguientes partes (de arriba a abajo): tragante, cuba, vientre, etalaje y crisol, entre el etalaje y el crisol se encuentran las toberas, por donde se insufla aire caliente. Está construido con planchas de acero soldadas y en la parte interna está revestido por ladrillos refractarios silico-aluminoso en la zona superior de la cuba, aluminosos en el resto de la cuba, vientre y etalaje y en el crisol de ladrillos y bloques de carbón. Tiene una gran cantidad de cajas de refrigeración (duelas) por donde circula agua, además, el etalaje y el crisol son rociados exteriormente por agua (Fig. 4). Posee una serie de equipos anexos que permite aprovechar los gases que salen del alto horno para efectuar el calentamiento de las estufas de precalentamiento del aire que se insufla por las toberas (Fig. 5).

El alto horno es realmente un gran **reactor químico** que trabaja a contracorriente: es atravesado desde arriba hacia abajo por cargas sólidas y en sentido contrario por gases calientes (de carácter reductor: CO e H<sub>2</sub>) cuya temperatura y composición se van modificando gradualmente. Es especialmente apto para eliminar el S, debido a las características de su funcionamiento (altas temperaturas y ambiente fuertemente reductor).

El combustible utilizado es el coque o coke (obtenido por el proceso de coquificación de la hulla) y cumple 4 funciones fundamentales (Fig. 6):

- **aporte térmico por combustión** (la elevación de la temperatura favorece reacciones);
- **reducción indirecta** por CO de los óxidos del mineral y **directa** mediante el C sólido;
- **permeabilidad** en la zona inferior;
- **sostén de la carga** en la zona inferior (hombre muerto).

Las dos últimas funciones son insustituibles en el alto horno (Fig. 7), en cambio las dos primeras

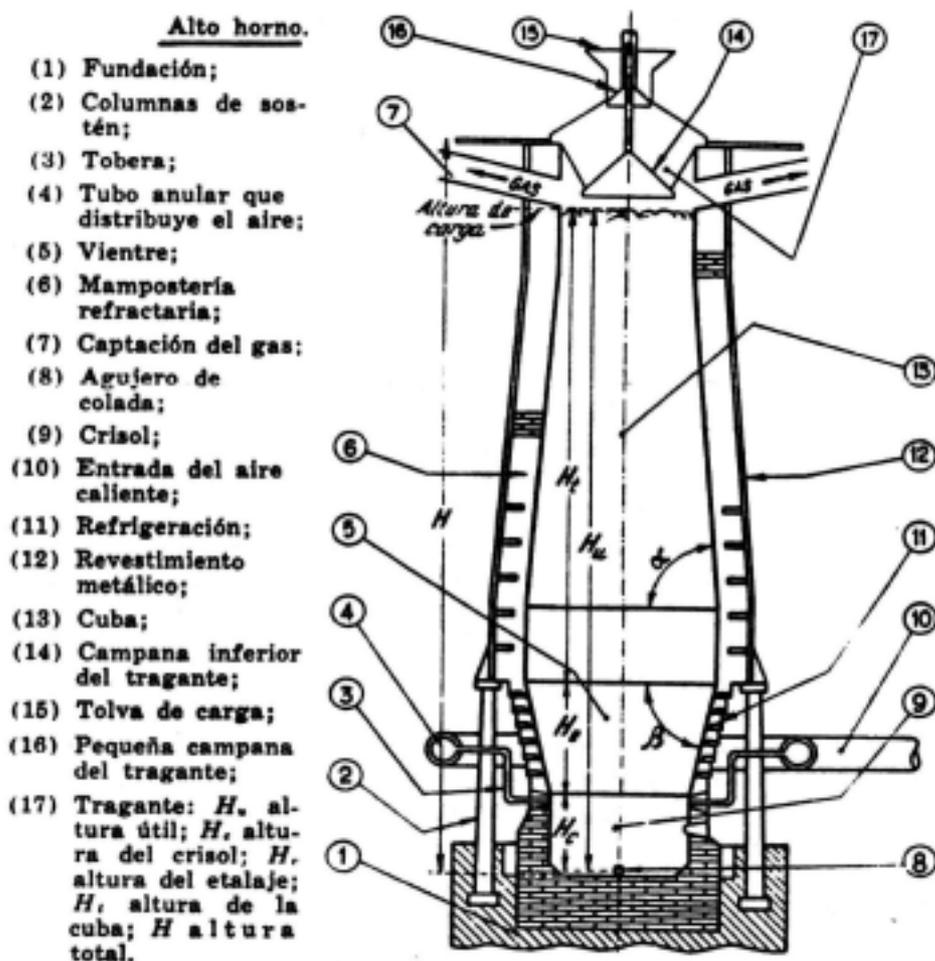


Fig. 4.  
Esquema básico de un alto horno.

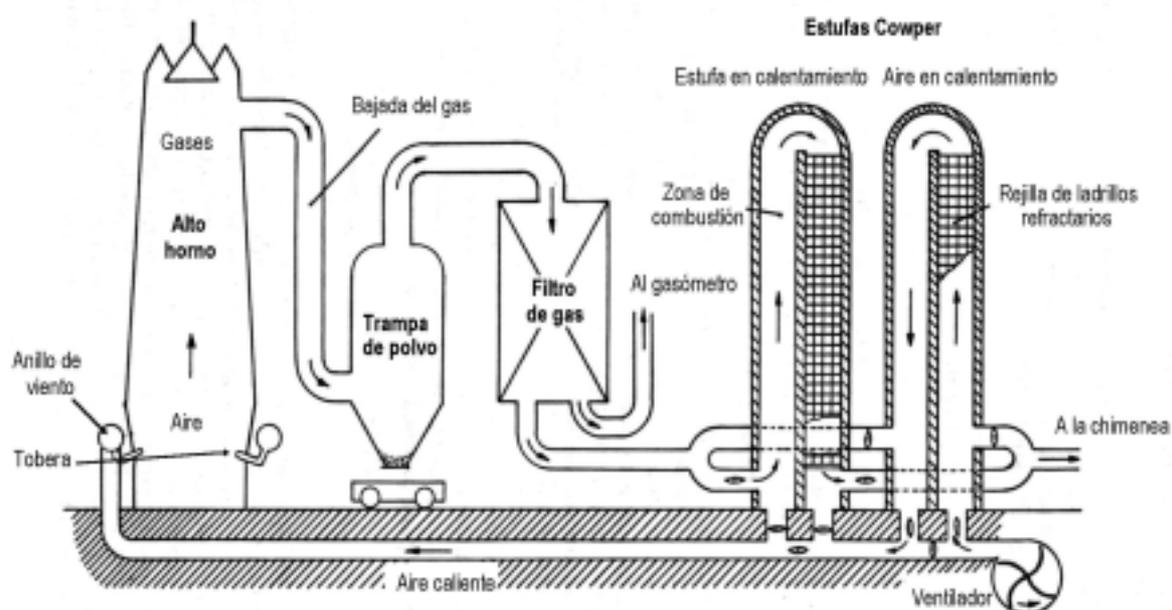


Fig. 5. Esquema del alto horno y sus anexos para la recuperación del calor de los gases del tope

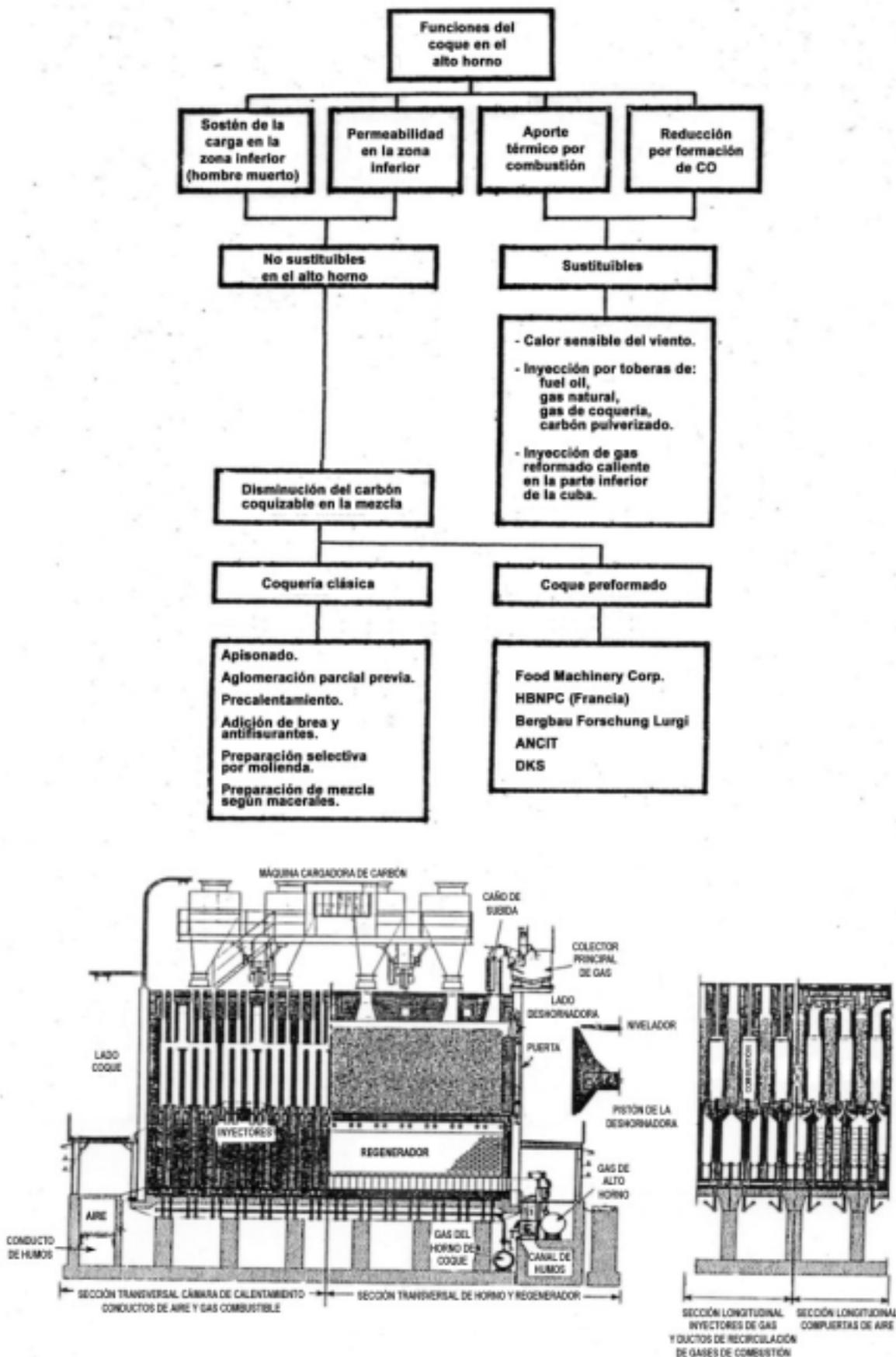
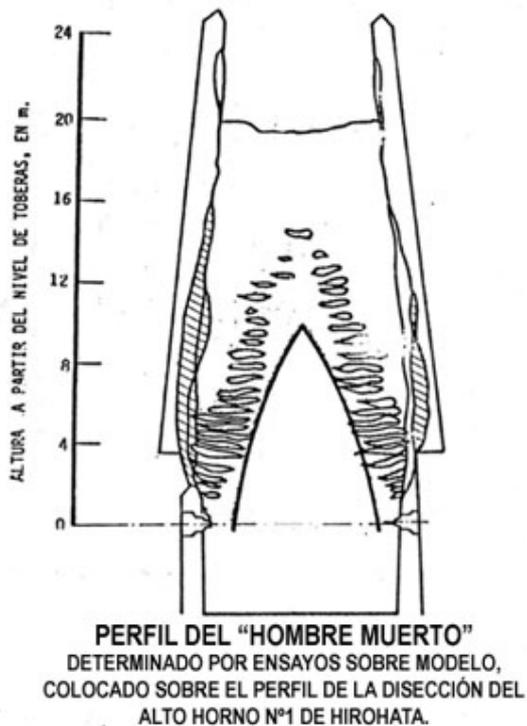
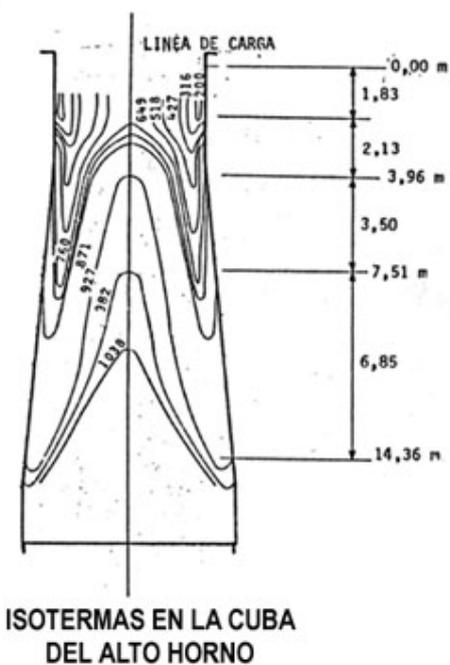
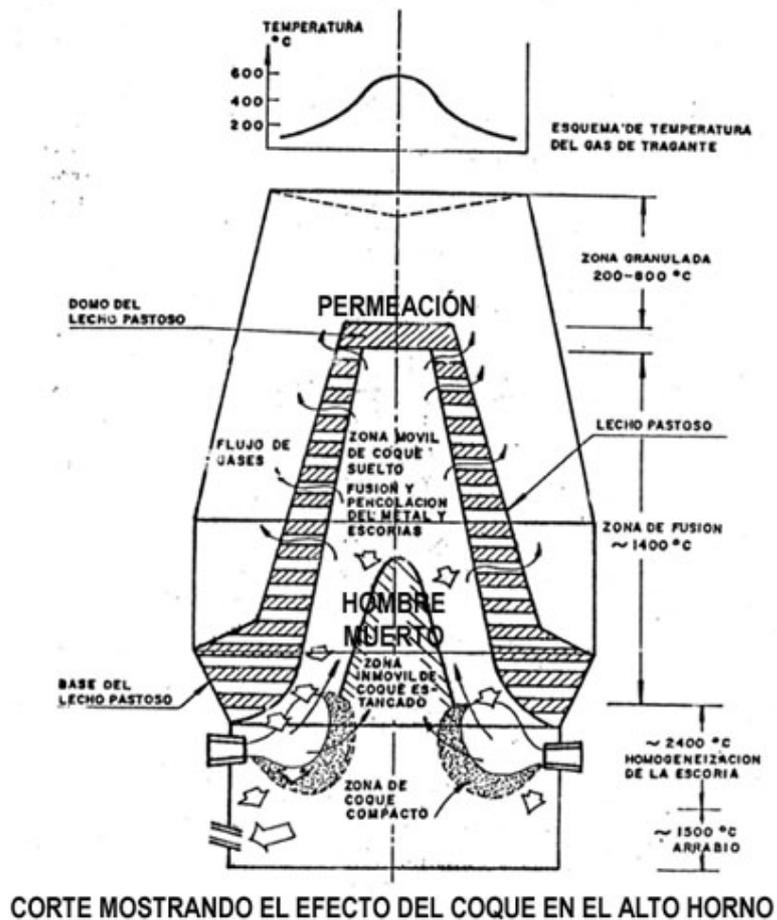


Fig. 6. Funciones del coque en el alto horno y corte de horno de coquería.



**Fig. 7. Formación de la zona de permeación y del hombre muerto por el coque.**

se pueden reemplazar mediante la inyección por toberas de fuel oil, gas natural, carbón pulverizado, aumentando el calor sensible del viento o mediante la inyección de gas reformado.

La combustión del coque se facilita mediante el insuflado de aire caliente a presión a través de toberas. El coque de origen mineral posee un elevado tenor de azufre, siendo la principal fuente del mismo en el alto horno. Debido a las condiciones de funcionamiento del alto horno (altas temperaturas, ambiente reductor y escoria básica) la mayor parte del azufre se elimina en este proceso como gas ( $\text{SO}_2$ ) y parte pasa a la escoria ( $\text{CaS}$ ).

También se utilizan fundentes que poseen dos funciones importantes: bajar el punto de fusión de los compuestos que forman la ganga del mineral y formar con los mismos la escoria. Así se eliminan más fácilmente las impurezas; se forma una escoria líquida de menor densidad que el arrabio, que al flotar por sobre el mismo puede separarse (escoriado). En el alto horno se emplea principalmente caliza ( $\text{CaCO}_3$ ).

Las materias primas y productos procesados en el alto horno pueden sintetizarse así:

1) materiales cargados:

- por el tragante: mineral, coque, fundente;
- por las toberas: aire caliente.

2) materiales descargados:

- por la piquera (agujero de colada): arrabio (hierro de primera fusión);
- por el escoriadero o bigotera: escorias líquidas;
- por la salida de gases: gas de alto horno (gas combustible) y polvo de tragante (finos de materias primas).

