

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

92

MONOGRAFIA ACERCA DE LAS PROPIEDADES DE
LOS MATERIALES QUE FORMAN LA CARGA DEL
HORNO ALTO.

MONOGRAFIA PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
P R E S E N T A

LUIS PALOS MACIAS

MEXICO, D. F.

1973

M-166900



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA:

PRESIDENTE MARIO MEDINA VALENZUELA

VOCAL NICOLAS JAIMES VILLAFANA

SECRETARIO CESAR A. RINCON ORTA

1er. SUPLENTE KURT H. NADLER GUNDEISHEMER

2do. SUPLENTE DARIO RENAN PEREZ PRIEGO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA FACULTAD DE QUIMICA

SUSTENTANTE LUIS PALOS MACIAS

ASESOR DEL TEMA NICOLAS JAIMES VILLAFANA

SUPERVISOR TECNICO MARIO MEDINA VALENZUELA

A LA MEMORIA DE MI MADRE

CON RESPETO Y CARIÑO A MI PADRE
DOMINGO FALOS NORIEGA POR TODOS
SUS ESFUERZOS Y SACRIFICIOS, -
PATENTIZANDOLE DE ESTA MANERA
QUE ELLOS NO HAN SIDO EN VANO.

CON CARIÑO A MI HERMANA:

" CONCHITA "

CON AMOR A MI NOVIA:

" HAYDEE "

CON PROFUNDO AGRADECIMIENTO A LA DIRECCION
GENERAL DE ORIENTACION Y SERVICIOS SOCIALES
DE LA U.N.A.M., POR LA BECA QUE ME OTORGO -
DURANTE MI CARRERA.

A MIS MAESTROS Y COMPAÑEROS.

A TODOS LOS QUE ME
BRINDARON SU AYUDA
Y A LOS
"PESAFILTROS"

I N D I C E

- TEMA I .- Introducción
- TEMA II .- HORNO ALTO
- a) Descripción General del Horno Alto y sus principales aparatos accesorios.
 - b) Funcionamiento del Horno Alto.
- TEMA III .- MATERIA PRIMA
- a) El hierro.
 - b) Propiedades del Hierro.
 - c) Minerales del Hierro.
- TEMA IV .- MATERIALES
- a) Antecedentes de los Combustibles.
 - b) Coque.
 - c) Fundente.
 - d) La Caliza.
- TEMA V .- SINTERIZACION Y PELETIZACION.
- TEMA VI .- LA CARGA DEL HORNO ALTO.
- a) Propiedades Físicas de la Carga.
 - 1.- Decrepitación de los Minerales.
 - 2.- Hinchamiento.
 - b) Degradación, Resistencia a la Abrasión y Granulometría de los Productos.
 - c) Propiedades Químicas de la Carga.
 - 1.- Índice de Basicidad.
 - 2.- Selección de los Minerales por los Contenidos de S y P.
 - 3.- Composición de la Ganga y su influjo en la Escoria.

4.- Reductibilidad

TEMA VII .- CONCLUSIONES.

TEMA VIII .- BIBLIOGRAFIA.

I N T R O D U C C I O N

(Aunque es difícil definir las propiedades que deben reunir individualmente los componentes de la carga, actualmente se vienen aplicando cierto número de ensayos de laboratorio o planta piloto para conocer el futuro comportamiento en el horno alto respecto a determinados aspectos parciales que, o bien están relacionados con los consumos de coque, ensayos de reductibilidades o con la producción o permeabilidad de la carga, ensayos de degradación o también con la previsión de ciertos trastornos operacionales, ensayos de hinchamiento, etc.,

En otro aspecto hay determinadas propiedades complementarias en los componentes de la carga; tal es el caso - del índice de basicidad global que normalmente se forma con adiciones de fundente o bien incorporando un sinte-rizado superautofundente de índice de basicidad elevado 2,5 a 3 y aún mayor, que compense la naturaleza generalmente ácida de los minerales y pellets.

La determinación de las proporciones óptimas de sinterizados pellets y minerales en la carga, está en cierto modo condicionada por las capacidades de fabricación ó preparación individuales.

Por lo que se refiere a la capacidad de sinterización,

el tonelaje máximo que puede fabricarse con una instalación determinada está relacionada, en cierto modo, con las propiedades de resistencia, reductibilidad e índice de basicidad que deben incorporar al conjunto de las cargas.

Con éste cuadro general se comprende que las flexibilidades son numerosas, y la elección acertada depende de la información que pueda obtenerse del departamento de investigación y desarrollo. En lo que sigue nos proponemos hacer una breve revisión de los ensayos y criterios a aplicar, presentando los resultados obtenidos durante los últimos años y teniendo presente que la materia prima inicial son los minerales de hierro y que tanto los sinterizados como los pellets son productos derivados cuyas propiedades son función en algunos aspectos de las técnicas aplicadas en su fabricación.

La elección de materias primas férreas para el abastecimiento de la planta siderúrgica, ofrece como alternativas: minerales, sinterizados, pellets y sus mezclas. En los últimos años han sido frecuentes los cambios de actitud para definir las propiedades ideales de las cargas del horno alto. Parece demostrado que las marchas con 100 % de cada uno de los productos puros no son las más adecuadas por diversas razones; por tanto, queda como alternativa las mezclas de los mismos en distintas proporciones.

Obtener la carga ideal exige que toda ella esté preparada convenientemente del modo mas económico, para que , las condiciones específicas de una fábrica,proporcione:

Una producción de arrabio elevada.

Un consumo específico de coque bajo.

y

Una operación de los hornos altos, suave y libre de trastornos circunstanciales.

Aunque es difícil calcular los beneficios económicos que reportan los gastos extras de una preparación mas adecuada o avanzada en el sentido de aumentar las capacidades de sinterización o pelletización, resulta imprescindible su preparación integral para cumplir los objetivos marcados y se puede considerar que la base actual de sinterización tiene los siguientes problemas en una base moderna pero con posibilidades limitadas de aglomeración y pelletización:

- a).-¿Que minerales metálicos se deben elegir?
- b).-¿Que granulometrías han de tener?
- c).-¿Que propiedades químicas?
- d).-¿Cuáles han de ser sus propiedades físicas?

OBTENCION DEL HIERRO EN HORNO ALTO.

Un horno alto está formado por dos troncos de cono unidos por su base mayor. El cono superior que es el de mayor altura y se denomina cuba, tiene forma cónica para facilitar el descenso de la carga en el curso de la operación. El cono inferior se denomina atalages. En los primeros hornos altos se unían directamente por su base los dos conos (fig. 1-1), pero la práctica demostró que esa unión tendía a redondearse, y por eso actualmente la unión tiene lugar a través de una sección redondeada o cilíndrica que se denomina vientre.

El horno termina en su parte inferior en un cuerpo de sección cilíndrica cuya parte superior se denomina obra y la parte inferior crisol.

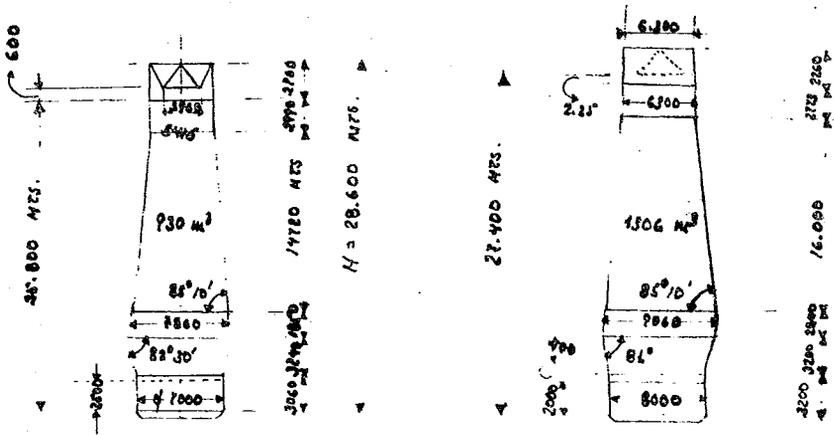
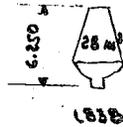
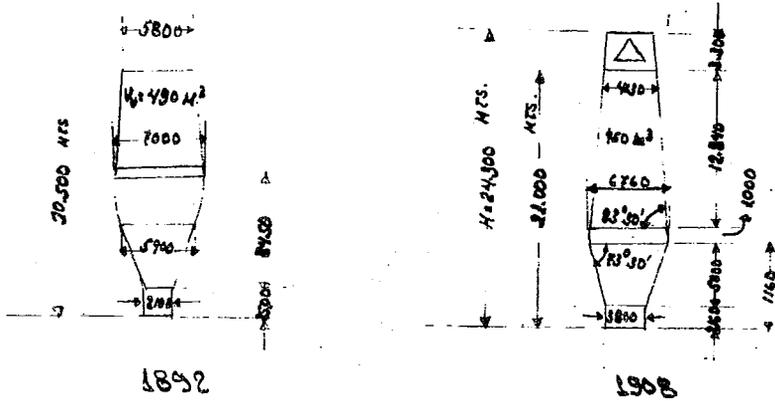
En la obra están situadas las toberas para inyectar el aire que activa la combustión del horno. En el crisol, que es donde se recoge el arrabio fundido y las escorias que flotan sobre él, hay uno o dos orificios denominados bigoterías o escoriales por donde sale la escoria fundida y otro más bajo denominado piquera, por donde sale el arrabio fundido. Los grandes hornos están provistos de un cañón de arcilla, para tapar la piquera al terminar la colada.

Todo el horno alto está recubierto interiormente por ladrillos refractarios con revestimientos de espesor variable según la sección y la capacidad del horno. Las paredes de los atalages, obra y crisol, están refrigerados por agua para prolongar la vida del refractario.

Una envolvente de chapa de acero con aros de refuerzo constituyen la infraestructura del horno.

La carga se realiza por su boca superior, que se denomina tragante, y que está provista de un dispositivo de cierre formado por dos campanas para evitar la salida a la atmósfera de los gases (fig. 1-2).

Figura 1-1 - Evolución del horno alto.



La campana pequeña se abre cada vez que sube la cubeta - del Skip descargando encima de la campana grande. Un - distribuidor reparte la carga automáticamente. Cuando - el nivel de la carga de los hornos ha bajado una altura determinada (2 o 3 metros en los grandes hornos) se para el suministro de aire, lo que ayuda al descenso de la - carga, y con la campana pequeña en posición de cerrado - se abre la campana grande cayendo la carga completa.

En el tragante están también situadas las tuberías de sa lida de los gases que los conducen a los depuradores y - después a las estufas de caldeo del aire, a los motores de gas, etc.

La gran altura de hornos modernos, que supera los 30 me- tors (fig. 1-7), tiene por objeto facilitar a los gases ascendentes la cesión de su calor sensible y facilitar - también al óxido de carbono (CO) la reducción indirecta del mineral.

La altura del horno alto podría reducirse, si en lugar - de trabajar con aire, que tiene cuatro volúmenes de gas inerte (nitrógeno) por uno de gas activo (oxígeno), se - trabajase con viento sobreoxigenado, como se está experi- mentando actualmente.

Completan la instalación del horno alto, además de los - silos para las materias primas (mineral, cok y fundentes), un mantacargas, las máquinas soplantes, las estufas recu- peradoras de calor y una instalación de depuración de ga ses.

MONTACARGAS

El montacargas en los hornos modernos, es generalmente - del tipo skip de plano inclinado, dotado de vagonetas - volcables (fig. 1-2), o cubos desfondables (fig. 1-3), - que se abren automáticamente sobre el tragante. En los hornos modernos no es necesario personal en la plataforma de carga, lugar muy peligroso por los gases que se - desprenden, pues la totalidad de la maniobra de carga se dirige desde abajo y se realiza casi automáticamente cuando descende el nivel de la carga en el horno a una altura determinada.

Figura 1-3 - Carga de horno alto por cubeta desfondable; a) cubeta desfondable; b) campana grande; c) campana pequeña; e) fondo desplazable de la cubeta.

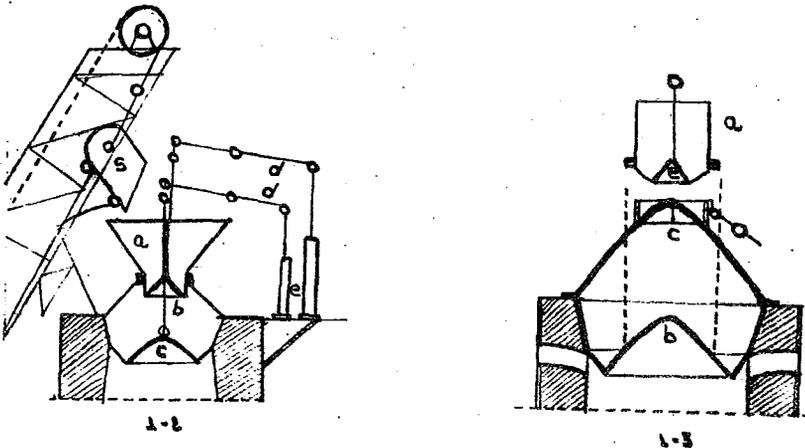


Figura 1-2 - Carga del horno alto por cubeta volcable; a) tolva; b) campana pequeña; c) campana grande; d) y e) accionamiento de las campanas; s) cubeta volcable.

MAQUINAS SOPLANTES

Las máquinas soplantes para inyectar el aire a presión en los hornos modernos están compuestas de una turbina de vapor y un ventilador centrifugo de tipo axial o radial.

Figura 1-4.- Sección de una máquina soplante Escher-Wyss, tipo -- axial.

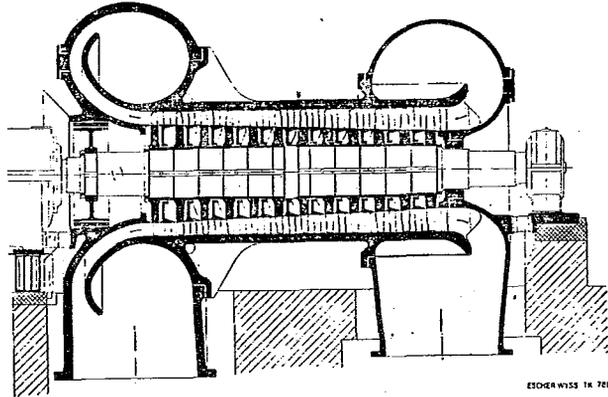
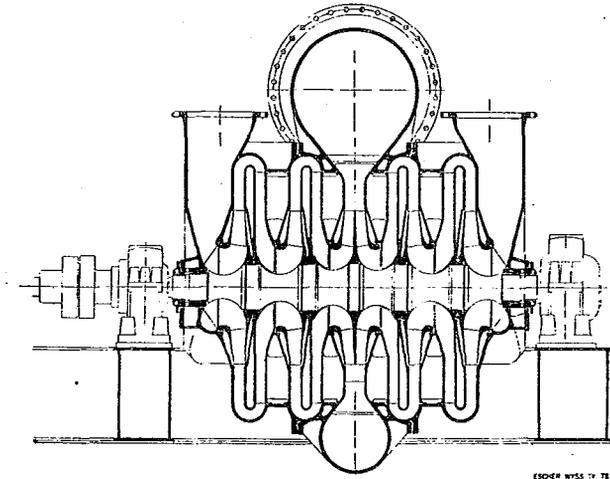


Figura 1-5.- Sección de una máquina soplante Escher-Wyss, tipo - radial.



ESTUFAS RECUPERADORAS DE CALOR

El caldeo de aire tiene lugar generalmente en estufas del tipo Cowper (Fig. 1-6) que son de forma cilíndrica hasta de 30 m. de altura y están formadas por una envuelta de acero revestida con ladrillo refractario. Cada estufa está provista de un quemador para el gas procedente del horno alto y un apilado de ladrillos refractarios entre cuyos huecos pasan los gases procedentes de la combustión calentándolos. Cuando la estufa está suficientemente caliente se corta la entrada de los gases y se hace pasar el aire en sentido contrario caldeándose al contacto de los ladrillos. Un horno alto tiene en general tres estufas, dos de las cuales están "en gas" (en caldeo) y una "en viento".

La estufa "en viento" se cambia cada media hora aproximadamente. La temperatura a que se caldea el aire es de 650° a 750°, pero en las instalaciones modernas se llega a los 1.000° y 1.200° C.

Figura 1-6 - Sección convencional de una estufa recuperadora de calor tipo Cowper.