Para producir 1 tonelada de arrabio se requieren aproximadamente:

- |  |                                 |
|--|---------------------------------|
| • mineral (65 % Fe):                   | 914 kg                          |
| • sinter con fundente (51 % Fe):       | 684 kg                          |
| • escoria de acería (28 % Fe):         | 26 kg                           |
| • coque metalúrgico:                   | 460 kg                          |
| • humedad total en la carga:           | 66 kg                           |
| • agua (refrigeración):                | 20 m <sup>3</sup>               |
| • aire seco:                           | 1.381 kg (1068 m <sup>3</sup> ) |
| • oxígeno de enriquecimiento del aire: | 52 kg (36,4 m <sup>3</sup> )    |
| • humedad del aire:                    | 24,5 kg (30,5 m <sup>3</sup> )  |
| • alquitrán:                           | 34,5 kg (25 l)                  |

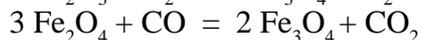
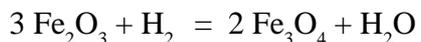
El volumen del alto horno depende de la producción de arrabio para las necesidades de la acería y debe guardar una cierta relación alto/ancho (2 a 2,5) para que funcione en optimas condiciones. La resistencia mecánica del mineral y del coque empleados es de suma importancia, ya que permiten columnas de carga más altas con una menor resistencia al paso del aire (necesario para activar la combustión y completar las reacciones).

Las reacciones en un alto horno son muy complejas y suceden en distintas zonas, con algunos

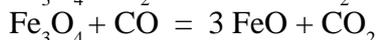
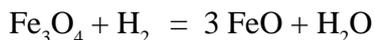
solapamientos entre ellas (Fig. 8.):

a- hasta alcanzar los 1000 °C (en la cuba) (*reducción indirecta*)

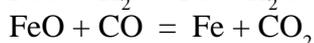
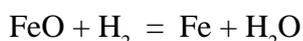
- reducción de la hematita:



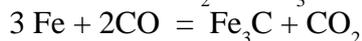
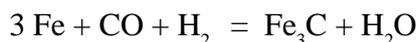
- reducción de la magnetita:



- reducción de la wüstita:

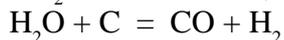
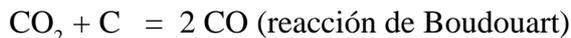


- carburación del hierro:

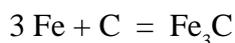
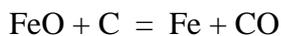


b- desde los 1000 °C hasta los 1300 °C (en el etalaje) (*reducción directa*)

- generación de los gases reductores:



- reducción de la wüstita y carburación del hierro:



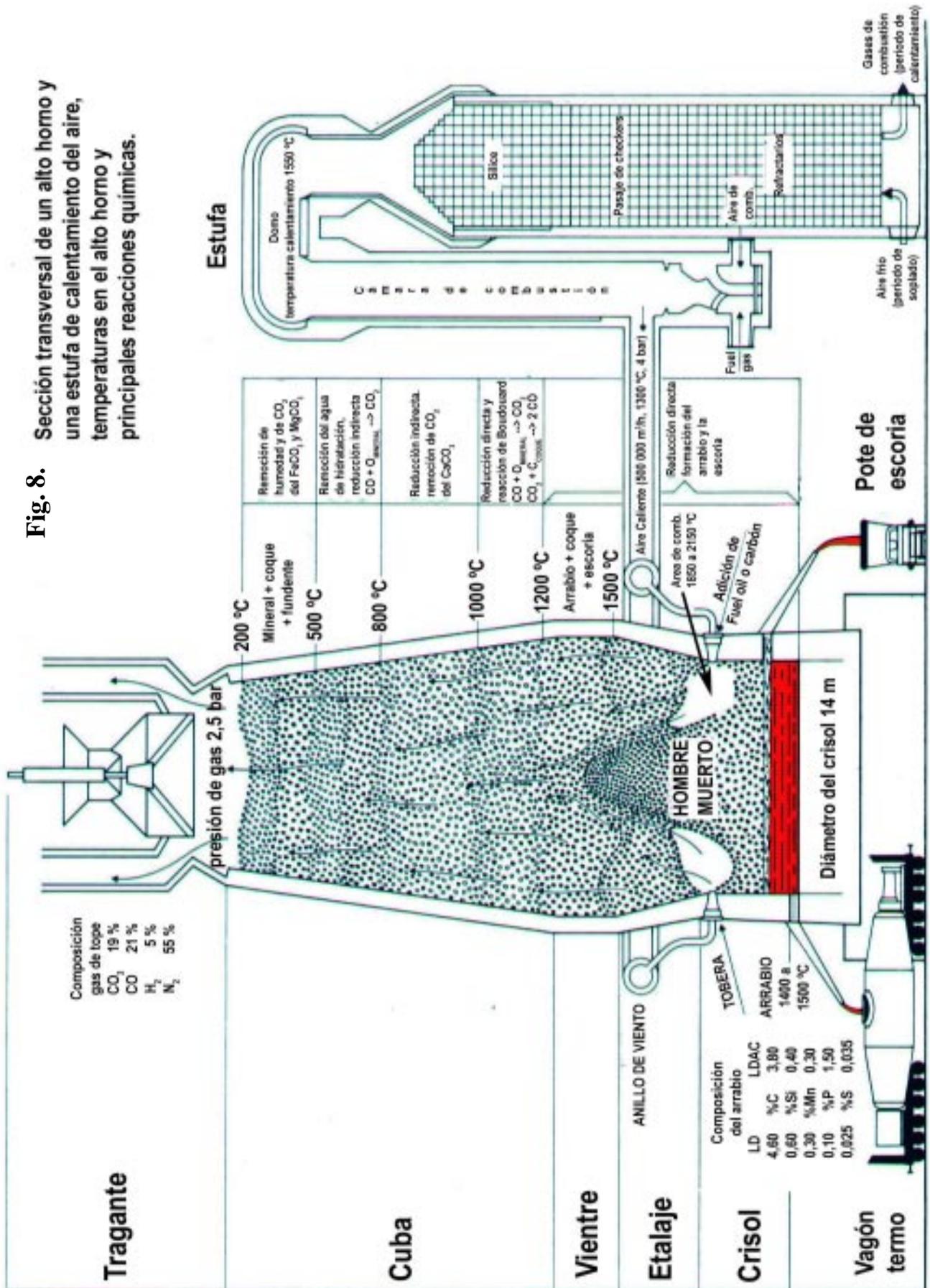
Una vez obtenido el arrabio líquido, se cuela generalmente en **vagones-termo** (torpedos) que lo trasladan hasta la acería.

En algunos lugares se emplean **hornos eléctricos** especiales para la fabricación de arrabio.

### 1.5.2. REDUCCIÓN DIRECTA

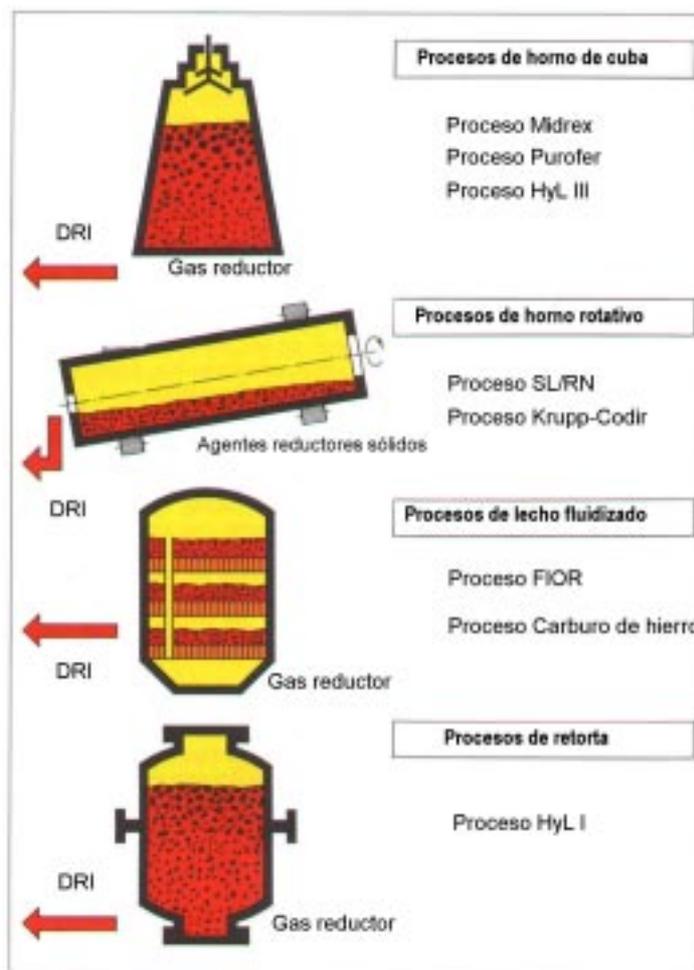
El proceso de **reducción directa** se desarrolló a partir de los años 70, con el auge de las llamadas **miniplantas integradas**. Permitió el desarrollo de empresas que no deseaban efectuar una gran inversión, como la construcción de un alto horno, porque no requerían una gran producción de acero. En un principio basaron la elaboración del acero en el proceso de fusión de chatarra de acero en horno eléctrico, pero el precio de ésta es muy variable y aún más su calidad

**Fig. 8.** Sección transversal de un alto horno y una estufa de calentamiento del aire, temperaturas en el alto horno y principales reacciones químicas.



(siendo difícil efectuar muestreos), lo que conducía a un acero caro y de mala calidad (por la elevada cantidad de elementos perjudiciales, tales como: estaño, antimonio, arsénico, etc.). Por otro lado el empleo de **gas natural** en la mayoría de los procesos de reducción directa, evita el costo originado en la construcción de una coquería y la importación de carbones coquificables de empleo metalúrgico, que son escasos y caros.

En el módulo de reducción directa (RD), se efectúa la reducción del mineral de hierro (calibrado o pellet), sin llegar a fundirlo (la temperatura de proceso es de aproximadamente 900 °C), mediante el empleo de gases reductores ( $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$ ), que provienen de la descomposición catalítica del gas natural a 1100 °C aproximadamente. En el módulo RD se desarrollan los procesos que tienen lugar en la caba del alto horno, es decir la reducción indirecta. Antes de producirse la descarga, el mineral se somete a un enfriamiento mediante un gas inerte (generalmente  $\text{N}_2$ ) para evitar la reoxidación, mediante cintas transportadoras se lleva a un silo que sirve de pulmón entre la etapa de reducción y la acería.



**Fig. 9.** Principales procesos de reducción directa.

Actualmente los módulos de reducción directa que se emplean con éxito son (Fig. 9):

- hornos de caba: procesos Midrex (Fig. 10), Purofer y HyL III;
- hornos rotativos: procesos SL-RN y Krupp-Codir;
- hornos retorta: proceso HyL I;
- hornos de lecho fluidizado: proceso FIOR.

### 1.5.3. REDUCCIÓN FUSIÓN

En la década de los 80 se desarrollaron métodos alternativos para la obtención de arrabio líquido a partir de mineral calibrado o pellets y de carbón mineral sin coquificar. Se emplean 2

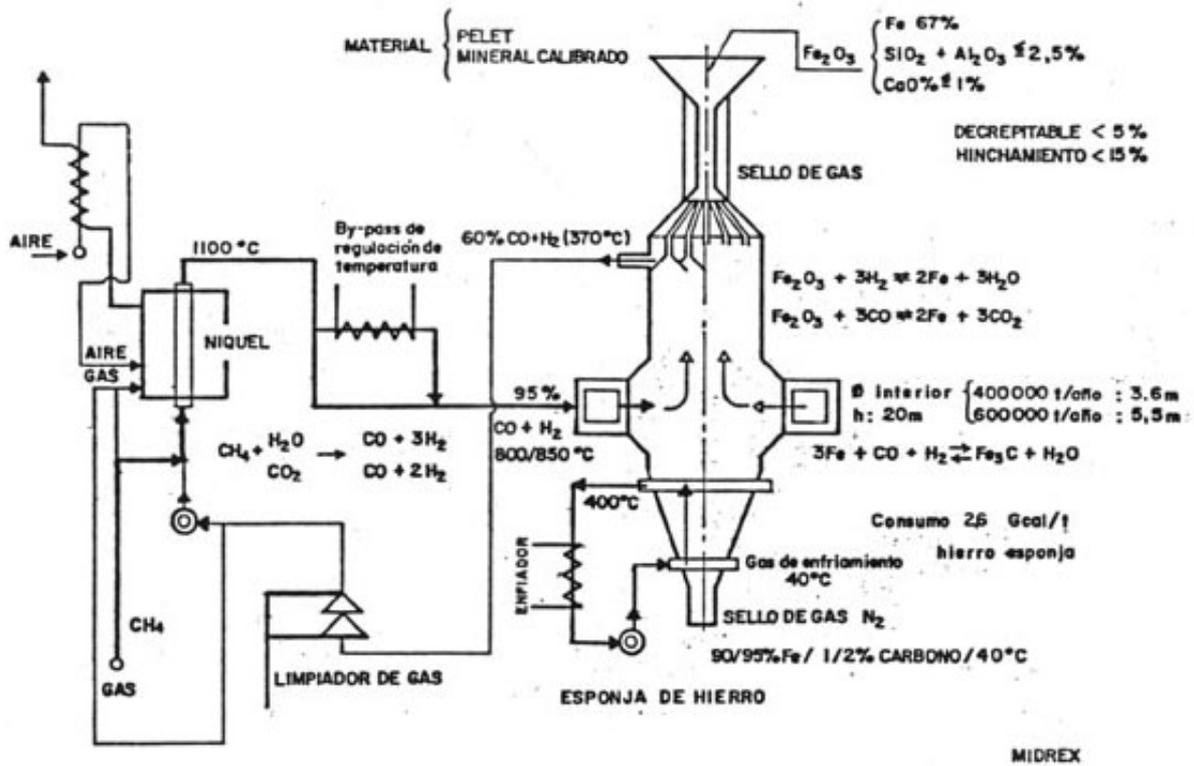
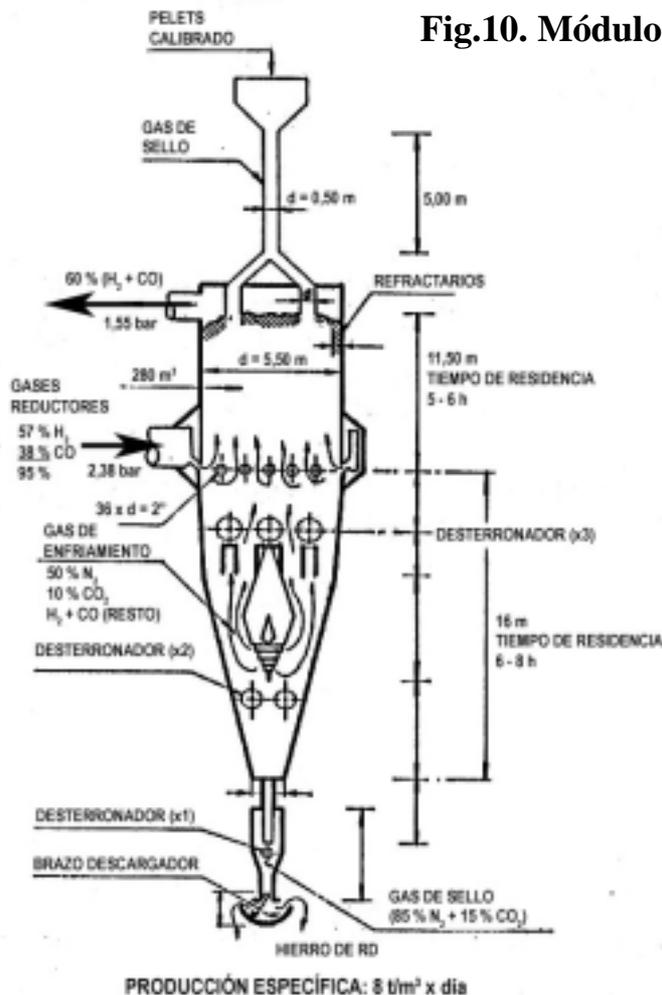
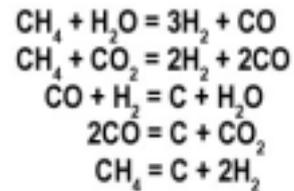


Fig.10. Módulo de reducción directa MIDREX.

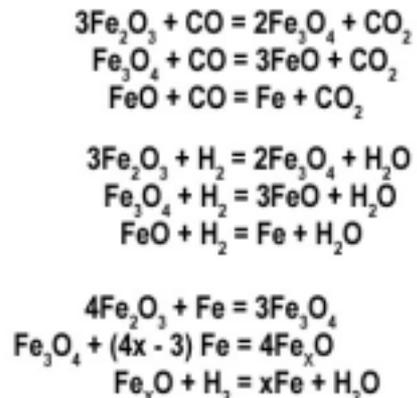


### PRINCIPALES REACCIONES EN REDUCCIÓN DIRECTA

#### REFORMA CATALÍTICA



#### REACCIONES DE REDUCCIÓN



reactores: uno para el precalentamiento y la reducción gaseosa; otro para la fusión del mineral prerreducido junto con carbón y fundente. El reactor para fusión es también un gasificador, produce el gas que se emplea en el primer reactor para la reducción parcial o completa. De los métodos de **reducción fusión** o **fusión de reducido** (smelting reduction) desarrollados se destaca el proceso COREX, del cual hay varios módulos en producción (Fig. 11).