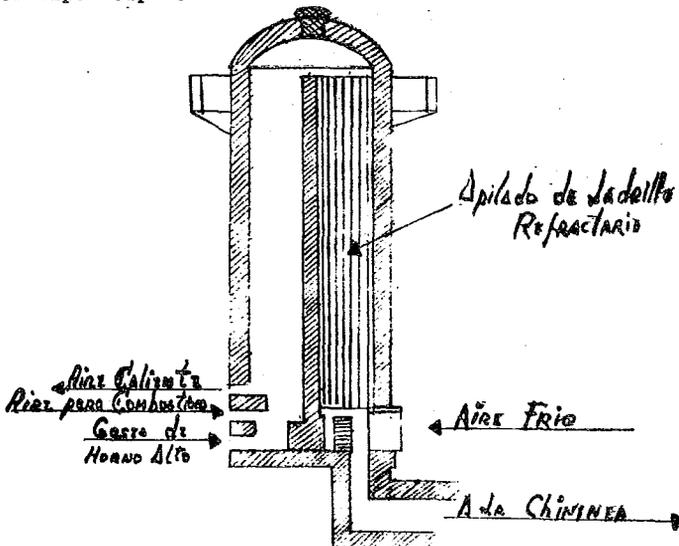
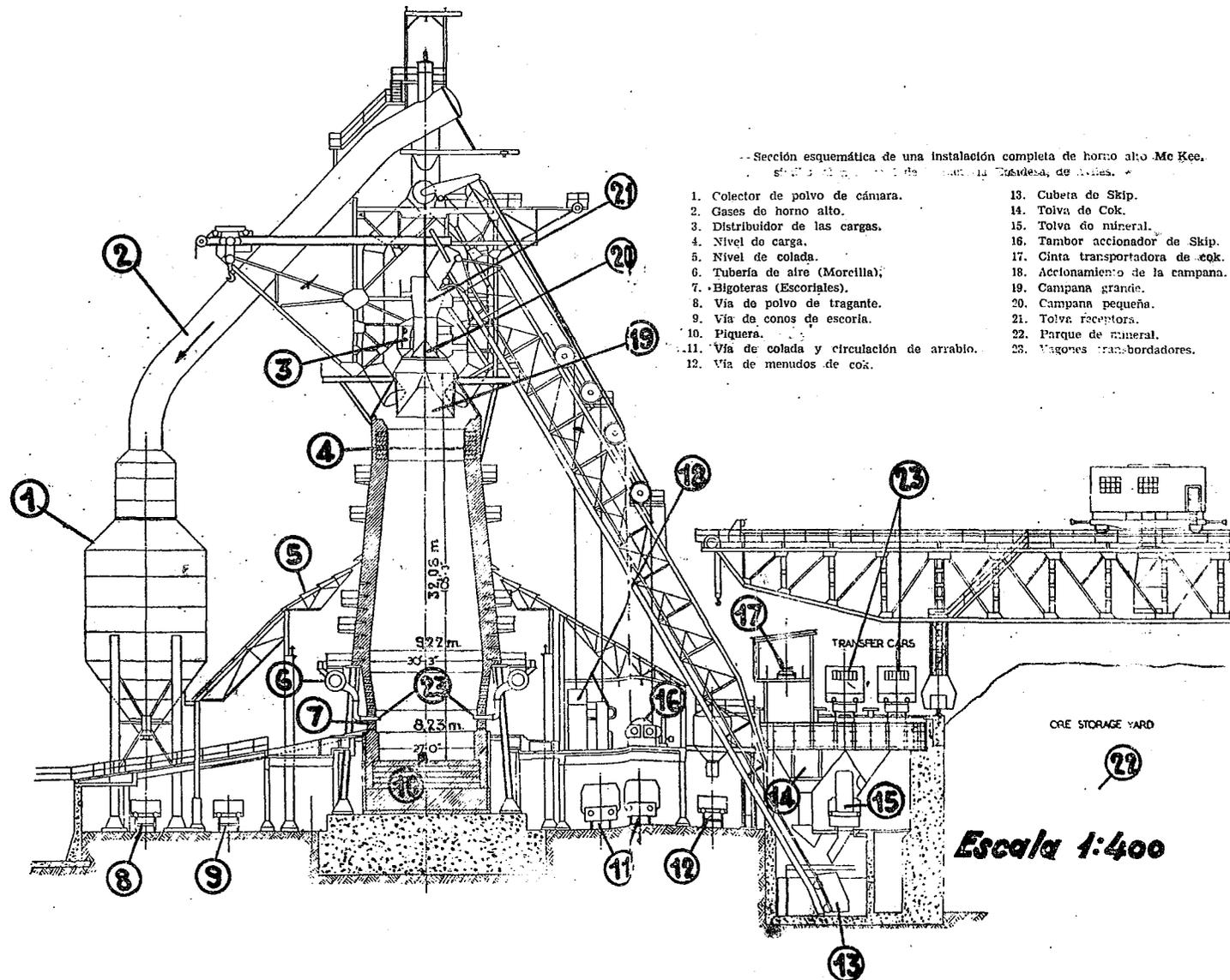


Figura 1-7 - Sección esquemática de una instalación completa de horno alto McKee.



CARGA DEL HORNO ALTO.

Los hornos altos se cargan con capas alternadas de mineral, de cok y fundente. A veces los fundentes van mezclados con el mineral. Si se dispone de instalaciones de sinterizado, como es normal en las grandes factorías, se carga también sinterizado.

La carga del horno va descendiendo a medida que transcurre la operación y se hacen coladas de arrabio y escorias, tardando de 8 a 10 horas en obtenerse el metal, desde que se carga el mineral. En cuanto el nivel desciende de una altura determinada (de 2 a 3 m.), se introduce una carga de relleno; que se había ido situando sobre la campana grande de cierre del tragante.

El mineral debe ser de tamaño comprendido entre 10 y 16 milímetros para que su superficie sea la mayor posible y facilitar así su reducción indirecta con el óxido de carbono (CO).

El sinterizado se compone de polvo de mineral y de cok y de cenizas procedente de la tostación de piritas y carbonatos de hierro si los hay.

El combustible generalmente empleado es el cok metalúrgico. Dada la altura de los hornos altos, el cok debe tener buena resistencia mecánica del orden de los 160 kg. por cm^2 para resistir sin pulverizarse grandes cargas. No debe contener materias volátiles que podrían aglomerar los materiales en el horno. Debe ser poroso para facilitar su combustión. El poder calorífico del cok metalúrgico es del orden de 7,000 Kcal. por kg. conteniendo alrededor de 15% de cenizas generalmente siliciosas. Su densidad es de 0,5 aproximadamente.

El tamaño más empleado es de 30 a 60 mm.

El carbón vegetal se emplea, sobre todo, en Suecia, para obtener aceros de alta calidad exentos de azufre, ya que el cok aporta un 1% de azufre al arrabio en forma de sulfuro. El carbón vegetal además de su alto precio tiene el inconveniente de que es muy friable y no resiste grandes cargas, por lo que los hornos que emplean carbón vegetal son de menor altura que los que emplean cok.

CUADRO NUM 1-8

ENTRADA Y SALIDA DE MATERIAL EN HORNO ALTO

Materiales que entran		Materiales que salen	
Mineral	2 t.	Lingote	1 t.
Cok	1 t.	Escorias... ..	0.5 t.
Caliza.	0.5 t.	Gases... ..	6 t.
Aire... ..	<u>4 t.</u>	Total..	<u>7.5 t.</u>
Total.	7.5 t.		

Los fundentes tienen por objeto dar a la escoria fluidez necesaria. Una escoria viscosa cuela difícilmente y en cambio una escoria demasiado flúida corroe las paredes del horno. La fluidez depende de la fusibilidad, y ésta de la proporción en que se encuentren los principales elementos que componen la escoria: la sílice, la alúmina y la cal.

Si en la ganga predomina la sílice, como generalmente ocurre, se dice que es ácida, y entonces el fundente empleado es la caliza o castina (CO_3Ca), y la dolomía ($\text{CO}_3\text{Ca}, \text{CO}_3\text{Mg}$).

La caliza (CO_3Ca) contiene teóricamente 56% de cal (CaO) y teniendo en cuenta las impurezas, la cantidad de caliza que se cargará aproximadamente será doble peso del de la cal necesaria. Una composición típica de caliza es la siguiente:

$\text{CaO}=53,74\%$,, $\text{P}=0,010\%$,, $\text{S}=0,096\%$,, $\text{H}_2\text{O}=0,20\%$
Residuo insoluble = 1,40%

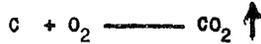
La dolomita se emplea menos, como fundente que como revestimiento refractario de carácter básico. A veces se añade, sin embargo, a la carga del horno alto para dar más fluidez a la escoria.