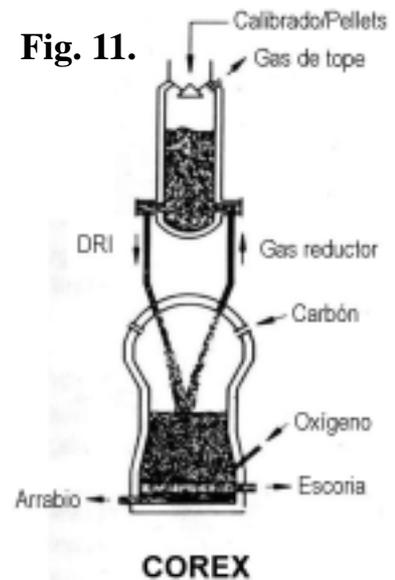
## 1.6. PROCESOS DE ACERACIÓN

### 1.6.1. CONVERTIDOR AL OXÍGENO BÁSICO

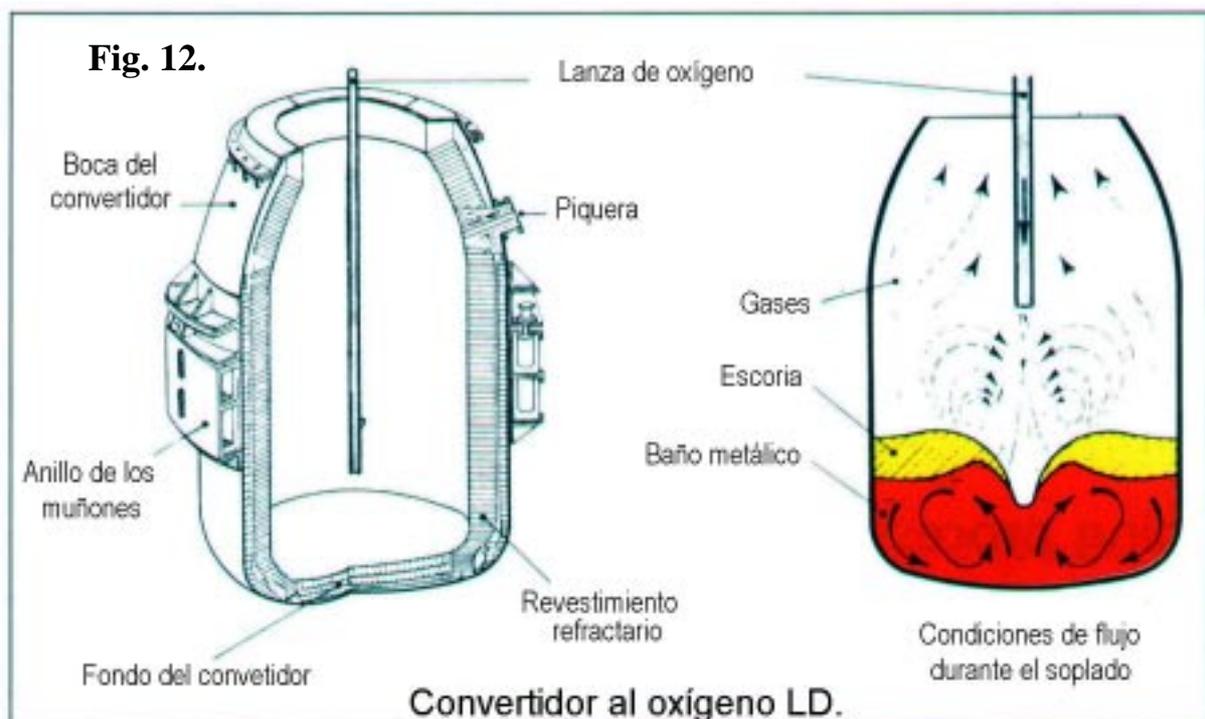
Es el procedimiento más importante en la segunda mitad del siglo XX. El primero fue desarrollado en Austria, conociéndose como **convertidor LD**, por efectuarse su desarrollo en las localidades de Linz (L) y Donawitz (D) en 1950. Se caracteriza porque emplea revestimiento básico y se inyecta oxígeno puro a velocidad elevada sobre la superficie del baño líquido. Permite obtener aceros con muy bajo contenido de nitrógeno (0,0020 a 0,0050 %) aptos para fabricar chapas de gran deformabilidad, como las usadas por la industria automotriz. El oxígeno se sopla mediante una lanza que entra por la boca del convertidor (Fig. 12 y 13).

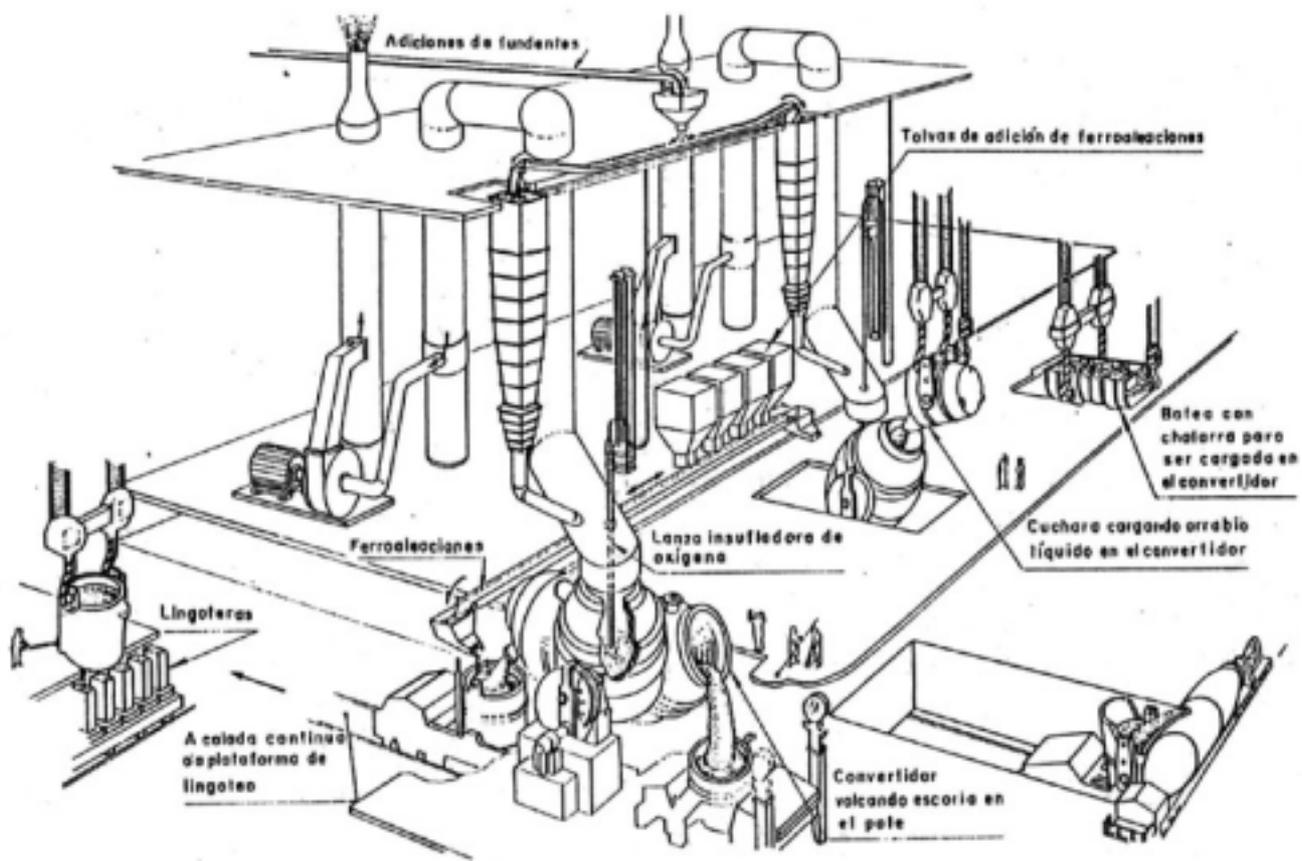
Actualmente existen convertidores al oxígeno en los que el soplado se efectúa por (Fig. 14):

- el tope o boca, mediante una lanza (procesos LD y LD/AC);
- el fondo mediante toberas especiales se inyecta oxígeno e hidrocarburos (proceso



Proceso COREX de obtención de hierro líquido por reducción-fusión.

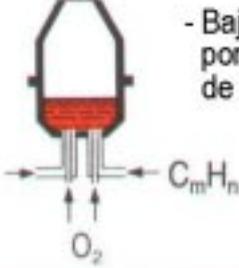
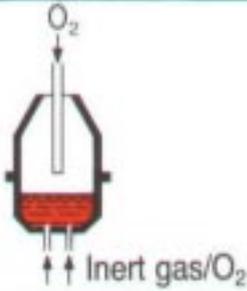




Obtención del acero en convertidor LD



Fig. 13. Acería convertidor al oxígeno LD y proceso de afino en el mismo.

| Procesos de soplado por el tope   |   | Procesos de soplado por el fondo  |   |
|---|---|---|---|
| <b>Desventajas:</b><br>- sobreoxidación<br>- agitación del baño reducida<br>- reducida reacción metal/escoria   |  | <b>Ventajas:</b><br>- flexibilidad<br>- formación de escoria  | <b>Desventajas:</b><br>- Bajo porcentaje de chatarra                                |
|   |   | <b>Ventajas:</b><br>- reducida sobreoxidación<br>- buena agitación del baño<br>- buena reacción metal/escoria |  |
| Procesos de soplado combinado   |   |   |   |
| <b>Ventajas:</b><br>- reducida sobreoxidación<br>- buena agitación del baño<br>- buena reacción metal/escoria<br>- buena formación de escoria<br>- flexibilidad |   |                           |   |

**Fig. 14.** Diferentes procesos de oxiconvertidores.

- Q-BOP) u oxígeno y cal (proceso OBM);  
 • métodos combinados de soplado (por el tope y por el fondo) por el tope oxígeno y por el fondo oxígeno y cal (K-OBM) u oxígeno y cal-carbón (KMS).

La operación “**tap to tap**” (de colada a colada) dura aproximadamente 45 minutos. El convertidor es basculante, la piqueta está ubicada de tal forma que al volcarlo puede colarse el acero líquido sin que se mezcle con la escoria que flota sobre el acero, después se evacua la escoria separadamente. El ambiente oxidante y la escoria básica favorecen la eliminación de P.

### 1.6.2. HORNOS ELÉCTRICOS DE ULTRA ALTA POTENCIA

Hacia fines del siglo XIX se construyeron los primeros hornos eléctricos para la fabricación de aceros. Poseen las siguientes ventajas: menores costos de instalaciones, menor costo de operación que los hornos de solera Siemens-Martin, rendimiento superior a los otros procesos (por la cantidad de chatarra adicionada), ocupa menos espacio que un horno de solera Siemens-Martin, manejo más simple y una perfecta regulación del proceso de fusión (automatizado y computarizado), temperatura elevada y ambiente oxidante que favorece principalmente la eliminación de P.

Con el desarrollo de los **hornos eléctricos (HE) de ultra alta potencia (UAP)**, se consigue un mejor aprovechamiento de la energía eléctrica, haciendo que el horno eléctrico ya no sea el lugar donde se fabrica el acero, sino que permite su empleo como equipo para fundir el hierro de reducción directa y la chatarra, elaborando un “acero base”, en un tiempo reducido (aproximadamente 45 a 60 minutos) (Fig. 15).

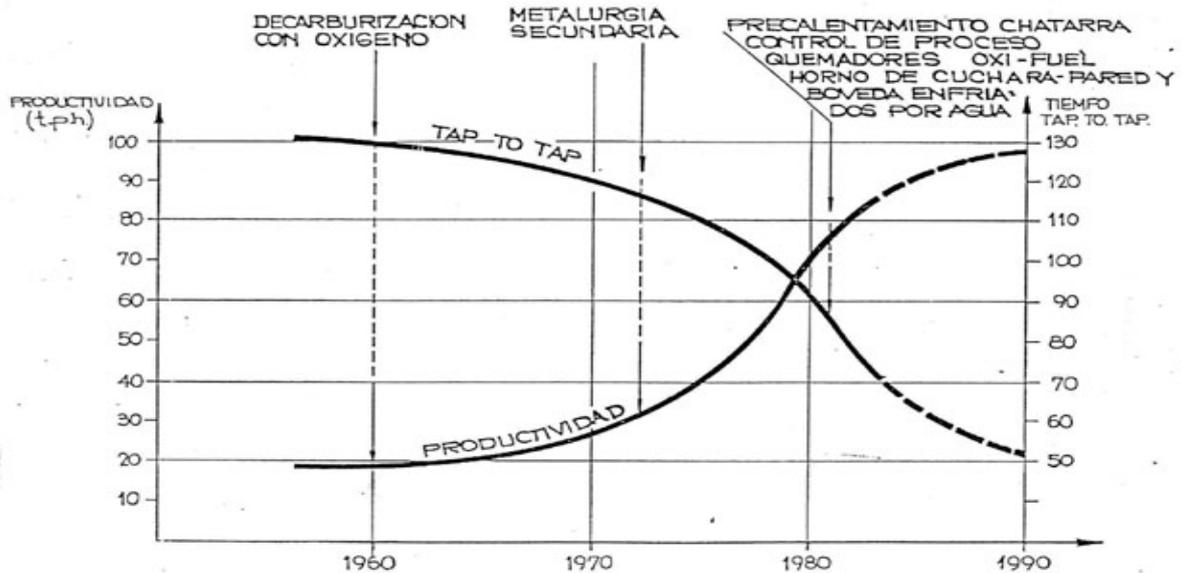


Fig. 15. Evolución de la productividad del horno eléctrico.

El empleo de UAP hace que el revestimiento del HE (de tipo básico), sufra un gran desgaste, lo que ha llevado al desarrollo de nuevos métodos de fusión tales como el de la **escoria espumosa** (foamy slag), donde mediante la inyección de carbón pulverulento y oxígeno a presión, se forma CO que al interactuar con una escoria densa produce un efecto de formación de espuma que se hincha cubriendo el lugar donde se produce la fusión, protegiendo de esta forma los refractarios.

También ha cambiado la forma y la estructura del horno eléctrico, ya que en aquellos lugares que no están expuestos a la acción del metal fundido, el refractario ha sido reemplazado por **paneles refrigerados por agua**, al igual que la bóveda, lo que permite que los hornos sean mucho más livianos. Además, se ha introducido la **colada excéntrica por el fondo** (EBT), lo que llevó a modificar en algunos diseños su tradicional forma cilíndrica, permitiendo el colado del acero libre de escoria (Fig. 16).

El **insuflado de oxígeno**, ya sea mediante una lanza desde la bóveda o desde la puerta o incluso mediante toberas desde el fondo, permite una rápida oxidación de los elementos indeseables (además

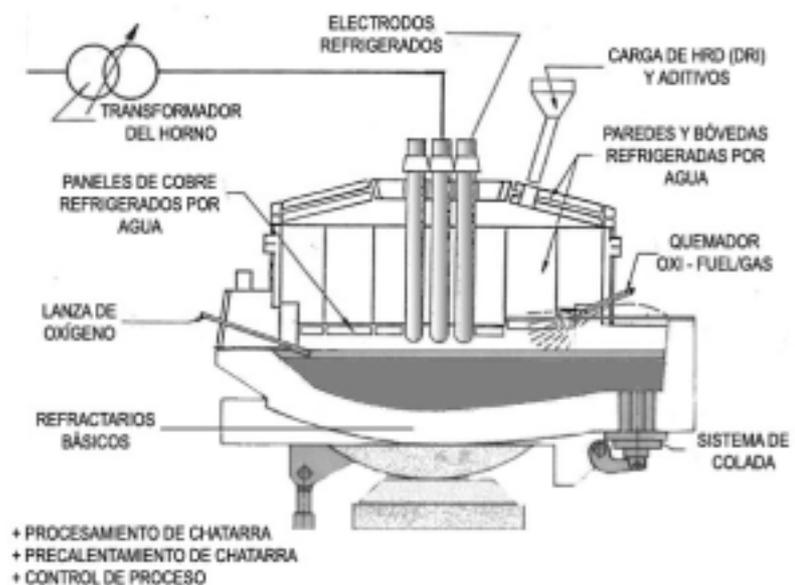


Fig. 16. Desarrollo tecnológico del horno eléctrico

de la formación de la escoria espumosa) y eleva la temperatura del proceso, reduce el consumo de energía eléctrica, acorta el tiempo de la operación pero aumenta el consumo de electrodos.

En algunos casos se insuflan gases inertes ( $N_2$ ,  $Ar_2$ ) por el fondo para producir la **agitación del baño** y permitir una mayor homogeneización del mismo.

Al igual que en el convertidor es importante la eliminación del P, por ser un proceso oxidante con escoria básica (Fig. 17).

### 1.6.3. METALURGIA DE CUCHARA

Como ya se ha mencionado en el convertidor y en el horno eléctrico se obtiene un **“acero base”**, generalmente un acero al carbono o de baja aleación. Este se cuele en una cuchara que pasa a la estación de **horno cuchara** (Fig. 18) en donde mediante una serie de operaciones se obtiene el **“acero final”**. Esta etapa de metalurgia secundaria que se efectúa en un horno cuchara (LF), se conoce como **metalurgia de cuchara** y comprende:

- inyección de alambres (Al),
- desoxidación con Al y Si,
- desulfuración con Mn,
- tratamiento de inclusiones con Ca,
- coalescencia y flotación de inclusiones,
- aleación y ajuste de composición química,
- desgasificación por burbujeo de gas inerte (Ar),
- homogeneización química y térmica,
- ajuste de temperatura final.