Si la ganga de fusión es básica y por tanto el lecho de fusión resulta demasiado básico se agrega anhídrido silícico, a ser posible en forma de escorias ácidas de horno de acero, lo que permite recuperar el metal que contengan. También puede añadirse la sílice en forma de cuarzo o arena.

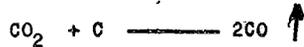
Las proporciones aproximadas con que se cargan el mineral, el cок y la caliza, y el aire necesario por tonelada de lingote obtenido, son las del cuadro número 1-8.

FUNCIONAMIENTO DEL HORNO ALTO

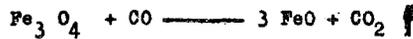
El oxígeno del aire que entra por la toberas atraviesa - la masa de cok incandescente y dada su gran velocidad al principio se forma sólo anhídrido carbónico:



Aproximadamente a un metro de distancia de la boca de - las toberas (fig. 1-9), se habrá acabado el oxígeno y el gas estará formado íntegramente por CO_2 que al contacto con el carbón incandescente, queda reducido con arreglo a la siguiente reacción:

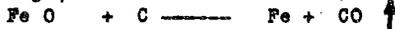


En su marcha ascendente a través del horno, el CO, reacciona con los óxidos de hierro:



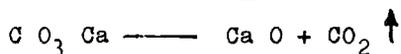
Estas reacciones constituyen la denominada reducción indirecta y tiene lugar entre los 400° y 700° aproximadamente. La reducción indirecta reduce aproximadamente del 85 al - 90% del oxígeno del mineral en una marcha de fundición básica.

Además, los óxidos de hierro son también reducidos al contacto con el carbono sólido incandescente, entre las temperaturas de 700° a $1,350^\circ$ con arreglo a las siguientes - reacciones, que constituyen la denominada reducción directa:

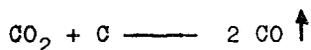


La reducción directa constituye aproximadamente el 10 al - 15% del proceso total de reducción del mineral.

En esta misma zona de reducción directa, tiene lugar también la descomposición del carbonato de cal, que empieza a unos 800°, según la reacción siguiente:



El anhídrido carbónico (CO₂) formado es reducido por el carbón:



Y el monóxido de carbono (CO) asciende a las capas superiores para contribuir a la reducción indirecta del mineral. Parte del hierro formado se carbura desde temperaturas de 800°, según la reacción:

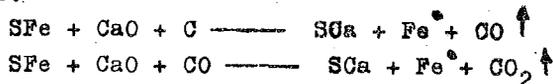


El carburo de hierro se diluye en el resto del metal.

La formación del carburo es muy útil para bajar la temperatura de fusión del hierro, que puro es de 1.539°, hasta la de fundición de hierro, que es de unos 1.200°.

Sin embargo, la temperatura en la zona de fusión es de unos 1.500°C en marcha básica, debido a que las escorias necesitan esta temperatura como mínimo para que cuelen libremente.

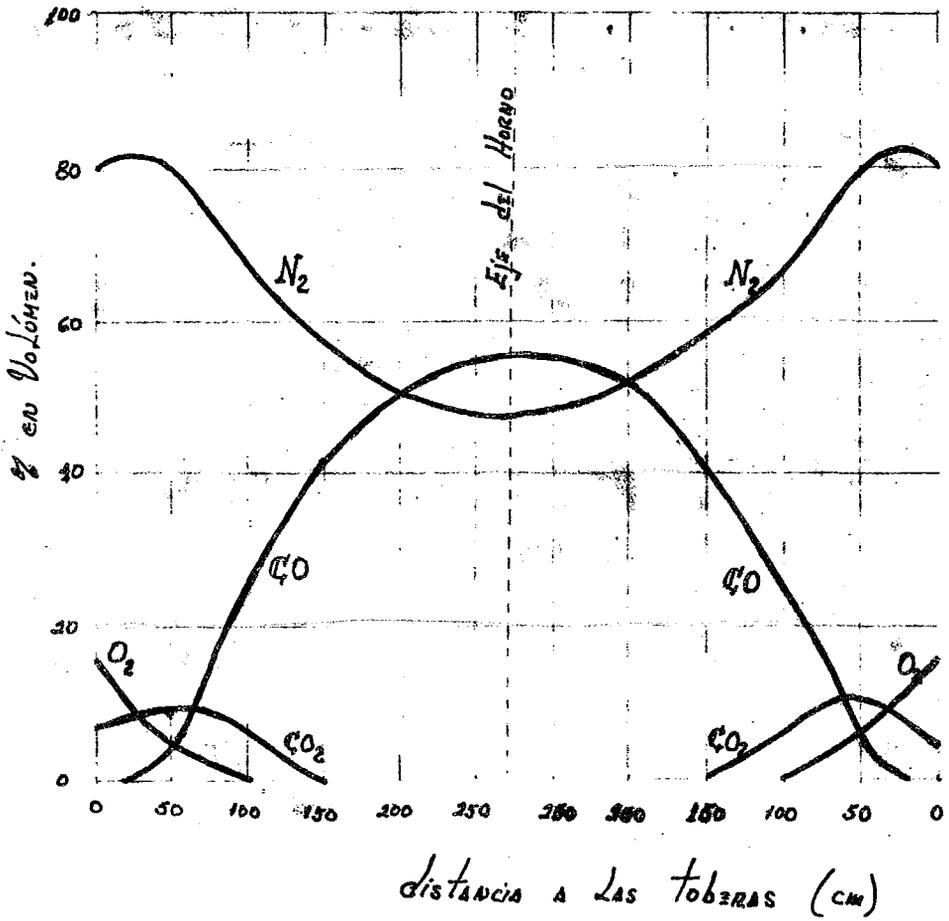
Además de las reacciones anteriores, que son las principales, tienen lugar otras secundarias como las de desulfuración del arrabio, del azufre aportado principalmente por el cok, por medio de la cal, con arreglo a las siguientes reacciones.



Como el sulfuro de calcio (SCa) es insoluble en la fundición, pasa a la escoria.

También tiene lugar la desfosforación del arrabio con arreglo a un proceso similar.

Figura 1-9. - Composición de los gases en el interior de un horno alto.



En resumen, teóricamente puede dividirse verticalmente, de arriba a bajo, un horno alto en funcionamiento en 7 zonas (fig. 1-10).

Zona de deshidratación, cuyas temperaturas están comprendidos entre los 200° y 400° aproximadamente, donde tiene lugar la desecación de la carga.

Zona de reducción indirecta, desde 400° a 700°, donde - tiene lugar la reducción del oxígeno del mineral, por me dio de monóxido de carbono (CO).

Zona de reducción directa, de 750° a 1.350°, en la que - tiene lugar la reducción del oxígeno del mineral directa mente por el carbono incandescente.

Zona de fusión y carburación, donde tiene lugar la fusión y carburación del hierro formado.

Zona de combustión y desulfuración, en la que se alcanzan temperaturas cercanas a los 2,000° y es la zona donde se encuentran las toberas.

Zona de colado de escorias, donde se encuentran éstas - flotando sobre el metal.

Y, por fin, la zona de colada de arrabio.

Las reacciones expuestas dan una idea bastante aproximada de la marcha del horno alto. Sin embargo, se ha de advertir que la marcha real no se ajusta exactamente a ningún esquema determinado. En primer lugar no puede dividirse realmente el horno en zonas como lo hemos hecho, ya que en un mismo plano horizontal existen distintas fases, entre otras razones porque las temperaturas son más elevadas - en el centro del horno que en la periferia.