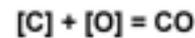
## PRINCIPALES REACCIONES EN ACERÍA

### EN EL HORNO ELÉCTRICO (HEA o EAF)

#### Formación de la escoria



#### Decarburización

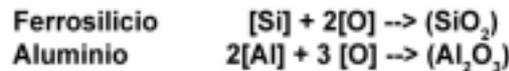


#### Defosforización



### EN EL HORNO CUCHARA (HC o LF)

#### Desoxidación



#### Desulfuración

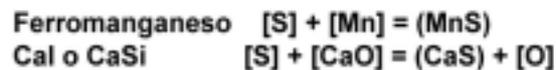


Fig. 17.

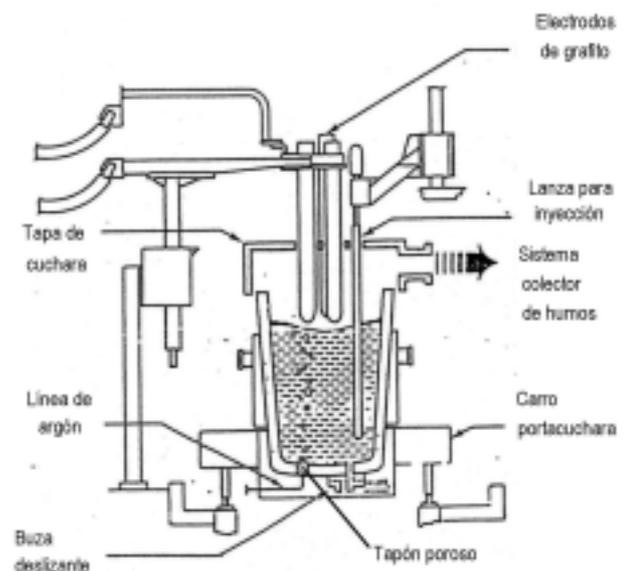
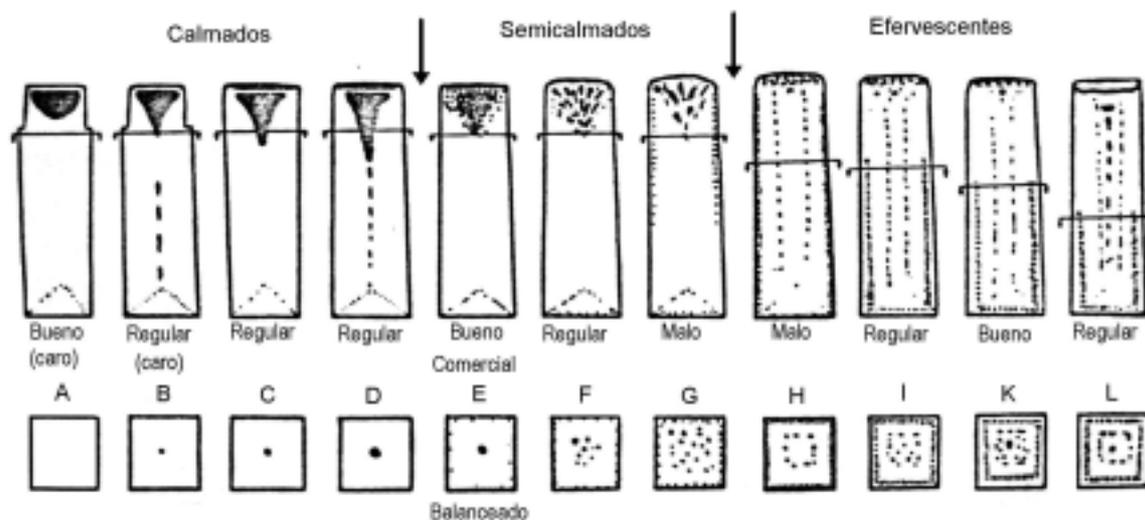


Fig. 18. Esquema de un horno cuchara.

Eventualmente, en función de los requerimientos finales del acero, se puede efectuar una etapa de tratamiento de vacío para la eliminación de gases.

## 1.7. TIPOS DE ACEROS

Existen en principio tres tipos de aceros distintos en función del contenido de oxígeno: eferves-



**Fig. 19.** Comparación de lingotes de distintos tipos de aceros.

centes, semicalmados y calmados, tal como puede verse en la figura 19.

### 1.7.1. ACEROS EFERVESCENTES

Son aceros (en general  $C < 0,15\%$ ) en cuya solidificación existe una fuerte efervescencia y un gran desprendimiento de chispas y gases. No se les adiciona Si como desoxidante, efectuándose sólo una desoxidación incompleta por agregado de Mn; a veces también una pequeña cantidad de Al.

El **lingote** no presenta **rechupe** (Fig.19) porque la contracción del acero es compensada por las **sopladuras** del interior, que suelen contener CO. Se cuida que no estén cercanas a la superficie, se requiere un espesor de 10 a 25 mm sin porosidades, para evitar la penetración de oxígeno atmosférico a través de pequeñas fisuras que podrían oxidar las paredes de las cavidades e impedir su soldadura en el posterior trabajado mecánico (laminación o forja). Estos aceros se emplean para fabricar **chapa para embutido** profundo por que poseen buena calidad superficial Además son los de menor costo de fabricación. Actualmente, debido al empleo difundido de la colada continua, estos aceros han dejado de tener un uso masivo, esto es por el hecho que no se pueden colar en colada continua por los problemas que generan las sopladuras.

La **segregación** en los aceros efervescentes es también importante, especialmente el C cuyo contenido es muy bajo en la piel o capa superficial y también en la cabeza (donde también se encuentra la mayor parte de las impurezas). Los lingotes presentan una fuerte segregación cen-

tral de S, que es reconocible rápidamente mediante un ensayo Baumann (impresión sobre papel fotográfico de una sección pulida y atacada con ácido sulfúrico al 5 % durante 10 minutos).

### 1.7.2. ACEROS CALMADOS

Son aceros que al solidificarse no desprenden gases, una enérgica desoxidación impide la formación de CO. Todos los **aceros de alta calidad** se fabrican calmados. Al final del proceso son **desoxidados** casi completamente con Si y Al agregados al baño metálico en la cuchara; así se impide la efervescencia y la aparición de porosidad.

La composición de los aceros calmados no es uniforme en todas las zonas del lingote: las segregaciones son el resultado de una solidificación diferencial característica de todas las soluciones. Las zonas de segregación positiva tienen composiciones superiores a las medias respecto del elemento analizado, mientras que las de segregación negativa son inferiores (Fig. 20).

Para compensar el gran rechupe que se produce en estos aceros, en la parte superior de la lingotera poseen una cabeza denominada “**mazarota**” (Fig. 21), donde se produce el rechupe; esa parte es de baja calidad, por la gran segregación de impurezas; luego es cortada y usada como chatarra. La masa del lingote de acero queda sin sopladuras y con menos P y S que la mazarota.

## 1.8. COLADO DEL ACERO

### 1.8.1. COLADO EN LINGOTERAS

Cuando el acero ha sido colado en la lingotera, que puede tener distintas características (Fig. 22), comienza a solidificarse; primero lo hace el material periférico en contacto con las paredes frías y luego el fenómeno progresa paralelamente a ellas, hacia el interior: Gradual-

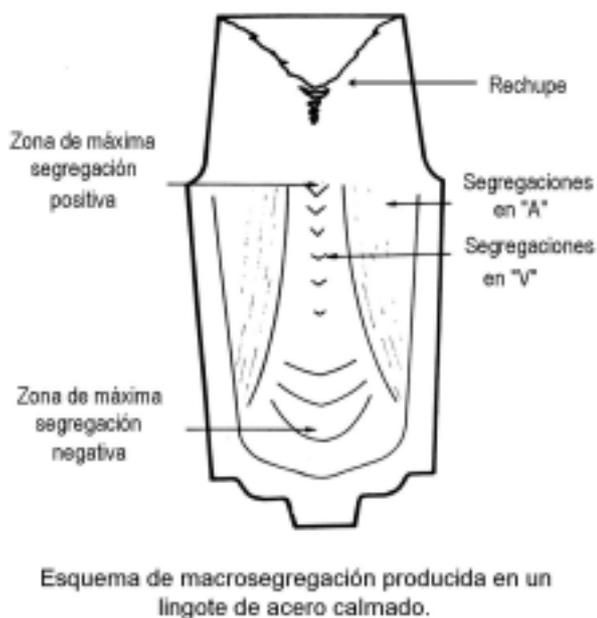


Fig. 20.

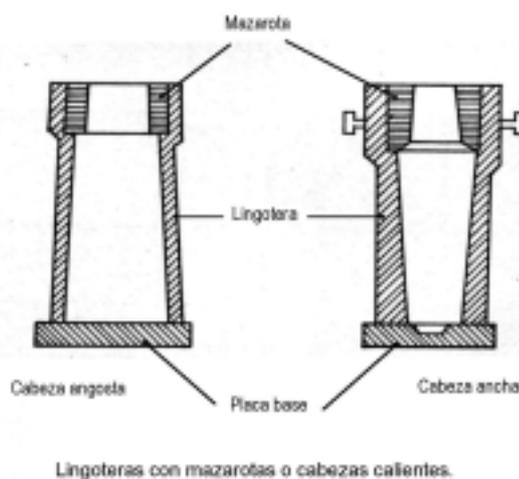


Fig. 21.

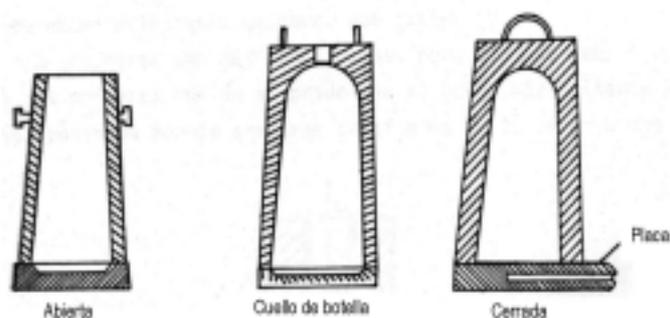


Fig. 22. Diferentes tipos de lingoteras.

mente, el líquido va solidificando hacia la región central y se produce por contracción una cavidad denominada **rechupe**, en la parte superior del lingote.

Durante el enfriamiento, el acero se contrae continuamente (8 % de contracción volumétrica) y se distinguen:

- 1) contracción por cambio de estado líquido-sólido (aproximadamente 6 %),
- 2) contracción en estado sólido (aproximadamente 2 %).

La inclinación lateral de la lingotera limita la altura del rechupe; la geometría del lingote tiende a evitar rechupes secundarios, segregaciones importantes, debilidades en el pie o cabeza y otros defectos (Fig. 23).

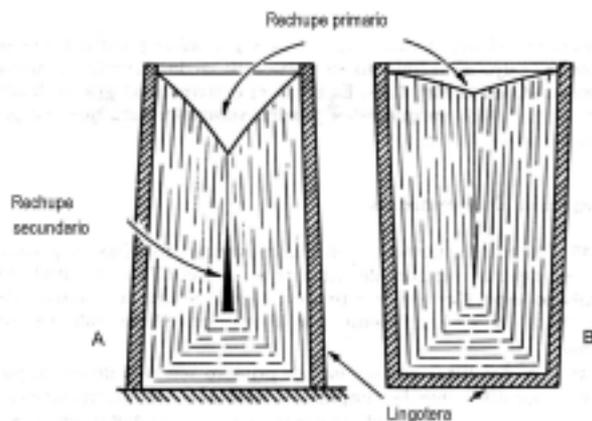
El corte transversal o longitudinal de un lingote de acero, pulido y atacado con ácido nítrico al 5 %, muestra la variación de la estructura cristalina resultante de la solidificación, que es de importancia para las posteriores operaciones metalúrgicas (forja y laminación), como también en las propiedades mecánicas de las piezas terminadas.

Las principales zonas son (Fig. 24):

- a) **Zona acoquillada:** pequeños cristales equiaxiales por enfriamiento brusco, gran cantidad de dendritas equiaxiales;
- b) **Zona basáltica o columnar:** estructura columnar con dendritas alargadas y perpendiculares a las paredes;
- c) **Zona de transición:** presencia de dendritas más cortas, en diferentes direcciones y granos equiaxiales;
- d) **Zona equiaxial:** estructura de granos equiaxiales que crecieron en el seno del metal líquido, nuclearon heterogéneamente sobre partículas sólidas que se encontraban en el líquido.

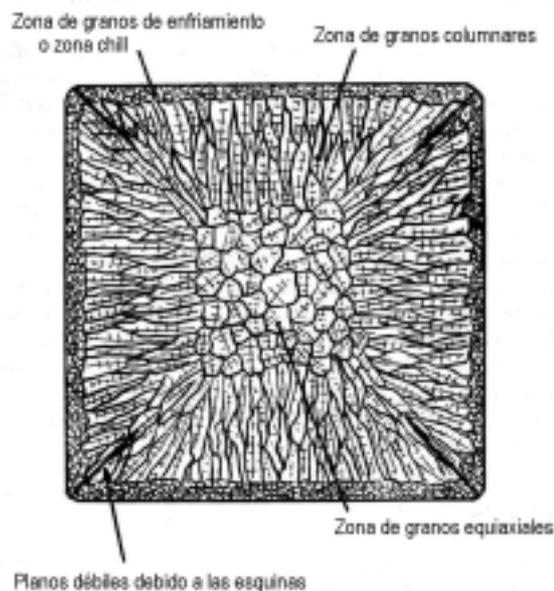
Los **defectos** que pueden aparecer en un lingote de acero son:

- **Rechupe:** es la cavidad superior que se crea al solidificar la pieza moldeada.



Influencia de la forma de la lingotera sobre la formación del rechupe.

**Fig. 23.**



Estructura cristalina que presenta un lingote.

**Fig. 24.**

- **Segregación:** es la distribución irregular de los componentes de la aleación en diferentes lugares del lingote. Hay 2 tipos de segregación: la segregación intercrystalina o microsegregación y la segregación principal o macrosegregación. La **microsegregación** es la diferencia de composición química dentro de cada grano; por medio de un tratamiento térmico de homogeneización se puede igualar considerablemente la composición de los cristales. La **macrosegregación** resulta de las diferencias de composición química entre diversas zonas del lingote. Debido a la baja difusividad de los elementos sustitucionales (Si, Mn, Cr, Ni, Mo, etc.), esta segregación permanece como una característica estructural de los aceros y sus efectos sólo son disminuidos mediante tratamientos termomecánicos (como forja y laminación).
- **Sopladuras:** son pequeñas cavidades situadas en distintos lugares, del lingote. Son producidas por gases, principalmente oxígeno en un acero mal desoxidado.
- **Grietas:** son fisuras que se producen por impedir la libre contracción del metal durante el proceso de enfriamiento en estado sólido.
- **Inclusiones:** son compuestos no metálicos, no solubles en el acero, constituidos por óxidos, silicatos, alúmina, sulfuros o combinaciones de los anteriores.

### 1.8.2. COLADA CONTINUA

Es un proceso que comenzó a desarrollarse hacia 1950; permite obtener directamente barras, palanquillas o planchones con distintos espesores, partiendo del acero fundido, en longitud teóricamente ilimitada.

El acero fundido se vierte desde la cuchara a una **artesa** o **distribuidor**; de esta pasa continuamente a la

**lingotera**, de cobre con enérgico sistema de refrigeración y sin fondo, donde adopta su sección y comienza a solidificar una piel que tiene un espesor suficiente para soportar la presión ferrostática. A la salida se encuentra el sistema de **enfriamiento secundario**, que completa el proceso de solidificación. Un sistema de rodillos guía la barra. Finalmente se efectúa el corte a la longitud requerida, generalmente con oxicorte. En las modernas instalaciones, se emplea el molde curvo (se aprovecha la ductilidad de la columna aún no solidificada totalmente), lo que permite disminuir la altura de las instalaciones (Fig. 25 y 26).

La colada continua tiene grandes **ventajas**: elimina las costosas etapas de obtención de lingotes y la posterior laminación para lograr barras, palanquillas y planchones (Fig. 26.a), se reduce la pérdida por despuntes de lingotes, el producto es de gran uniformidad, evitándose las segregaciones (principalmente C, P y S) que suelen aparecer en cabeza y pie de lingotes.

Las distintas variables del proceso deben regularse para evitar algunos inconvenientes que afectan la calidad del producto, particularmente la terminación superficial, el grado de limpieza

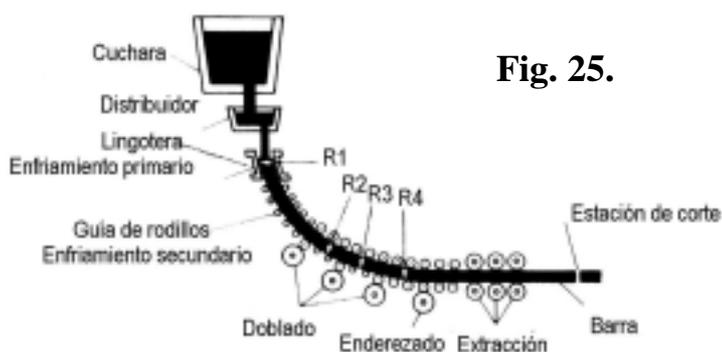
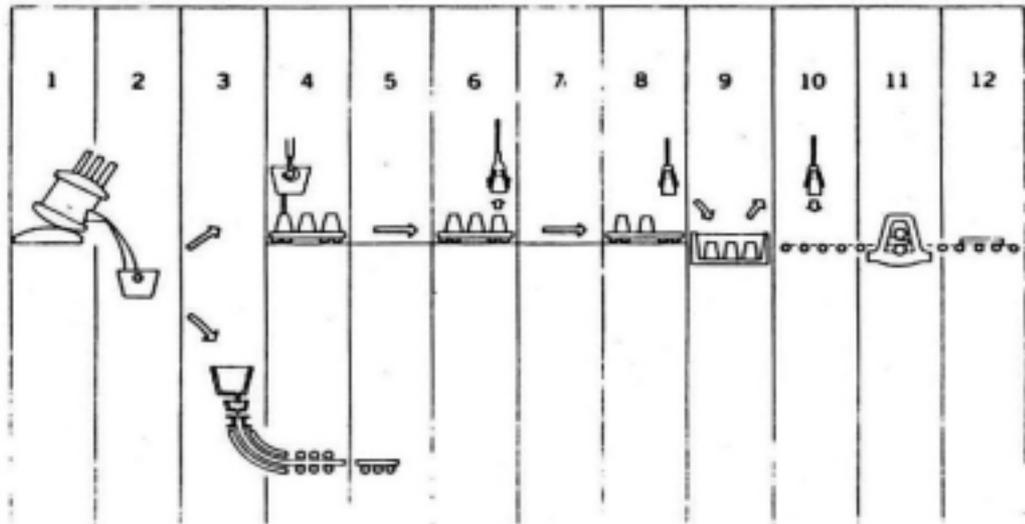
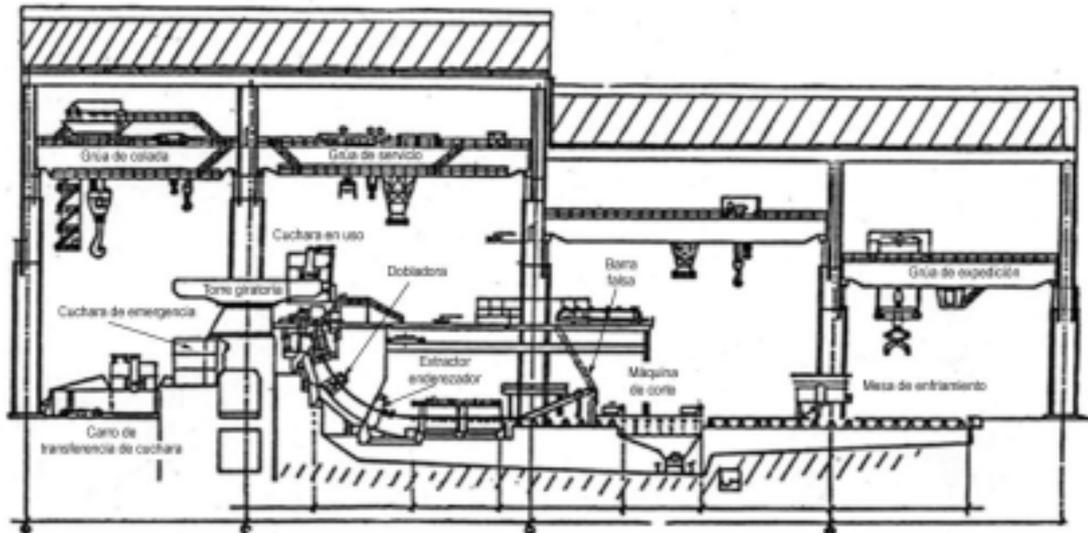


Fig. 25.

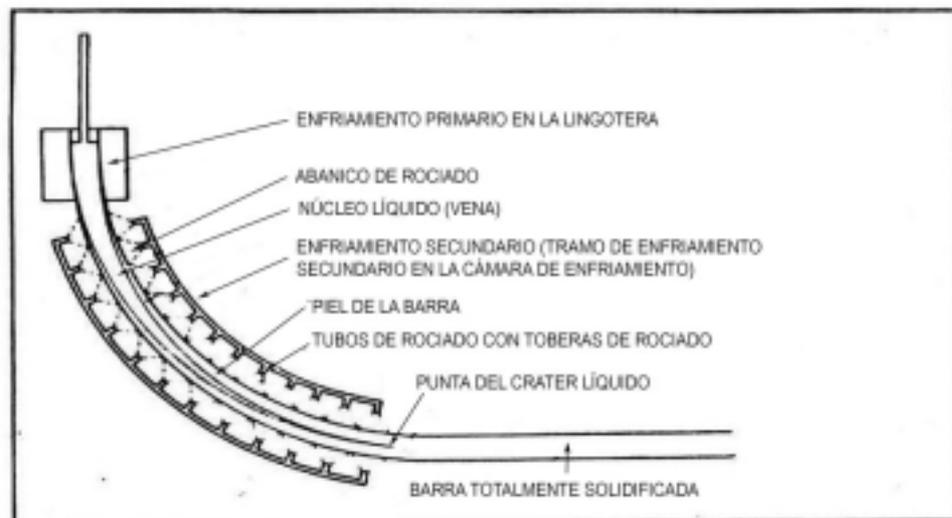
Esquema de una máquina de colada continua moderna.



a) Comparación de las secuencias de trabajo en la colada continua y en la colada convencional y laminación de lingotes.



b) Máquina de colada continua.



c) Enfriamiento de la barra de colada continua.

Fig. 26.

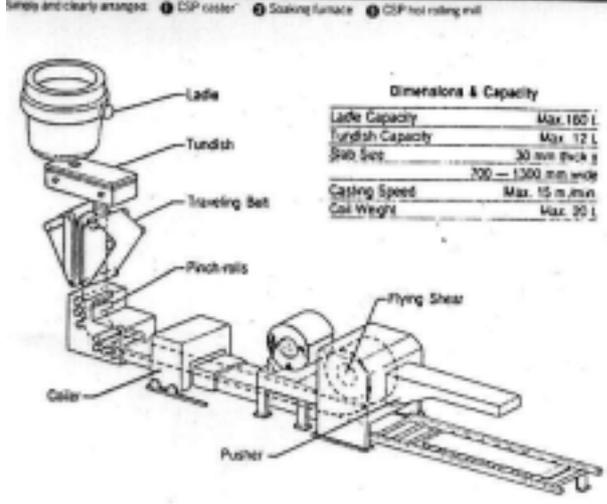
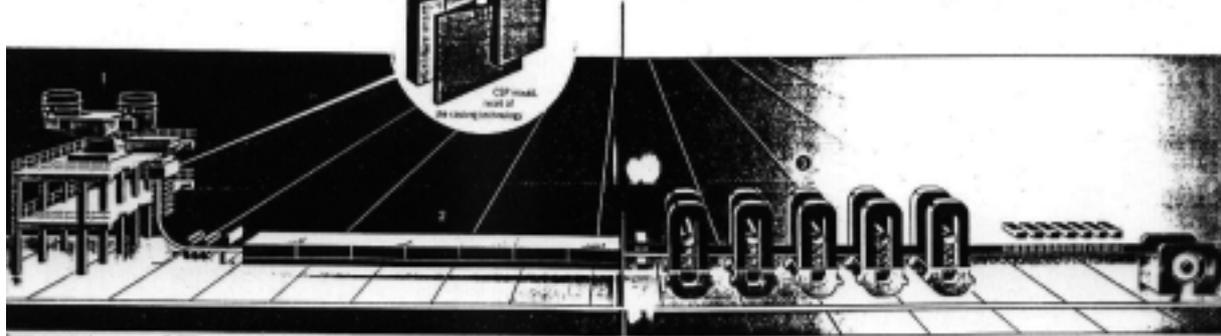
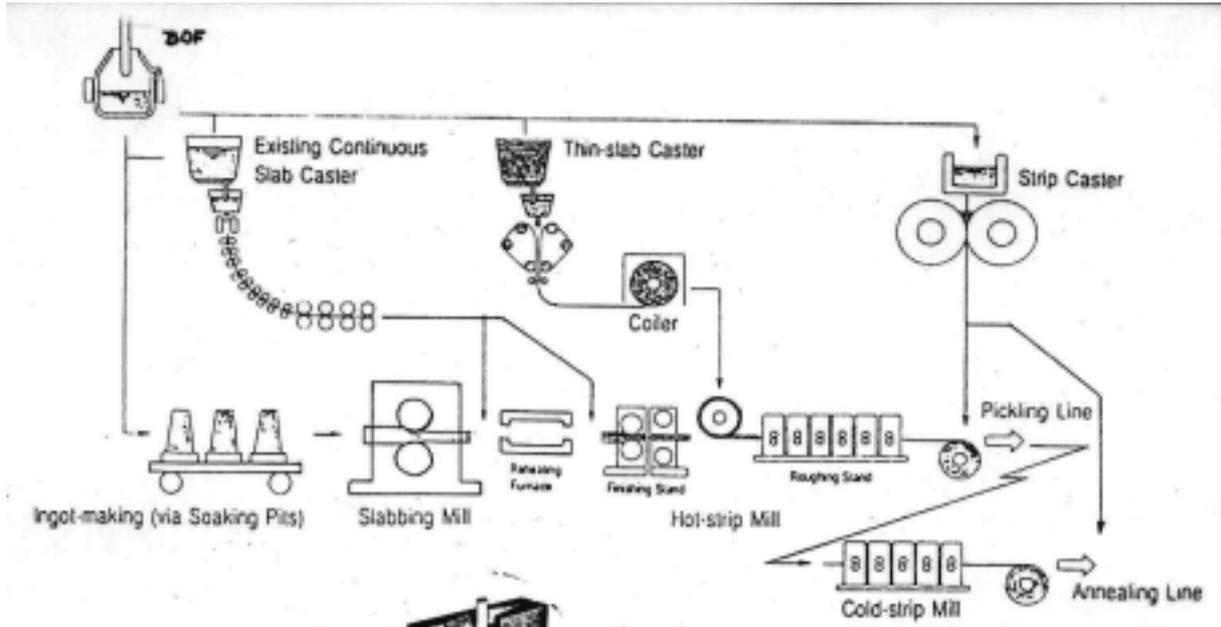


Fig. 5 — Dispositif de coulée continue de brames minces de Kawasaki.

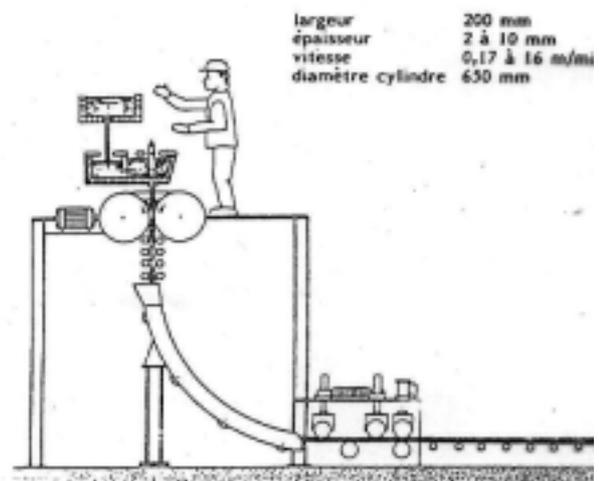


Fig. 6 — Dispositif de coulée continue de brames minces de l'IRSID.

Fig. 27. Nuevos desarrollos en colada continua de chapas delgadas.

(nivel inclusionario), sopladuras (provocadas por  $H_2$  y  $CO$ ), rechupes centrales y grietas (tanto centrales como internas o subcutáneas). Para altos contenidos de S pueden producirse grietas longitudinales. Normalmente se emplea el Mn y el Si, que son desoxidantes débiles por ser los más baratos; para obtención de grano fino se adiciona V pero (aunque es fuerte desoxidante) resulta muy caro. Una **desventaja** es que no pueden colarse aceros efervescentes.

Actualmente hay desarrollos tendientes a obtener chapas de diferentes espesores, incluso chapas delgadas (Fig. 27).

## 1.9. LAMINACIÓN

Una vez que el acero ha solidificado, se procesa mediante deformación plástica en un proceso de alta productividad y producción llamado laminación. Este proceso permite obtener un producto elaborado que es el que comercializa la empresa siderúrgica, ya que en realidad ninguna se dedica a fabricar acero, sino un producto de acero. Este producto es el que define el perfil de la empresa, por ejemplo: SIDERCA fabrica tubos de acero, SIDERAR fabrica chapas de acero, etc.. Los diferentes productos se elaboran en laminadores especialmente diseñado para ese fin (fig. 28), por lo que cada empresa sólo produce, en general, un único tipo de producto.

## 1.10. GASES EN LOS ACEROS

El oxígeno, hidrógeno y nitrógeno son gases que están en contacto con los aceros fundidos en diversas etapas de la fabricación y causan importantes problemas de calidad en los semielaborados y posteriormente en las piezas terminadas. La solubilidad de estos gases en los aceros aumenta con la temperatura y es mucho mayor en los aceros fundidos que en estado sólido. Los aceros llegan a contener una gran proporción de gases cuando el baño metálico alcanza las temperaturas máximas; al enfriarse el acero fundido en el horno, y especialmente durante la colada, disminuyen bruscamente su solubilidad y se desprenden parcialmente.

Los principales defectos que se derivan de la presencia de gases en los aceros son: porosidades (sopladuras), fisuras (grietas) e inclusiones, provocando fragilización, reducción de ductilidad y de otras características metalúrgicas y mecánicas. Para disminuir la acción perjudicial de los gases, se procura colar los aceros a la temperatura más baja posible (compatible con otras limitaciones), emplear procedimientos de desgasificado o bien coladas en vacío, efectuar calentamientos prolongados a temperaturas elevadas en el sólido.

### 1.10.1. OXÍGENO

La oxidación del acero se produce principalmente en los hornos de afino, también durante la colada en cuchara y de esta a las lingoteras. El oxígeno al ponerse en contacto con el acero fundido se combina con el Fe y forma óxido ferroso ( $FeO$ ), que se disuelve en gran cantidad en el baño metálico. La solubilidad del oxígeno en el Fe y aceros fundidos varía con:

- a) la temperatura del baño: a mayor temperatura mayor solubilidad;
- b) el contenido de C y la presión ambiental: condición de equilibrio de  $C+O \leftrightarrow CO$ ;  
 $[C].[O] = K$  (donde los corchetes indican que están disueltos en el baño), el valor de K depende de la temperatura y la presión parcial de CO (figura 29).

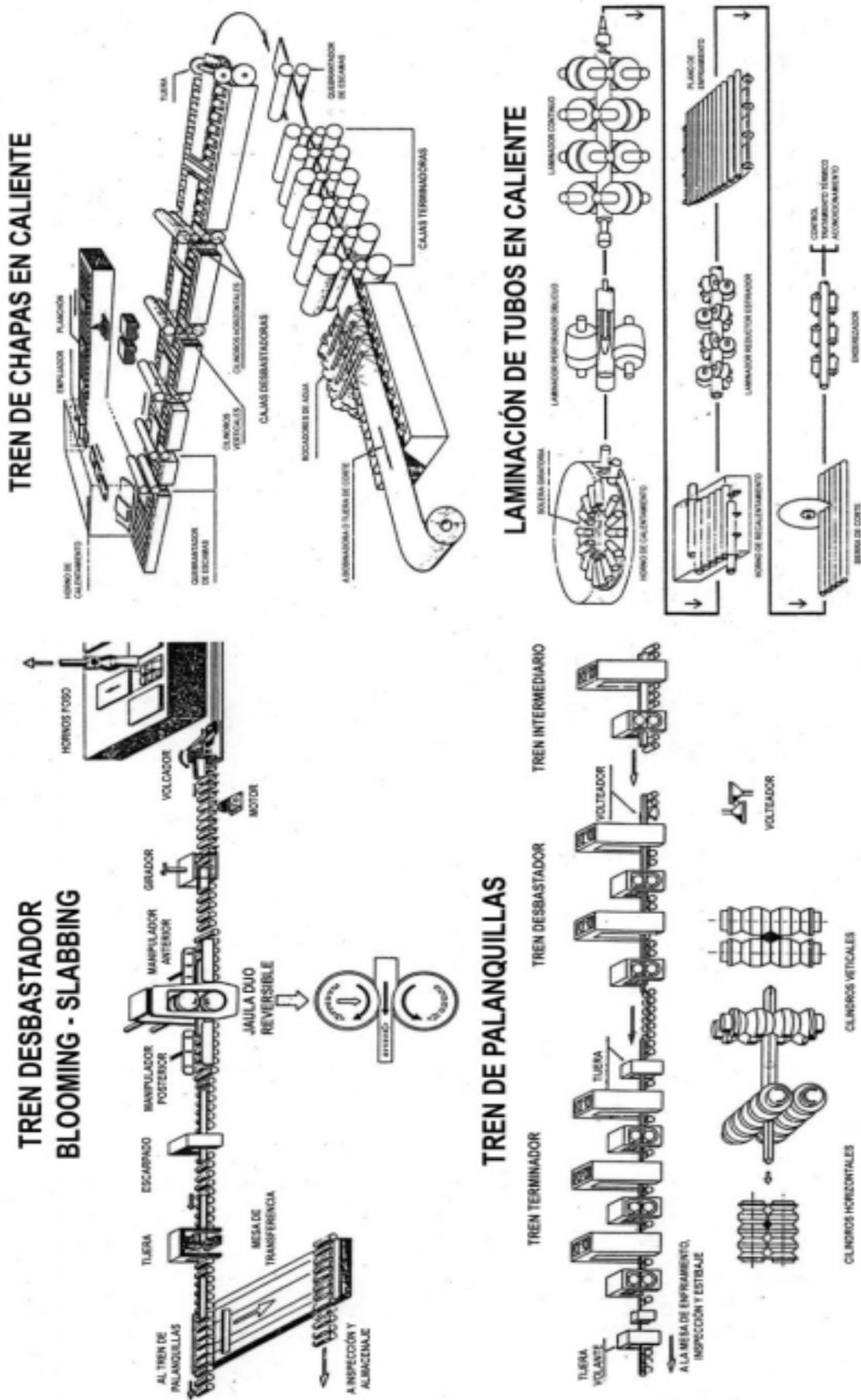
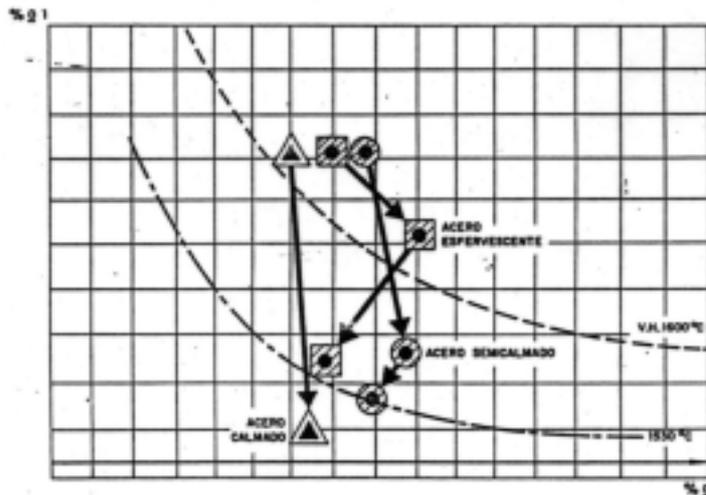


Fig. 28. Diferentes tipos de trenes de laminación.