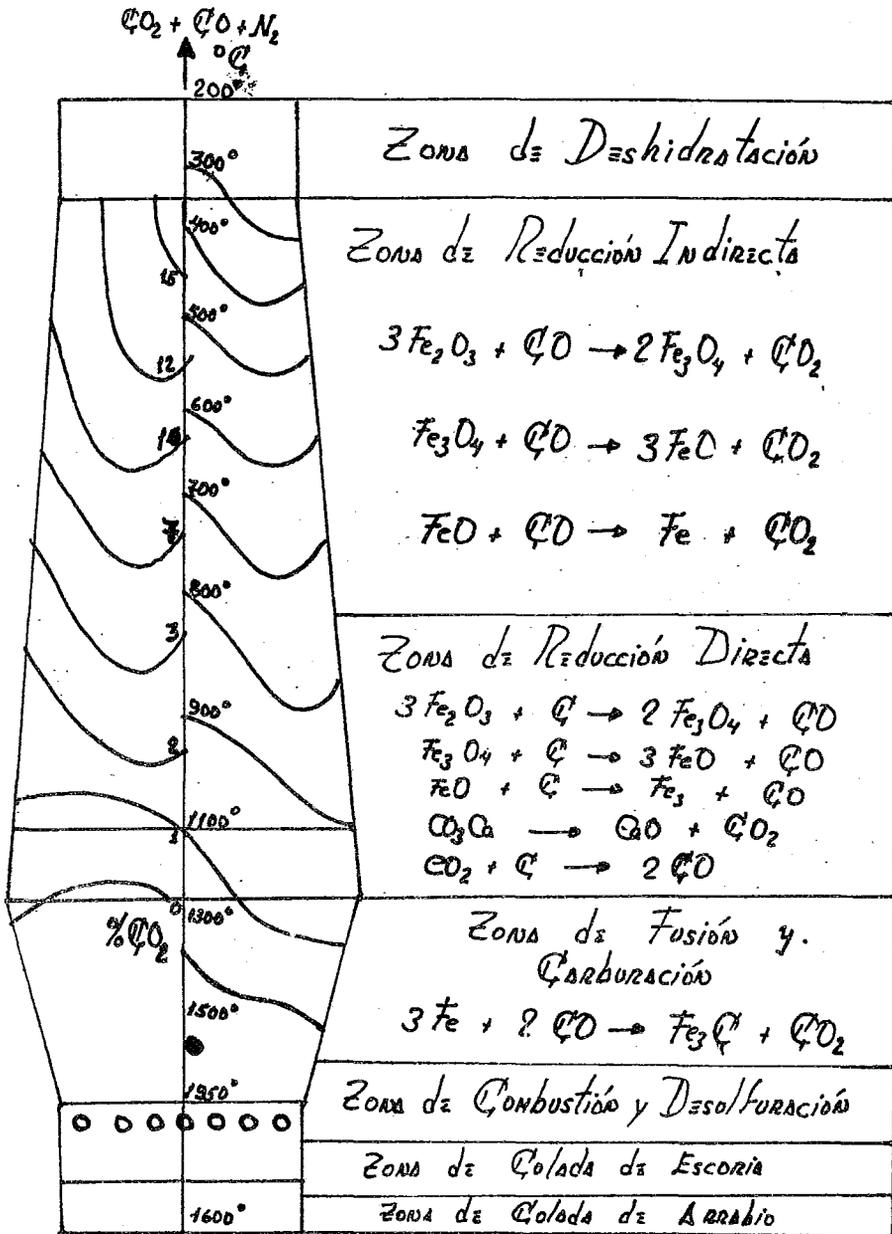


Figura 1-10 - Esquema de funcionamiento y reacciones de un Horno Alto.

Figura 1-11 - Diagrama Chaudron, sobre la evolución de las fases FeO , Fe_3O_4 y Fe_3C según la temperatura y concentración de CO_2 .

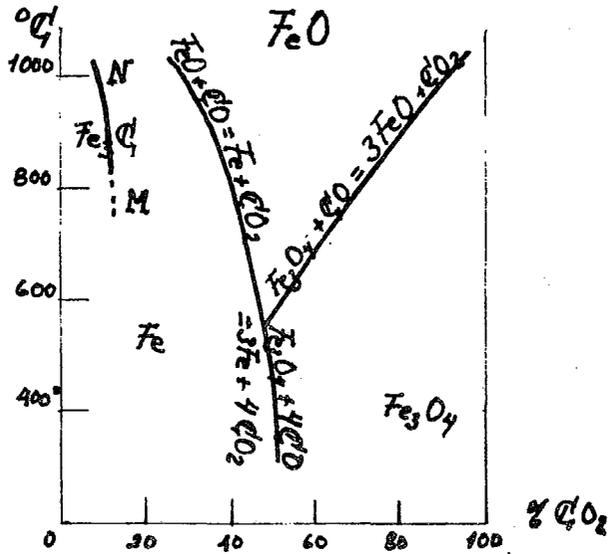
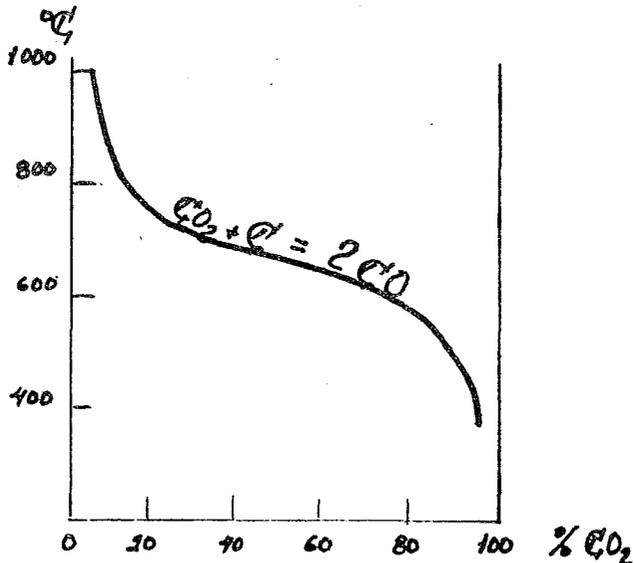


Figura 1-12 - Diagrama de Baudouard sobre la evolución de la reacción $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$, según la temperatura y concentración de CO_2 .



Además, las reacciones de reducción, tanto directa como indirecta, son todas reversibles y se verifican en un sentido o en otro, según la temperatura y concentración de los diversos elementos.

Se han propuesto diagramas para estudiar la evolución de los sistemas, como los de Boudouard, Chaudron, etc., pero sólo tienen un interés teórico, ya que las condiciones de equilibrio inicial de que parten no se verifican en la práctica en el horno alto. (Figuras 1-11 y 1-12)

EL HIERRO

El hierro se conoce desde los más remotos tiempos, habiendo dado el nombre a toda una época de la prehistoria: La Edad del Hierro. Al principio se cree que se fabricarían los utensilios del hierro sideral encontrado en los meteoritos que hace 50,000 años o más debieron de caer con más frecuencia que en la actualidad sobre la tierra.

Sin embargo, en las pirámides de Egipto, de 7,000 años antes de Jesucristo se han encontrado amuletos de hierro que probablemente provienen de minerales beneficiados de una manera similar a como se hace ahora, pero más rudimentariamente. En la Biblia son frecuentes las alusiones al hierro, y en el Deuteronomio, 3-V-II, se lee que el Rey - Og de Bashan, durmió en cama de hierro de 9 codos de larga, por 4 de ancha.

En la India, existe en la ciudad de Delhi, una columna de hierro que data del año 912 antes de Jesucristo, que mide 7 metros de altura y 40 cm. de diámetro con un peso de 6t. y que ha resistido perfectamente el paso de los siglos sin oxidarse.

La fabricación del acero partiendo del hierro también es muy antigua, y los griegos, 500 años antes de Jesucristo, ya conocían la obtención y el temple del acero. Se supone que de una manera casual, al dejar algún trozo de hierro en contacto con carbón de leña, se carburó la superficie adquiriendo mayor dureza. Se cree que las primitivas espadas se formaron con trozos de hierro cementado, forjadas y reforjadas hasta que los granos de cementita quedaban incluidos en toda la masa.

La verdadera época del acero, sin embargo, no comienza hasta 1856, fecha en que Bessemer da a conocer su famoso procedimiento para fabricar acero con rapidez y en grandes cantidades.