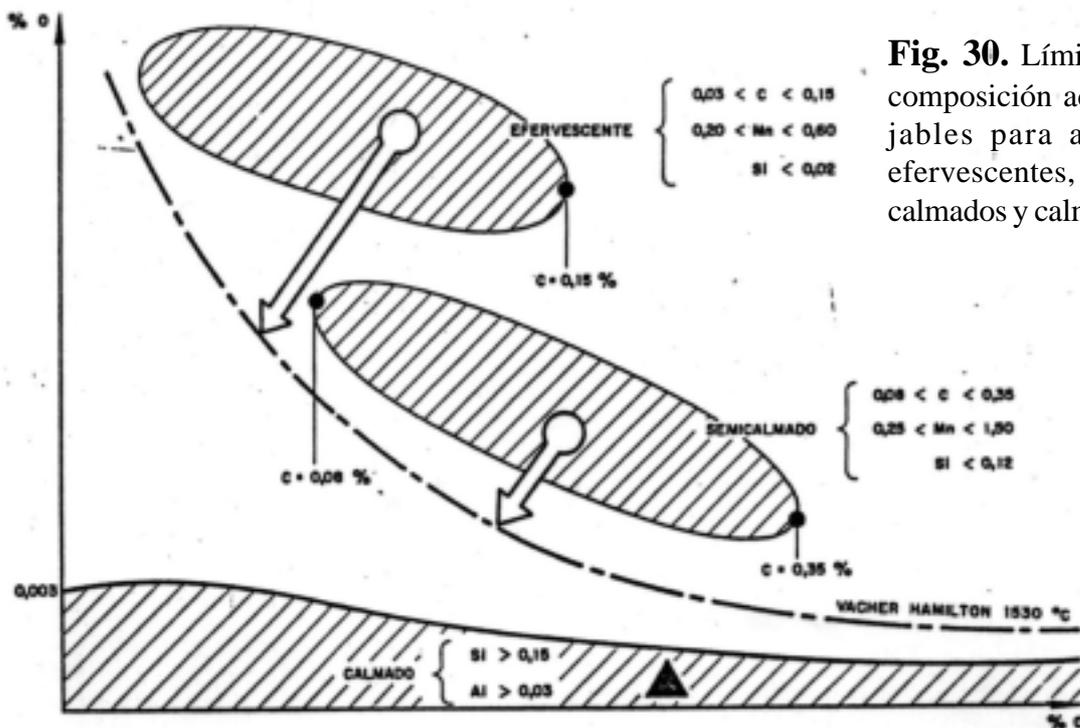


**Fig.29.** Curvas de Vacher-Hamilton (relación entre carbono y oxígeno disuelto en el baño en equilibrio), para distintas temperaturas (de colada y de solidificación)

En el enfriamiento, el oxígeno se separa de la aleación y en estado líquido reacciona con el C del acero formando CO, que al desprenderse origina porosidades (si el acero no ha sido suficientemente desoxidado). Las cavidades que albergaron CO poseen paredes no oxidadas y por lo tanto se sueldan durante el posterior trabajado mecánico (forja o laminación).

El procedimiento clásico de desoxidación consiste en “calmar” los aceros con pequeñas cantidades de ferro-silicio y aluminio, observándose que no existe efervescencia ni desprendimiento de gases (figura 30). Estos desoxidantes sólidos forman: sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

El contenido de oxígeno en los aceros es un factor importantísimo en la calidad resultante del material para diversos usos convencionales y especiales. La obtención de aceros con bajo tenor de oxígeno (sea por métodos de desgasificado o por fusión en vacío) implica notorios aumentos de costos.



**Fig. 30.** Límites de composición aconsejables para aceros efervescentes, semicalmados y calmados.

### 1.10.2. HIDRÓGENO

El hidrógeno aparece libre en estado sólido y ocasiona defectos (hair lines o cracks) que se aprecian en piezas rotas como manchas brillantes; este defecto era frecuente en piezas de grandes dimensiones

En términos generales, cuando la concentración de hidrógeno supera 2 ppm en el acero aparecen copos (grietas internas). Cuando el contenido de hidrógeno es importante en el metal fundido, al solidificarse y no poder disolverse más que una pequeña cantidad, queda en la masa en forma de rajaduras (poros) que luego son difíciles de eliminar. Si se trata de piezas de poco espesor (menores de 50 mm) el hidrógeno difunde al exterior, al cabo de cierto tiempo. Para piezas de gran tamaño, antiguamente se aplicaban recocidos muy prolongados; actualmente se emplean materias primas exentas de humedad y se utilizan procedimientos de desgasificado. A alta temperatura, el hidrógeno se encuentra en estado atómico (que difunde bien en el acero), pero a bajas temperaturas puede precipitar en forma molecular ( $H_2$ ) y no difunde, formando sopladuras en el interior de la pieza. Cuando esas sopladuras han sido evacuadas de gas, mediante recocidos prolongados a 600 °C aproximadamente, pueden soldarse por trabajado mecánico en caliente (forja o laminación) ya que sus paredes no están oxidadas.

### 1.10.3. NITRÓGENO

El nitrógeno puede provocar fragilidad (reducción de ductilidad y tenacidad) en los aceros cuando está presente en cantidades importantes, como en el acero que antes se obtenía en convertidores Bessemer y Thomas. Este problema se ha resuelto casi totalmente en los modernos convertidores, sustituyendo el soplado de aire (que posee elevada proporción de nitrógeno) por oxígeno y así se han mejorado las características mecánicas de los aceros. En los aceros fabricados en hornos eléctricos no suelen aparecer problemas con el nitrógeno.

La concentración de nitrógeno en solución en el hierro y aceros fundidos está regulada por la ley de Sievert (análoga a la del hidrógeno):

$$[N] = k \sqrt{pN}$$

siendo:  $k = \text{cte}$  y  $pN$  la presión parcial del nitrógeno.

En los aceros calmados con Al y Ti, el nitrógeno se halla combinado con estos elementos formando nitruros o carbonitruros y no en solución. Esto posee una consecuencia tecnológica fundamental, especialmente en el caso del acero de bajo C para chapas destinadas a estampado profundo, pues la presencia de nitrógeno libre y carbono producen las llamadas bandas de Lüders que tienen su origen en una deformación inhomogénea, inaceptable para piezas terminadas.

## 1.11. INCLUSIONES

Además del hierro, el carbono y algunos elementos agregados al acero para mejorar determinadas propiedades (aleantes), aparecen otros elementos provenientes del mineral original o bien

incorporado en el proceso de fabricación (residuales): P, S, Si, Mn, O, H, N, etc.; en particular cuando poseen efectos nocivos se los denomina impurezas (p.e.: P, S). Las partículas aisladas (incoherentes) de los distintos compuestos (aluminatos, sulfuros, silicatos, óxidos, etc.) se denominan inclusiones. Pueden clasificarse por su origen:

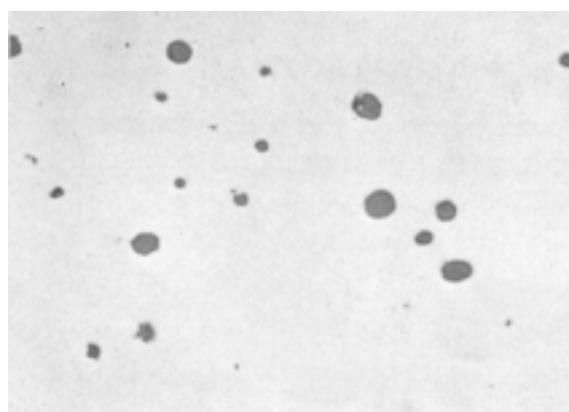
- **endógenas:** (naturales) formadas por reacciones químicas producidas durante la elaboración o solidificación, a partir de elementos provenientes del mineral o agregados intencionalmente (aleantes) (fig. 31);
- **exógenas:** (accidentales) arrastre de escoria y de refractarios, desprendimiento de material del lingote, etc.; sus dimensiones en general son mayores que las endógenas (fig.32).

En general provocan una reducción de la ductilidad, tenacidad y límite de fatiga porque constituyen discontinuidades duras y frágiles en la matriz del acero. Estos efectos dependen de la cantidad, forma y distribución, dando lugar a una tipificación amplia y compleja. Son menos perjudiciales en poca cantidad, con una dispersión homogénea.

La cantidad, morfología y distribución de las inclusiones están regidas por:

- fabricación:** materias primas, tipo de proceso, combustibles, etc.; para aceros de alta calidad, se aplican procedimientos para disminuir la formación de inclusiones;
- solidificación:** condiciones de enfriamiento, tiempo de solidificación, dimensiones del lingote o pieza, etc.; las inclusiones actúan como centros de nucleación en la solidificación del acero;
- trabajado mecánico:** (deformación plástica en caliente o frío); algunas partículas pueden deformarse e incluso fragmentarse, resultando diferentes comportamientos metalúrgicos.

La clasificación usual, a partir de observaciones metalográficas, es la propuesta por la Asociación de Siderurgistas Suecos (Jernkontoret), que es adoptada posteriormente por la norma ASTM con muy pocas variantes. Las inclusiones están tipificadas en 4 grupos principales (A: sulfuros; B: alúmina; C: silicatos; D: óxidos globulares), divididos en 2 series (fina y gruesa) y con distintos niveles (1 a 5 ó 6) y la evaluación se realiza mediante una comparación contra láminas con



**Fig. 31.** Inclusiones endógenas, óxido globular (FeO) en acero colado (250x).



**Fig. 32.** Inclusión exógena, probablemente refractario, en acero laminado en caliente (5x).

**Fig. 33.** EVALUACIÓN DE CANTIDAD DE INCLUSIONES EN LOS ACEROS

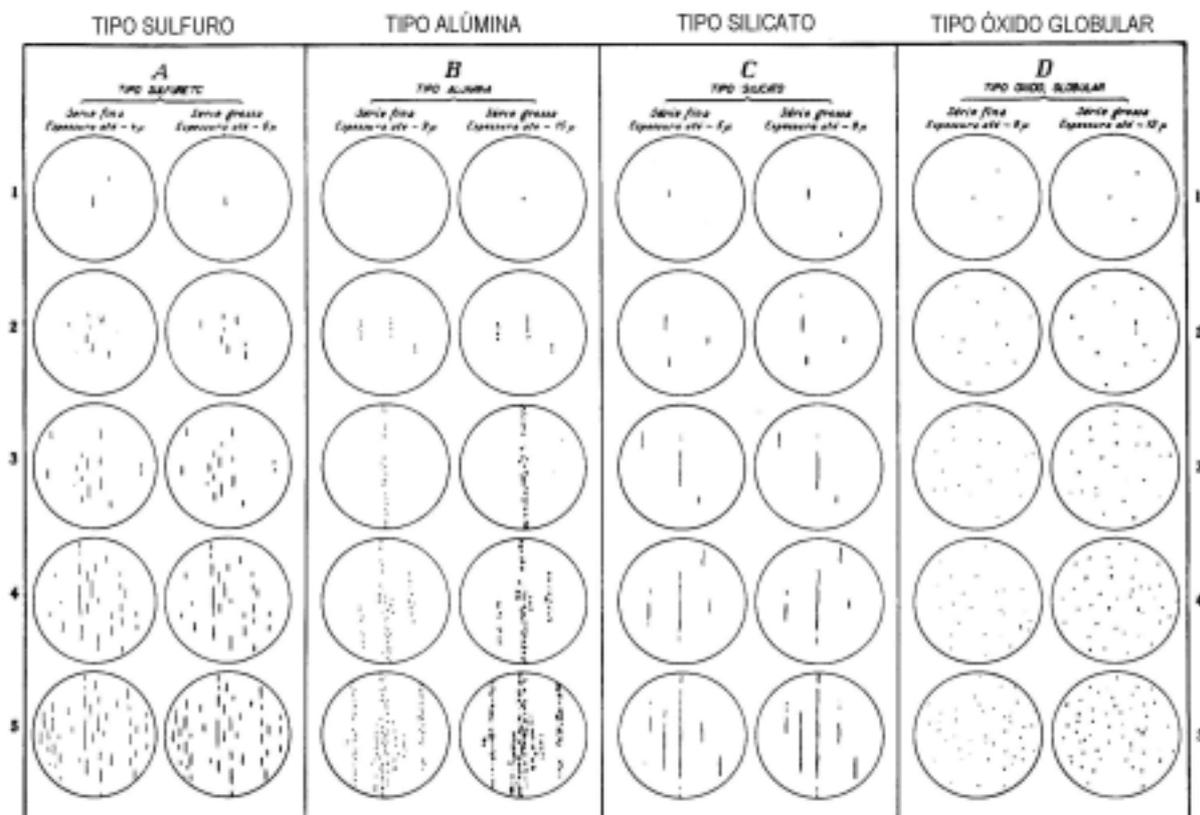


Tabla empleada para la determinación micrográfica de inclusiones no metálicas en los aceros. Originalmente adoptada por la Asociación de Siderúrgicos Suecos (Jernkontoret) de Estocolmo, está actualmente adoptada en todo el mundo con muy pocas o ninguna variante.

dibujos tipo a un aumento determinado (fig. 33).

Los efectos nocivos (perjudiciales) de las inclusiones aparecen en:

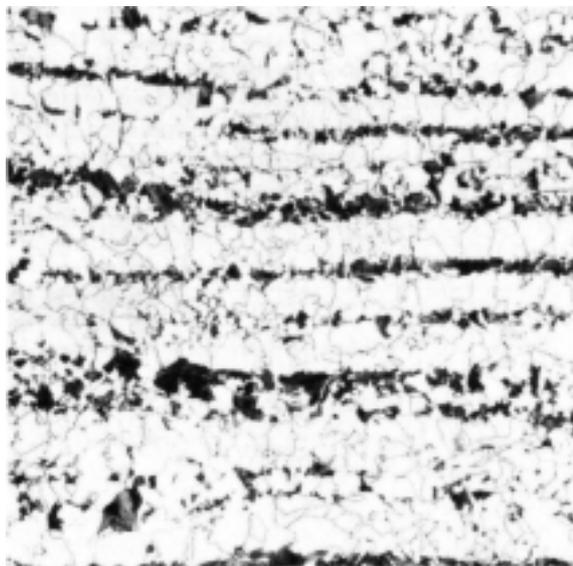
- deformación en caliente:** los sulfuros de hierro y ciertos eutécticos de bajo punto de fusión, provocan fragilidad en caliente, el MnS es plástico en caliente; la alúmina ( $Al_2O_3$ ) y la sílice ( $SiO_2$ ) casi no se deforman y son abrasivos;
- deformación en frío:** los fosfuros provocan fragilidad en frío;
- propiedades mecánicas:** reducción de resistencia estática y dinámica; inicio de fisuras en cargas cíclicas (fatiga) o de impacto (choque);
- maquinabilidad:** las inclusiones indeformables (óxidos) poseen un efecto abrasivo sobre las herramientas y causan una peor terminación superficial (rugosidad);
- resistencia a la corrosión:** formación de pares en presencia de un electrólito (líquido), así se favorece el ataque localizado;
- tratamientos térmicos:** retardo en crecimiento del grano, especialmente por partículas pequeñas (esta consecuencia es favorable).

### 1.10.1. FÓSFORO

Es una de las impurezas más nocivas, proviene del mineral, provoca fragilidad en frío (disminución de la resiliencia). Además, el fósforo forma solución sólida con la ferrita; la solubilidad supera el 2 % hacia 1050 °C (temperatura de fusión del eutéctico hierro-fósforo de hierro).

En la solidificación del acero hay una segregación menor (interdendrítica) rica en fósforo, alojada como una fina capa en borde de grano, esto reduce la cohesión intercrystalina al fundirse el eutéctico. Su presencia no se observa al microscopio cuando el contenido es menor al 0,1 %, pero se la detecta indirectamente por la estructura en bandas (ghost-lines) (fig.34).

El P y el S mejoran la maquinabilidad y se los agrega en algunos aceros, aunque disminuyen otras propiedades (como la resistencia a la corrosión).