PROPIEDADES FISICAS DEL HIERRO

Punto de fusión	1 539 - °C. (2 800° F.)
Punto de ebullición	2 740°C. (4 964°F.)
Densidad	Laminado en caliente 7.87 g/cm.
Conductividad calorífica	0.19 cal./(seg.) (cm ²) (°C./cm)
Conductividad eléctrica a 20-25°C	100 000 microhmios/cm ³
Módulo de elasticidad de Young	2 109 000 Kg/cm ²
Resistencia a la tracción	2 460-2 810 Kg/cm ²
Límite de elasticidad	700-1 400 Kg/cm ²
Alargamiento en 2 pulgadas a 20°C	20.45%
Reducción de área	70.90%
Dureza Brinell	50-70
Resistencia al choque (barra con muesca Izod)	0.442 Kg
Resistencia al deslizamiento plástico 300°C	1 195 Kg/cm ²
400°C	844 Kg/cm ²
600°C	176 Kg/cm ²
Dilatación térmica por grado centígrado	
100°C	0.0000126
300°C	0.0000146
600°C	0.000016

Calor específico

100°C

0.12 cal./gramo

500°C

0.16 cal./gramo

770°C

0.32 cal./gramo

900°C

18.5 cal./gramo

Resistividad9.8 microhmios/cm³**Permeabilidad máxima**

280 000

Templabilidad

El hierro muy puro sólo puede endurecerse por fuerte enfriamiento extraordinariamente rápido

MINERALES DE HIERRO

El hierro es de los metales que más abundantemente se encuentran en la naturaleza, constituyendo más del 15% de la corteza terrestre, pero rara vez se encuentra puro, - sino formando parte de numerosas rocas y combinado principalmente en forma de óxido, de carbono y de sulfuro. Los principales minerales que se utilizan para la obtención del hierro son los siguientes:

		<u>% de Fe</u>
1	OXIDOS	
1-1	OXIDOS FERRICOS ANHIDROS.	
	a) Hierro oligisto Fe_2O_3	70
	b) Hematites roja Fe_2O_3	70
1-2	OXIDOS FERRICOS HIDRATADOS	
	a) Hematites parda $2Fe_2O_3, 3H_2O$	60
	b) Limonita $2Fe_2O_3, 3H_2O$	60
	c) Hematites oolítica $2Fe_2O_3, 3H_2O$	60
1-3	OXIDOS FERROSOS FERRICOS	
	a) Magnetita Fe_3O_4	72,4
2	CARBONATOS	
	Siderita CO_3Fe	48,3
	Esferoidita CO_3Fe	48,3
3	SULFUROS	
	Pirita de hierro S_2Fe	46,6
	Calcopirita S_2FeCu	30,5

De los minerales de hierro, los más interesantes son los óxidos. Los carbonatos, de contenido de hierro inferior (48,3% teórico máximo), deben tostarse para reducirlos a óxidos y aumentar su ley. De los sulfuros se obtiene el hierro como un proceso accesorio de la fabricación del ácido sulfúrico a partir de la pirita de hierro (S_2Fe), y del beneficio del cobre a partir de la calcopirita (S_2FeCu).

HIERRO OLIGISTO, (Fe_2O_3).-- Se presenta cristalizado en romboedros de color negro brillante. Es la especie mineralógica fundamental de la que las hematites son variedades amorfas. Se encuentra este mineral en la isla de Elba y en Rusia, principalmente.

HEMATITA ROJA (Fe_2O_3).— Es amorfa. Se presenta en masas fibrosas o melonadas en grandes depósitos. Es el mineral de hierro más abundante. Se encuentra éste mineral en España, Normandía, Argelia, Túnez y en el Lago Superior de Norteamérica, que provee las cuatro quintas partes del consumo americano de mineral de hierro. Hay una variedad denominada Hematita Roja colítica formada por granos como los de la hematita parda colítica.

CUADRO NUM. 1-13

COMPOSICION MEDIA DE HEMATITA ROJA EN %

	Fe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Mn
EE.UU.	60,50	8,80	1,90	0,20	0,50	0,30
INGLATERRA	63,80	4,90	0,60	0,20	0,40	0,20
RUSIA	65,80	3,20	3,70	0,50	0,20	0,10

HEMATITA PARDA ($2\text{Fe}_2\text{O}_3, 3\text{H}_2\text{O}$).— Es de color pardo cuando se presenta pura. Se encuentra principalmente en Rusia.

LIMONITA ($2\text{Fe}_2\text{O}_3, n\text{H}_2\text{O}$).— Las últimas investigaciones sobre éste mineral revelan la existencia de cinco variedades de limonita que responden a la fórmula general ($2\text{Fe}_2\text{O}_3, n\text{H}_2\text{O}$), como son la turjita ($2\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$), la goetita ($\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$), la hidrogoetita ($3\text{Fe}_2\text{O}_3, 4\text{H}_2\text{O}$), la xantosiderita ($\text{Fe}_2\text{O}_3, 2\text{H}_2\text{O}$) y la limonita propiamente dicha ($2\text{Fe}_2\text{O}_3, 3\text{H}_2\text{O}$), que es la más importante.

La limonita es un producto de la oxidación y ataque del aire atmosférico sobre otros compuestos de hierro.

La limonita es un producto de color amarillo oscuro muy parecido al de hematita parda, por lo que a veces se confunde o identifica con ella. Se encuentra en los Pirineos y en el fondo de los antiguos lagos de Suecia y Finlandia.

HEMATITES OOLITICA ($2\text{Fe}_2\text{O}_3, 3\text{H}_2\text{O}$).— Aunque exista la variedad citada de hematites roja oolítica, si no se especifica otra cosa se entiende por hematites oolítica a la variedad parda. Está constituida por pequeños granos de diámetro inferior a un milímetro, aglutinados por un cemento calcáreo silíceo o arcilloso.

MAGNETITA (piedra imán) (Fe_3O_4).— Se considera también formada por óxido ferroso y óxido férrico de fórmula $\text{FeO}, \text{Fe}_2\text{O}_3$ ó también de fórmula $(\text{FeO})_2 \text{Fe}$, ó sea, metaferrito - ferroso. Es el mineral más rico en hierro, pues lo contiene en un 72,4 %, si es puro, pero el más difícil de tratar por una ganga, que generalmente le acompaña. Se encuentra en los Urales, en Suecia, en Argelia, etc.

CUADRO NUM. 1-14

COMPOSICION MEDIA DE MAGNETITAS EN %

	Fe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Mn
Argelia	62,50	5,30	0,50	0,60	0,10	1,10
Grecia	62,30	5,30	0,60	0,50	1,20	3,00
Urales	64,70	2,50	2,00	0,70	1,00	1,00

SIDERITA, o siderosa, o hierro espático (CO_3Fe).— Cuando está puro — tiene una riqueza en hierro de 48,3 %. Cristaliza en el sistema romboédrico. Es blanco, ligeramente amarillo. Su densidad media es de 3,5. Al calor crepita y se transforma en óxido ferroso (FeO), operación — que se realiza siempre antes de su carga en horno alto, El aire húmedo lo convierte en óxido férrico hidratado, y, por tanto oscurece el color aproximándose al de la limonita. Se encuentran yacimientos de siderita en España, Francia, Inglaterra, Estados Unidos, etc.

ESFEROCIDITA.- Es también carbonato de hierro (CO_3Fe), - distinguiéndose de la siderita en que no se presenta perfectamente cristalizado, sino en forma de granos y de ahí su nombre. En general se encuentra muy mezclado con materias terrosas, en las que predomina la arcilla y entonces presenta un color pardo o gris. Esta variedad se encuentra en Inglaterra, Alemania y Estados Unidos.

A veces se encuentra en yacimientos de hulla y entonces tiene color negro, abundando esta variedad en Inglaterra, donde es conocida con el nombre de black band.

PIRITA DE HIERRO (S_2Fe).- De riqueza teórica 46,6%. Cristaliza en el sistema cúbico. Es de color amarillo latón, su densidad varía de 4,9 a 5,2. La pirita de hierro se encuentra frecuentemente asociada a piritas cuprosas. La marcasita es una variedad de la pirita que cristaliza en el sistema ortorrómbico, y es de color amarillo pálido y densidad de 4,6 y 4,8. De las piritas de hierro se benefician las cenizas procedentes de su tostación previa para eliminar el azufre en forma de anhídrido sulfuroso (SO_2).

España es uno de los países más ricos del mundo en pirita de hierro, calculando que posee unas reservas de 735 millones de toneladas, es decir, aproximadamente la mitad de las reservas mundiales, estimadas en 1,300 millones de toneladas. Se extraen más de 2,000.000 de toneladas, exportándose en parte y utilizándose el resto principalmente para la fabricación de ácido sulfúrico, siendo las cenizas ferrosas un subproducto del que se extrae el hierro sintierizándolas con el polvo de cok y polvo de otros minerales.

La riqueza en hierro que se ha dado para todos los minerales es la teórica, pero en la práctica es siempre menor, porque los minerales no se encuentran puros, sino que se extraen impurificados por otros elementos generalmente rocosos, que constituyen la ganga, formada principalmente -

CUADRO 1-15

COMPOSICION MEDIA DE CARBONATOS DE HIERRO EN %

	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Mi	S°yP°
Siderita	35 a 50	4 a 16	1 a 6	1 a 8	0,5 a 6	2 a 10	
Esferoiditas grises ..	30 a 40	10 a 25	1 a 10	1 a 10	1 a 5	0,5 a 5	0 a 1
Esferoiditas negras ..	32 a 50	8,50	1,80	2,40	0,90		0,30

por sílice (SiO_2) alúmina (Al_2O_3), cal (CaO), magnesia (MgO) y pequeñas cantidades de azufre, manganeso y fósforo.

Si predomina en la ganga la sílice, se dice que es ácida y si son las bases las dominantes, la ganga se considera básica. El conjunto de mineral y ganga, se denomina - mena.

Actualmente se explotan las menas de riqueza superior al 25% en hierro.

COMBUSTIBLES

Desde la antigüedad se conoce al carbón mineral como - una de las fuentes de energía calorífica más importantes, llegándose a convertir en el combustible más utilizado - durante el desarrollo de la civilización moderna. El valor e importancia de este mineral hace que los países intenten aprovechar en gran escala sus reservas carboníferas.

La más antigua noticia que se tiene del carbón mineral - se encuentra en la Biblia, señalándolo como combustible en los años 980 A.C. También el pueblo chino conoció el "carbón fosus" y sus usos, sabiéndolo explotar y aplicar en la cocción de la porcelana y en el alumbrado, con el gas inflamable que se genera del carbón espontáneamente.

Los griegos y los romanos conocieron este combustible - con el nombre de Lithantrax (carbón de piedra). Teofras to, discípulo de Aristóteles, ya habla de este mineral - en su Tratado de las Piedras.

En cuanto a la explotación moderna de los mantos carboníferos, su iniciación fue en las minas británicas, alcanzando una alta organización en el siglo XVI, llamando a este mineral "carbo marinus", sin duda alguna a causa de su posición litoral y localización submarina de los mantos, o tal vez porque se transportaba por mar.

Por la misma época, Bélgica inicia también la explotación de sus minas llamándole al mineral "hulla", en recuerdo del mariscal herrero "Huillos" que se cree vivió en el siglo XII.

Generalmente se ha definido al carbón mineral como una -

roca de origen orgánico que se formó por un proceso de alteración y compactación de helechos, licopodios fanerógamas, coníferas, etc., y en algunos casos de restos de animales que otorgan marcada influencia en su calidad y cantidad.

(El carbón ocurre en tres formas alotrópicas: Amorfo, con una densidad de 1.8 a 2.1; grafito con densidad de 2.25 y diamante con densidad de 3.15. Su número atómico es de 6 y su peso atómico es de 12.010, poseyendo 6 isótopos.

Sus principales elementos que lo componen son los mismos que forman la madera y demás materia vegetal; carbono, hidrógeno y oxígeno, junto con pequeñas cantidades de azufre y nitrógeno así como otros elementos característicos de la materia inorgánica.

Las materias volátiles que contiene el carbón, como son bióxido de carbono, monóxido de carbono, metano y compuestos aceitosos (alquitrán y brea) que a su vez contienen ácido nítrico, amoníaco, toluolbenzol, tolueno, xileno, naftas, creosota, etc.; son el factor más importante para su clasificación.)

La necesidad de satisfacer los requerimientos de productores, consumidores, técnicos y en general todos los que manejan carbón, ha provocado que hayan sido propuestos gran número de sistemas de clasificación. La relación entre carbono fijo y las materias volátiles, es el factor más importante para una buena clasificación, diferenciándose rangos y calidades, según sea la cantidad de impurezas que contengan.

La clasificación por rangos quedaría de la siguiente manera:

CARBON MINERAL

I.- DE ALTO RANGO

- 1.- Antracítico
 - a).- Meta - Antracita
 - b).- Antracita
 - c).- Semiantracita
- 2.- Bituminoso
 - a).- De volatilidad baja
 - b).- De volatilidad media

II.- DE BAJO RANGO

- 1.- Bituminosos de volatilidad alta
- 2.- Sub-bituminosos
- 3.- Lignitos
- 4.- Turbas
 - a).- Fresca
 - b).- Seca

Aquellos carbones minerales que tienen un alto contenido de carbono fijo y muy bajo de materia volátil, se denominan meta-antracitas o antracitas.

En el extremo opuesto de la escala, se encuentran los carbonos que contienen relativamente poco carbono fijo y altos porcentajes de materias volátiles, denominándose lignitos y turbas. En posición intermedia, se encuentran los carbonos llamados carbonos semi-bituminosos, bituminosos y sub-bituminosos. Sobre estas bases existen tres clasificaciones; la del A.S.T.M., la de Ralston y la de Parr; la primera es seguida en los Estados Unidos desde 1938 y fue propuesta por la Americas Standards Association y la America Society For Testing Materials.

Esta clasificación (A.S.T.M.) utiliza para los carbones de alto rango el contenido de carbón fijo y materia volátil sobre base seca y libre de cenizas y para los de bajo rango el poder calorífico sobre base húmeda y libre de cenizas, señalando además, las características de aglomeración y deterioración de los carbones.

El uso principal de la Antracita es en la fabricación de coque, sin embargo, tuvo gran utilidad en épocas pasadas como combustible, siendo este tipo el que mayor empleo y demanda tenía hasta fines del siglo XIII. En la actualidad se está volviendo a usar intensivamente como combustible, principalmente en la producción de energía eléctrica, en usos domésticos, como reactivo químico y empleado ampliamente en la reducción de otros minerales.

El carbón bituminoso es el más importante de los rangos de carbón por ser el más extensamente usado, tiene color negro o gris, aspecto brillante o resinoso, fractura cúbica químicamente no es afectado por la intemperie, quema con llama amarillenta desprendiendo fuerte olor bituminoso. Su poder calorífico fluctúa entre 4500 y 8500 kilocalorías.

Los carbones usados igualmente para la fabricación de coque son los bituminosos, a excepción de la sub-clase alto en materia volátil que no aglomera y los sub-bituminosos. Según esto puede clasificarse el carbón bituminoso en dos grupos: coquizable y no coquizable.

El uso principal del carbón bituminoso es en la producción de coque que se emplea en la industria siderúrgica, como reductor del oxígeno contenido en el mineral de hierro, dando origen al arrabio o hierro de primera fusión que al ser afinado se convierte en acero. De su destilación se obtiene gran número de productos derivados que -

tienen aplicación en la industria química y de fertilizantes, siendo los principales el benzol, toluol, glicol, niftaleno, fenol, crisol antraceno, creosota, amoníaco y brea.

COQUE

La designación de un carbón como coquizable o no coquizable depende de su comportamiento cuando es calentado en ausencia de aire.

Si el carbón se funde y se solidifica formando una masa más o menos sólida, se le clasifica como carbón coquizable, si se desmorona al calentarlo o forma masa débilmente coherente se le clasifica como no coquizable.

En vista que es difícil obtener un solo carbón que posea todas las características deseadas, se realiza una combinación de carbones con bajo y alto contenido de materias volátiles para lograr un equilibrio de las propiedades de expansión y de densidades brutas, y así asegurar un coque con estructura porosa que se queme rápidamente y tenga al mismo tiempo la resistencia suficiente para soportar la carga de alto horno, ya que ésta es su principal finalidad.

Otros factores que influyen en las propiedades del coque son: la fineza del carbón con que se cargan los hornos, la densidad de las cargas el diseño y dimensiones del horno, la temperatura de coquización y la velocidad de coquización.

La preparación y lavado del carbón para realizar la coquización generalmente se hace de la siguiente manera: el carbón extraído de las minas es separado en diferentes tamaños, conforme a un orden que va de trozo, huevo o nuez, garbanzo y polvo fino.

Antes de cargar los hornos con carbón, este elemento se prepara a tamaños apropiados lavándose solamente los car

bonos con alto contenido de cenizas y azufre, a fin de reducir la cantidad de materias minerales y el mismo azufre que contienen, además de eliminar diversas impurezas tales como partículas de hierro y madera. La importancia de este lavado ha aumentado al disminuir el suministro de carbones bajos de cenizas y azufre.