Bandeado producido en chapa de acero por la presencia de fósforo segregado (200x).

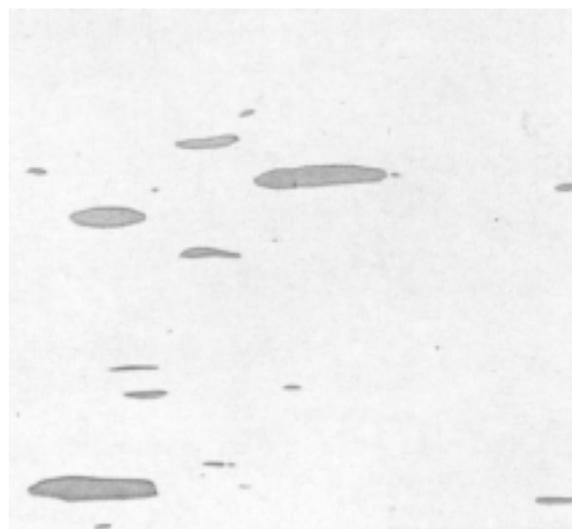
**Fig. 34.**

### 1.10.2. AZUFRE

El azufre se combina con Mn y Fe formando sulfuros con eutécticos alrededor de 1600 °C y 1000 °C; son parcialmente solubles entre sí y forman un sulfuro complejo de temperatura de fusión intermedia.

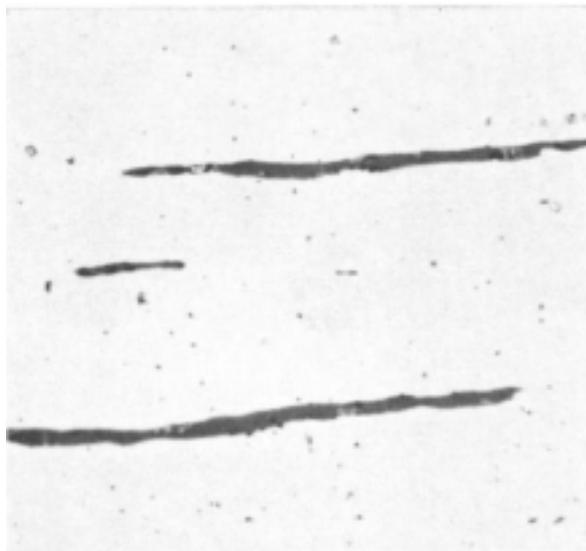
El azufre tiene mayor afinidad por el Mn; el sulfuro respectivo se aloja dentro del grano de ferrita y es relativamente dúctil a las temperaturas de trabajado en caliente, pudiendo ser deformado (fig.35). En cambio, el sulfuro de hierro tiene punto de fusión más bajo y se ubica entre los granos, lo cual provoca fragilidad en caliente (red shortness) a las temperaturas de laminación o forja.

El azufre es difícil de eliminar del acero, pero su efecto nocivo se reduce con agregado de Mn (cuyo contenido es hasta 10 veces superior). Las inclusiones de MnS aparecen como glóbulos o polígonos; la segregación macroscópica de azufre se observa por la impresión del ensayo Baumann.



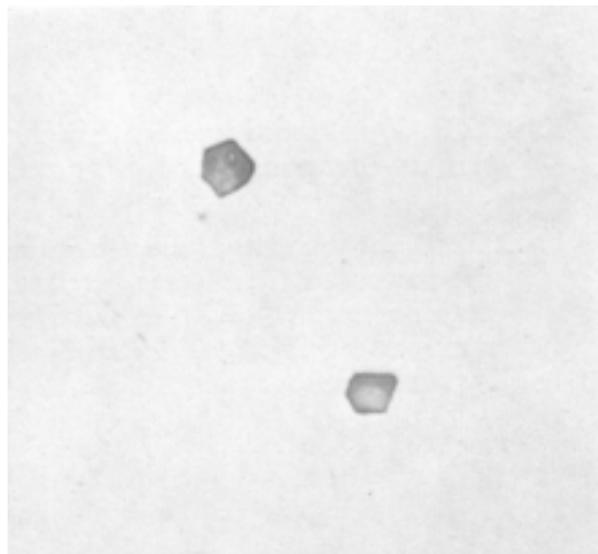
Inclusiones de MnS en un acero de corte libre laminado en caliente (250x).

**Fig. 35.**



Inclusiones de silicatos deformadas por laminación (750x).

**Fig. 36.**



Inclusiones de alúmina en acero colado (1000x).

**Fig. 37.**

### 1.10.3. MANGANESO

El manganeso se disuelve en la ferrita. En aceros al C el contenido varía entre 0,25 al 1 %, se lo agrega como desulfurante (forma SMn) y eventualmente como desoxidante. Aumenta la templabilidad, la resistencia mecánica, pero disminuye un poco la ductilidad. Los aceros al Mn muestran tendencia a fisuras por temple y también fragilidad de revenido (caída de la resiliencia por enfriamiento lento en el rango 450-550 °C).

### 1.10.4. SILICIO

El silicio forma solución sólida con la ferrita, por lo tanto no se detecta al microscopio y debe realizarse análisis químico. Se lo agrega como desoxidante. Al impurificar la ferrita, modifica sus propiedades: mayor resistencia y fragilidad, pero más dureza y menor tenacidad. El silicio reacciona con el O y forma sílice ( $\text{SiO}_2$ ); estas inclusiones son de tipo globular y aspecto metálico, muy duras e indeformables por trabajado mecánico, también forma silicatos vítreos altamente deformables (fig.36). A veces están asociadas con óxidos y sulfuros.

### 1.10.5. ALUMINIO

La acción desoxidante del aluminio es más enérgica que el Mn y el Si; los aceros desoxidados con aluminio son de grano fino. Las partículas de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) son pequeñas, duras y frágiles; se observan al microscopio como puntos negros (fig.37). La alúmina dificulta el mecanizado y resulta muy abrasiva para el trabajado en frío, especialmente laminación y trefilado. El aluminio en exceso se combina con el nitrógeno formando partículas muy pequeñas de nitruro de aluminio, que son las responsables de controlar el tamaño de grano.

## ANEXO DE DATOS ESTADÍSTICO

|   |                                 |
|---|---------------------------------|
| Producción mundial en 1998:                               | 761.800.000 toneladas de acero. |
| Consumo:  | 127 kg/habitante                |
| Precio por kilo aproximado:                               | \$ 0,30                         |
| Precio de acero bruto (o crudo) (raw steel) por tonelada: | \$ 300,00                       |

### Principales productores mundiales de acero:

|                   |                                 |
|-------------------|---------------------------------|
| 1. China          | 114,1 millones de toneladas/año |
| 2. Estados Unidos | 97,4 millones de toneladas/año  |
| 3. Japón          | 93,4 millones de toneladas/año  |
| 4. Alemania       | 44,7 millones de toneladas/año  |
| 5. Rusia          | 41,8 millones de toneladas/año  |
| 6. Corea del Sur  | 40,0 millones de toneladas/año  |
| 7. Italia         | 26,1 millones de toneladas/año  |
| 8. Brasil         | 25,8 millones de toneladas/año  |
| 9. India          | 23,9 millones de toneladas/año  |
| 10. Ucrania       | 23,5 millones de toneladas/año  |

Los primeros 10 productores de acero son responsables del 69,7 % de la producción mundial (530,8 millones de toneladas).

|               |                                |
|---------------|--------------------------------|
| 16. México    | 14,1 millones de toneladas/año |
| 28. Argentina | 4,3 millones de toneladas/año  |
| 30. Venezuela | 3,7 millones de toneladas/año  |

La producción de América Latina en su conjunto es de 52,1 millones de toneladas/año (6,8 % de la producción mundial total).

### Principales países con reservas de mineral de hierro:

1. Brasil
2. Australia
3. India
4. China
5. Sudáfrica

### DATOS REFERIDOS AL MÉTODO DE REDUCCIÓN DIRECTA:

Acero producido mediante el proceso de reducción directa (RD): 36 millones de toneladas/año (100 %).

|                                     |                               |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| 1. América Latina                   | 13 millones de toneladas/año  |
| 2. Medio Oriente y África del Norte | 9,3 millones de toneladas/año |

|                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 3. Lejano Oriente y Australia | 8,7 millones de toneladas/año |
| 4. África del Sur y otros     | 3,1 millones de toneladas/año |
| 5. América del Norte          | 1,9 millones de toneladas/año |

Acero producido por medio de RD, según distintos procesos:

|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| 1. Proceso MIDREX                    | 63,4 % |
| 2. Proceso HyL III                   | 19,3 % |
| 3. Proceso HyL I                     | 7,1 %  |
| 4. Proceso SL/RN                     | 3,6 %  |
| 5. Otros procesos que emplean carbón | 4,8 %  |
| 6. Otros procesos que emplean gas    | 1,8 %  |

### **DATOS DE ARGENTINA**

Producción en 1998:

|            |                               |
|------------|-------------------------------|
| planos:    | 2,2 millones de toneladas/año |
| no planos: | 2,1 millones de toneladas/año |

|                                      |                                     |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Siderar (2 altos hornos):            | 2,2 - 2,4 millones de toneladas/año |
| Siderca + Acindar (2 módulos de RD): | 1,7 - 1,8 millones de toneladas/año |

## ANEXO DE MATERIALES EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA

### 1. PRINCIPALES MINERALES DE HIERRO

#### 1.1. ÓXIDOS

|           |   |                           |
|-----------|---|---------------------------|
| Hematita  | $\text{Fe}_2\text{O}_3$                 | óxido férrico             |
| Magnetita | $\text{Fe}_3\text{O}_4$                 | óxido ferroso - férrico   |
| Ilmenita  | $\text{FeTiO}_3$                        | óxido de hierro - titanio |
| Limonita  | $\text{HFeO}_2$ (goetita)               | óxido de hierro hidratado |
| Limonita  | $\text{FeO}(\text{OH})$ (lepidocrocita) | óxido de hierro hidratado |

#### 1.2. CARBONATOS

|          |                 |                     |
|----------|-----------------|---------------------|
| Siderita | $\text{FeCO}_3$ | carbonato de hierro |
|----------|-----------------|---------------------|

#### 1.3. SILICATOS

|               |           |                     |
|---------------|-----------|---------------------|
| Greenalita    | variados  | silicatos de hierro |
| Grunerita     | y         | silicatos de hierro |
| Existen otros | complejos | silicatos de hierro |

#### 1.4. SULFUROS

|           |                |                            |
|-----------|----------------|----------------------------|
| Pirita    | $\text{FeS}_2$ | pirita de hierro           |
| Marcasita | $\text{FeS}_2$ | pirita de hierro blanca    |
| Pirrotita | $\text{FeS}$   | pirita de hierro magnética |

### 2. FUNDENTES

#### Función:

- volver a los compuestos más fácilmente fusibles, ya que muchas de las impurezas asociadas del mineral de hierro son de naturaleza altamente refractarias.

- proporcionar una sustancia con la cual estos elementos o compuestos se puedan combinar con preferencia al metal.

#### 2.1. FUNDENTES ACIDOS

|        |                |
|--------|----------------|
| Sílice | $\text{SiO}_2$ |
|--------|----------------|

#### 2.2. FUNDENTES BASICOS

|            |                    |   |
|------------|--------------------|---|
| Alto Horno | Caliza<br>Dolomita | $\text{CaCO}_3$<br>$(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$ |
| Acería     | Cal                | $\text{CaO}$  |

### 2.3. FUNDENTES ANFOTEROS

Pueden funcionar como ácidos o básicos dependiendo de la condición impuesta.

Alúmina  $\text{Al}_2\text{O}_3$

### 2.4. FUNDENTES NEUTROS

Generalmente hacen a las escorias más fluidas.

Espatofluor  $\text{CaF}_2$

## 3. COMBUSTIBLES

| DIVISIÓN GENERAL                  | COMBUSTIBLE PRIMARIO | MANUFACTURADO                  |
|-----------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Sólidos<br>(hullas o<br>carbones) | antracita            | semicoque                      |
|                                   | carbones bituminosos | coque o coke                   |
|                                   | lignito              | carbón vegetal                 |
|                                   | turba                | briquetas                      |
|                                   | madera               | carbón pulverizado             |
| Líquidos                          | petróleo             | gasoil<br>fueoil               |
| Gaseosos                          | gas natural          | reformado<br>butano<br>propano |
|                                   | gas de hulla         |                                |

## 4. REFRACTARIOS

Son materiales de construcción capaces de soportar temperaturas desde 260°C hasta 1270°C. Son caros y cualquier falla en los mismos resulta en una gran pérdida de tiempo, daño al equipo y en algunos casos pérdida del producto.

El refractario influye sobre el consumo de energía y la calidad del producto.

Se los puede clasificar según su comportamiento químico en: ácidos, básicos, anfóteros y neutros.

En general se los suele dividir en grupos, según sea su componente base.

### A - GRUPO MAGNESIA o MAGNESIA - CAL

|                    |  |
|--------------------|--|
| magnesia sintética | (MgO)                                    |
| magnesita natural  | (MgCO <sub>3</sub> )                     |
| dolomita           | (CaCO <sub>3</sub> · MgCO <sub>3</sub> ) |

**B - GRUPO MAGNESIA - CROMO**

espinelas altamente refractarias ( $XO.X_2O_3$ )  
(MgO, FeO,  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ )

**C - GRUPO SILÍCEO**

cuarcita ( $SiO_2$ )  
arenisca o pedernal ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , FeO, CaO)  
sílice fundido ( $SiO_2$  de alta pureza)  
zirconio y zirconia ( $SiO_2.ZrO_2$ ) ó ( $ZrO_2$ )

**D - GRUPO ARCILLAS REFRACTARIAS**

refractarios silíceos (75 %  $SiO_2$ )  
refractarios plásticos (arcilla plástica uniendo materiales no plásticos)  
refractarios de pedernal (arcilla dura y de fácil fractura)  
refractarios nodulares (nódulos aluminosos o ferrosos unidos con arcillas)

caolines ( $Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$ ) (caolines altamente refractarios)

(ladrillos refractarios: arcillas calcinadas + arcillas sin calcinar)

**E - GRUPO ALTA ALÚMINA**

caolines bauxíticos (50 a 70 %  $Al_2O_3$ )

bauxita (diáspora  $Al_2O_3.3H_2O$ , gibsita  $Al_2O_3.H_2O$  calcinadas, 86 a 90 % de  $Al_2O_3$ )  
( $3Al_2O_3.2SiO_2$ ) + vidrio silíceo.

silimanita, andalusita ( $Al_2O_3.SiO_2$ ) (62.9 %  $Al_2O_3$  y 37.1 %  $SiO_2$ ) calentada da mulita

alúmina de alta pureza ( $Al_2O_3$ )

**F - GRUPO CARBÓN**

grafito natural o artificial  
carbón  
coque o coke  
carburo de silicio

**5. OTROS INSUMOS IMPORTANTES**

Aire para el alto horno.  
Oxígeno para acería.  
Agua para refrigeración (alto horno, acería, laminación, etc.)  
Energía eléctrica.

## ANEXO DE CONDICIONES PARA DEFOSFORAR Y DESULFURAR

### CONDICIONES OPTIMAS PARA DEFOSFORAR

- 1) TEMPERATURA MAS BAJA POSIBLE compatible con el proceso, con temperatura muy alta, mayor a 1650 °C, se revierte el P de la escoria al acero.
- 2) BAÑO Y ESCORIA OXIDANTES: por ello se defosfora en el HE (EAF) o COB (BOF), luego de la oxidación del baño. Se forma pentóxido de fosforo.
- 3) ESCORIA BÁSICA, RICA EN CaO: para formar el fosfato tricálcico que se incorpora a la escoria.

#### Mecanismos de refoforación:

- 1) Pasaje de escoria de HE o COB a la cuchara durante el sangrado.
- 2) Ferroaleaciones con alto P.
- 3) Algunos refractarios de alta Alúmina pueden tener alto P (liga fosforosa).

### CONDICIONES OPTIMAS PARA DESULFURAR

- 1) TEMPERATURA MÁS ALTA POSIBLE: las altas temperaturas favorecen una escoria bien fluida y una reacción más rápida del S del acero con el CaO de la escoria
- 2) BAÑO Y ESCORIA BIEN DESOXIDADOS, ya que si el acero, y en consecuencia su escoria, contienen mucho O, no se puede desulfurar a fondo.
- 3) ESCORIA BÁSICA, RICA EN CaO para formar el Sulfuro de calcio que se incorpora a la escoria.
- 4) AGITADO INTENSO: para favorecer un buen contacto METAL-ESCORIA.

#### **Notar que las condiciones 1 y 2 son opuestas a las de defosforación.**

Es por ello que no se pueden realizar ambas operaciones al mismo tiempo, con la misma escoria o en el mismo recipiente.

Por lo tanto, lo normal es desulfurar en cuchara u horno cuchara (caso SIDERCA, y SIDERAR cuando necesita bajar S), luego de la desoxidación en sangrado y evitando pasaje de escoria del HE o COB a la cuchara.

La primer gran desulfuración se efectúa en el alto horno, donde se tienen elevadas temperaturas y un ambiente reductor. El inconveniente es que la escoria no es fuertemente básica (ya que existe casi la misma cantidad de óxidos básicos que de óxidos ácidos) por lo que la escoria tiene un bajo tenor de azufre. La mayor parte de azufre se elimina en forma de gas (deletéreo).

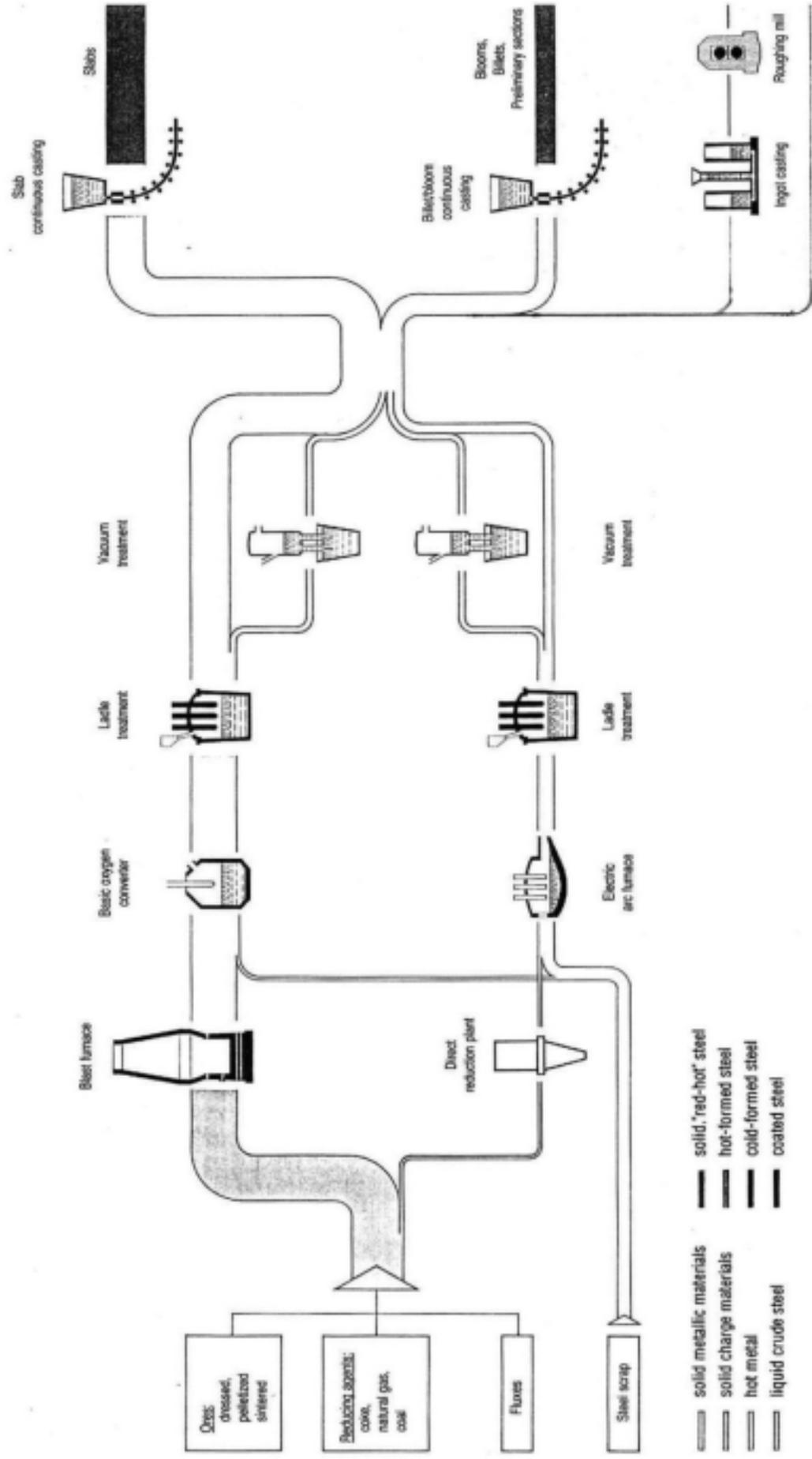
## **ANEXO DE FIGURAS ADICIONALES**

**Del mineral al producto de acero:** procesos siderúrgicos más importantes completos (2 figuras).

**Horno eléctrico:** datos importantes sobre el horno eléctrico (2 figuras).

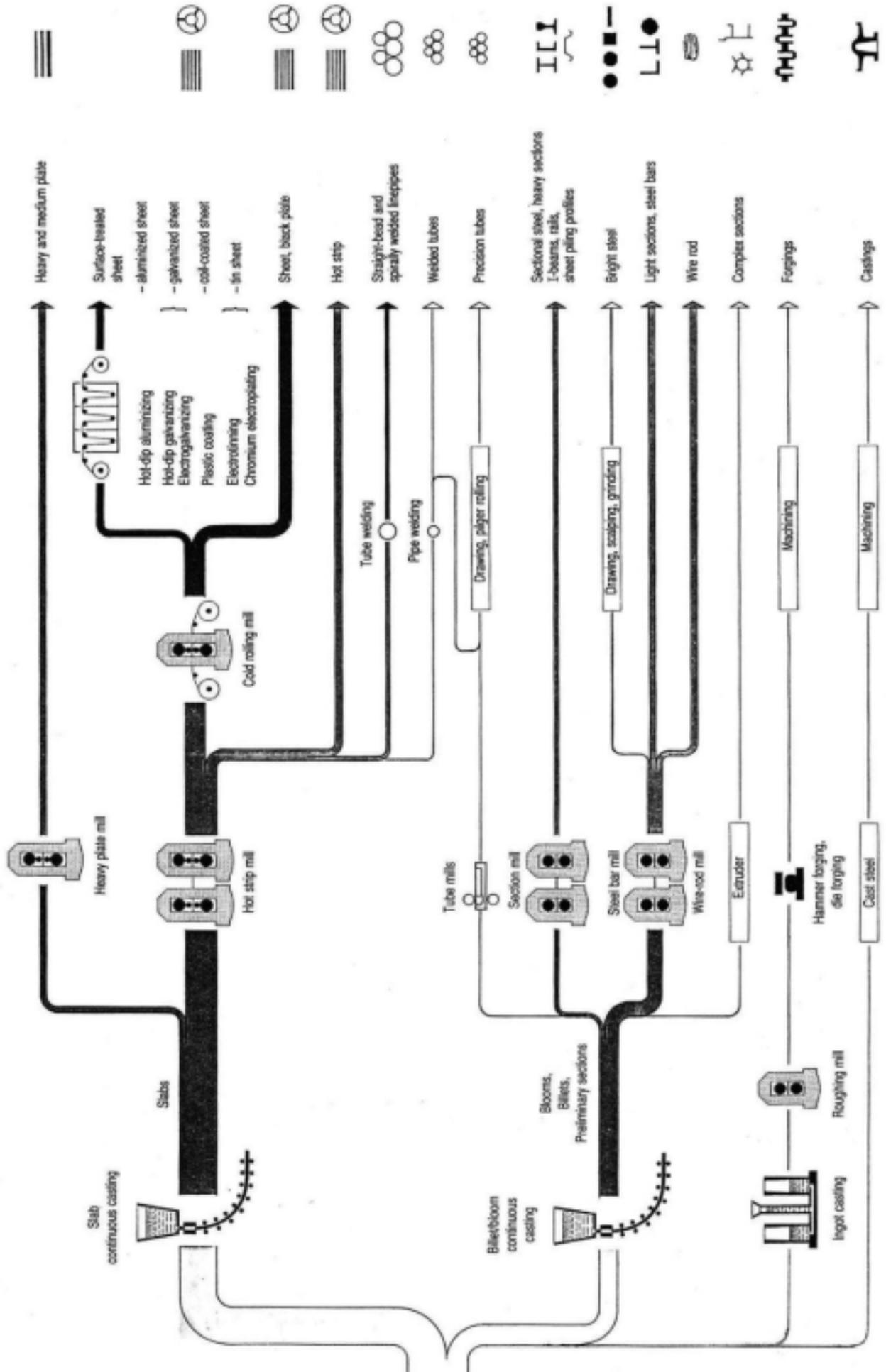
**Metalurgia secundaria:** algunos procesos típicos.

Charge materials      Reduction      Steelmaking      Secondary metallurgy      Continuous casting



**FROM ORE TO STEEL**  
© Veriag Stahl Eisen mbH, Düsseldorf

Continuous casting      Hot forming      Cold forming      Surface treatment      Finished products



Low Power 100 to 200 kVA/t  
 Medium Power 200 to 400 kVA/t  
 High Power 400 to 700 kVA/t  
 Ultra High Power 700 kVA upwards.

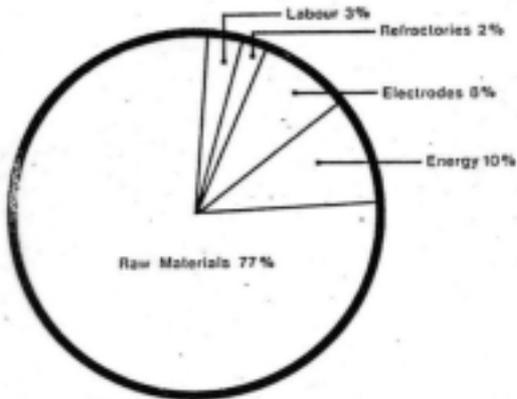


Fig. 1- Typical Production Cost Breakdown for an Electric Arc Furnace

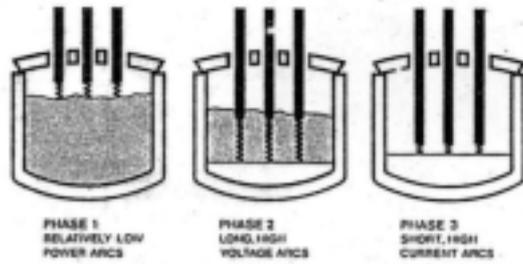


Fig. 2 - Phases in Melting the Arc Furnace Charge

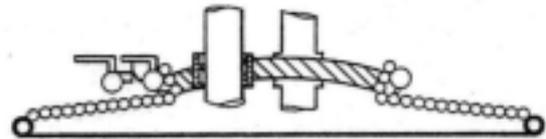


Fig. 4 - Water Cooled Roof (Tubular Design)

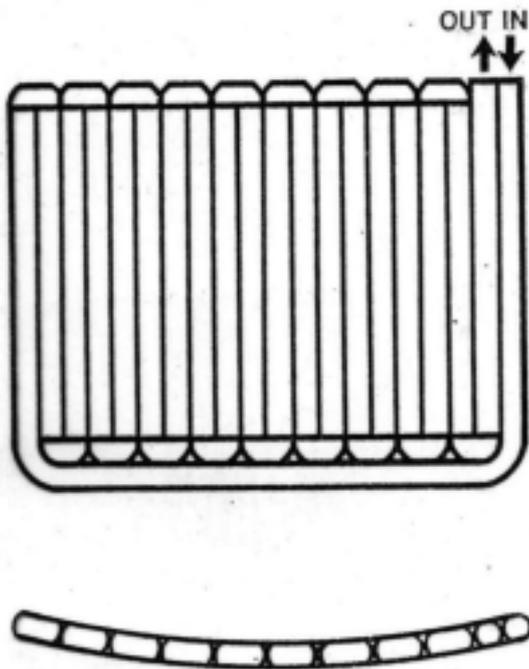


Fig. 3 - Water Cooled Panel (Tubular Design)

**Horno eléctrico 1: clasificación por potencia, fases en la fusión de la carga, detalle de los costos de producción, pared y bóveda refrigeradas por agua.**

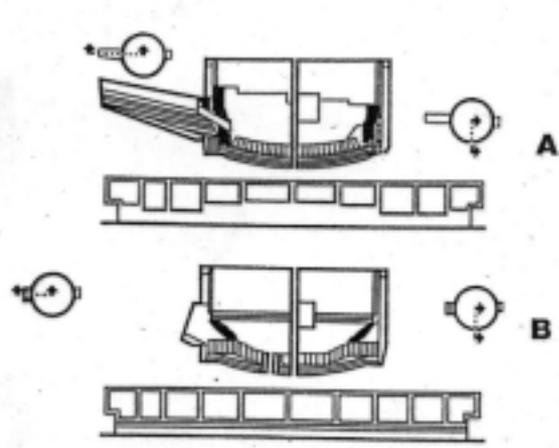
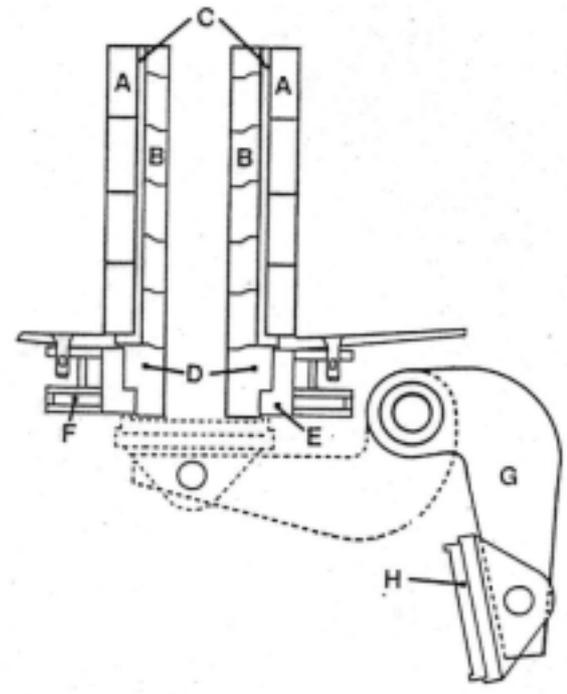


Fig. 6 - Original Furnace Arrangement (A) and Modified Furnace showing Bottom Taphole and Increased Area of Sidewall Cooling, (B)



- |   |                         |   |                |
|---|-------------------------|---|----------------|
| A | Magnesite setting brick | E | End ring       |
| B | Magnesite wear tube     | F | Water cooling  |
| C | Magnesite sealing mix   | G | Swinging flap  |
| D | Graphite terminal brick | H | Graphite plate |

Fig. 5 - Details of Construction of Bottom Taphole

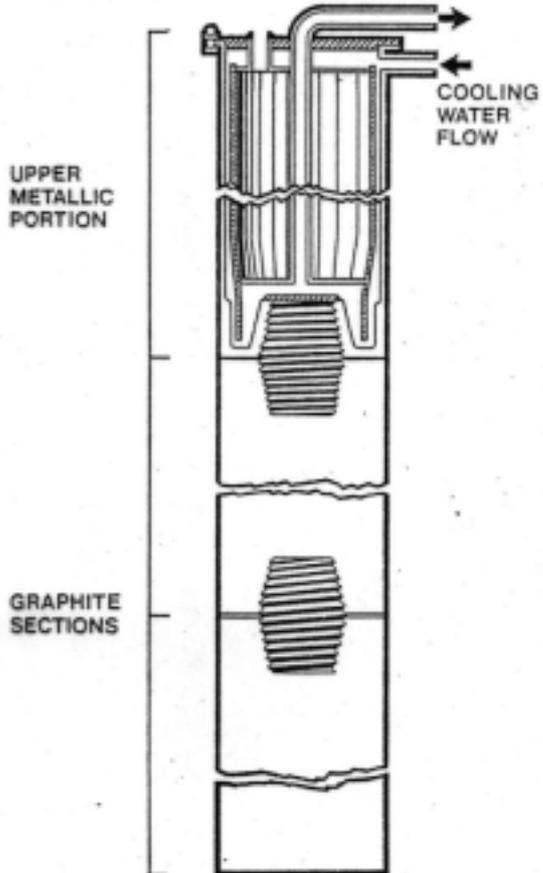


Fig. 10 - Composite Water Cooled Electrode (Stelco Design)

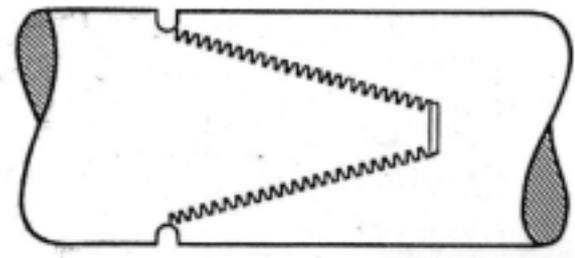
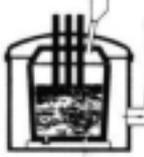
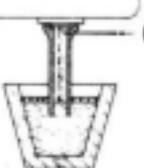
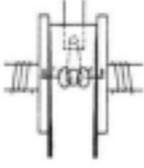


Fig. 9 - Male/Female Joint Design

**Horno eléctrico 2: paneles refrigerados, colada excentrica por el fondo, electrodos refrigerados y ensamble de electrodos**

|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
| <p>Prevention of slag carry-over</p>                  |    |  |  |
| <p>Mixing/homogenizing</p>                            | <p>Gas injection</p>  <p>Bottom porous plug</p> |  <p>Lance</p>      | <p>Electromagnetically</p>  <p>Coil</p> |
| <p>Charging of solids</p>                             | <p>Alloying elements</p>  <p>Gas</p>            | <p>Powder/gas</p>  | <p>Wire</p>  <p>Gas</p>                 |
| <p>Vacuum treatment</p>                               |  <p>Ladle degassing</p>                        |  <p>RH/DH</p>     |  <p>VOD</p>                            |
| <p>Heating</p>  | <p>Ladle furnace</p>                          |  <p>VAD</p>     |  |
| <p>Casting stream shrouding ladle/tundish</p>         |  <p>Gas</p>                                   |  <p>Gas</p>      |  <p>Gas</p>                           |
| <p>Electromagnetic stirring in continuous casting</p> |  <p>MS</p>                                    |  <p>EMBR</p>     |  <p>SS/FS</p>                         |

Algunos procesos típicos de metalurgia secundaria