El carbón, así obtenido, es mezclado y molido para ser almacenado en tolvas que se encuentran sobre uno de los extremos de la batería de hornos y de ahí ser transportado a los mismos hornos en carros distribuidores.

Los hornos de coquización son llamados hornos de colmena en vista que adoptan esa forma al tener sus cámaras de ladrillo refractario en construcciones con techo cóncavo.

Un horno típico tiene unos 3.00 m. de diámetro, cargándose se con 5 a 7 toneladas de carbón en una capa uniforme de 45 a 60 cm. sobre el piso, estando provistos de una puerta lateral y una salida de gases en el techo. Las construcciones están hechas en hilera, un horno junto al otro, formando una batería que se encuentra localizada frecuentemente en las inmediaciones de las explotaciones carboníferas.

La carga se realiza por la abertura que tienen en la parte superior de la cúpula, iniciándose en los hornos alternados, en tanto que los hornos intermedios están trabajando y pasando calor a través de las paredes de separación, encendiendo de este modo la carga del horno adyacente. La entrada del aire se permite únicamente en cantidad suficiente para que la temperatura suba al punto deseado.

Casi inmediatamente después de la carga, el gas se desprende del carbón, ardiendo en el espacio vacío del horno.

Por una parte, los gases no quemados y los productos de combustión escapan a la atmósfera por la salida del techo, y por la otra, el carbón se va aglomerando y fundiendo, entre 48 y 72 horas de combustión. El coque de mayor tiempo de coquización es duro y de mejor calidad.

Al terminar este proceso de coquización, el producto incandescente es apagado por medio de chorros de agua para que pueda ser retirado y llevado a los diferentes carros colocados frente a las baterías.

El coque producido en estos hornos de colmena es considerado de excelente calidad para un alto horno, siendo duro, pesado y con una superficie de lustre metálico. Existen únicamente algunas desventajas en cuando a las características que poseen los propios hornos de colmena, como son su pequeña capacidad, sus grandes pérdidas de calor, el no recuperar los subproductos, bajo rendimiento (60-65%), gran tiempo de coquización, y el hecho de requerir carbones coquizables de muy alta calidad.

También se utilizan otros tipos de hornos llamados de recuperación de subproductos que están formados de grandes y estrechas cámaras de coquización de ladrillo de sílice en las que el carbón es transformado en coque por la combustión de gas que se lleva a cabo en las "cámaras de caldeo" construidas de ladrillo refractario y que separan a las cámaras de coquización. A fin de disminuir pérdidas de calor y de ocupar menos espacio, estas construcciones están hechas en series. El tiempo de coquización en este tipo de hornos oscila entre 14 y 22 horas según la temperatura de trabajo. Los rendimientos en coque son de 70-75%. Estas unidades operan de la siguiente manera: - El carbón es molido, seleccionado y almacenado; de allí es repartido por una máquina que se desplaza sobre la batería y lo vacía por las entradas de carga (previo calen

tamiento que se ha hecho de las cámaras de 1100°C).

Después de nivelarse la superficie del carbón, las entradas de carga son selladas, continuándose el calentamiento hasta que todo el carbón ha sido coquizado. Los materiales volátiles producidos son pasados al sistema de recuperación. La temperatura media del centro de la carga al terminar el período de calentamiento, es alrededor de 1000°C ., mientras que la temperatura de los ductos es de unos 1225°C .

Estas cámaras se encuentran herméticamente cerradas para evitar que entre aire y calor excesivo a las cámaras de caldeo, por los orificios laterales que hay en las paredes. La carga de carbón es calentada a través de ambas paredes, lo cual hace que el calor fluya hacia el centro de la carga.

Cuando la coquización es completa, las puertas de los extremos de las cámaras son abiertas y la masa incandescente es desalojada rápidamente por medio de una máquina - deshornadora, que empujando la masa por un extremo, hace que esta caiga en el carro de apagado, que es movido - eléctricamente. La operación de apagado puede hacerse - por medio de agua, (sistema húmedo) o por medio de gases inertes (sistema seco), como nitrógeno o bióxido de carbono. El método seco tiene la ventaja de recuperar el - 75% del calor sensible del coque. Se calcula que por cada tonelada de coque apagado por agua, se pierden - $252,000$ calorías. El coque frío es vaciado y transportado a la planta de molienda y selección. Los finos producidos de esta planta se usan para producir gas por reacción con aire y vapor en un generador de gas.

Los resultados que se obtienen al usar este tipo de horno, se pueden resumir en: el coque producido es de una -

calidad alta y uniforme; el consumo de gas combustible es mínimo; la pérdida de productos volátiles también es mínima; su estructura es fuerte y estable, con todas sus partes fácilmente reparables cuando sea necesario; su batería de operación es sencilla y flexible en cuanto a los distintos carbones y gases combustibles que puedan ser empleados.

Las principales marcas de estos hornos son Koppers. Otto, Wilputte y Somer Solway.

El coque así obtenido es menos "metálico" que el producido en horno de colmena, con dimensiones que rara vez exceden a los 20-25 cm., ya que nunca llegan a medir más de la mitad del ancho de la cámara, debido a la forma en que se va efectuando la coquización en el interior de ella.

El coque que se obtiene a altas temperaturas es preferido como combustible en el alto horno, debido a su particular combinación de resistencia, porosidad, densidad y otras propiedades que posee. Debe de estar libre de polvos y finos ya que éstos al pasar la malla de las 3/8" no se consideran satisfactorios.

Un buen coque siderúrgico no debe contener más de 2% de materia volátil, 85 a 90% de carbono fijo y 0.65 a 1.5% de azufre, intentando que sea lo más bajo posible en azufre, para de este modo evitar que pase al hierro.

Para obtener acero Bessemer, el fósforo debe ser bajo, de 0.018 a 0.040% y también bajo para los hornos básicos de hogar abierto. El contenido de cenizas puede variar entre 8 y 16% aunque se prefiere que no pase de 12%; la humedad deberá ser menor de 5%. En general, el rendimiento del horno es proporcional al contenido de cenizas.

(En cuanto a los usos del coque, se puede señalar que la industria siderúrgica lo emplea como combustible y reductor para transformar el mineral de hierro, en hierro de primera fusión (arrabio); este proceso se logra en un alto horno; su altura es entre los 27 y 30 metros y unos 9 metros en su diámetro mayor. Un alto horno de este tamaño podría producir sobre 1,000 toneladas de hierro de primera fusión cargando aproximadamente con 2,000 toneladas de mineral de óxidos conteniendo de 50 a 65% de hierro, 1,000 toneladas de coque y 50 toneladas de piedra caliza.) Estos materiales son cargados en las proporciones apropiadas por la parte superior del horno, manteniéndolo lleno todo el tiempo.

El aire que se inyecta por las toberas, inmediatamente quemara una parte del coque a bióxido de carbono, subiendo el calor de 1,370 a 1,575°C para controlar la composición de hierro fundido.

Las reacciones que se producen en el horno son extremadamente complejas. El carbón y el monóxido de carbono son los principales agentes reductores. El monóxido de carbono es formado por reducción del bióxido formado a la altura de las toberas o alcribises al encontrarse con exceso de carbón. El hierro primeramente formado es esponjoso y al descender a zonas más calientes se vuelve fluido.

Durante su descenso al hogar, asimila carbono del coque, silicio y otros elementos tales como azufre y fósforo que contiene la ceniza del coque, la caliza y el mineral. La piedra caliza actúa como fundente y reacciona con la sílice y la alúmina, formando silicatos y aluminatos que son fluidos a la temperatura del horno y forman una capa sobre la parte superior del metal líquido llamada escoria.

El gas que sale del horno y que lleva monóxido de carbono es lavado para eliminarle el polvo fino y poderse uti

lizar como combustible en las máquinas que inyectan y -
precalientan el aire, así como en las plantas coquizado-
ras cuando se encuentran localizadas en las inmediacio-
nes.

COQUE

Propiedades Químicas

a).-Analíticas.- Análisis inmediato. Agua, S. Cenizas Mn, Ce.

Análisis mediato elemental C, H, N, O,
y análisis cenizas.

b).-Reactividad al CO_2 y O_2

c).-Potencia Calorífica

Propiedades Físicas

a).-Consistencia.- Ensayos rotura, ensayos de trituración, análisis de tamaños

b).-Analíticas.- Densidad real, densidad aparente, densidad global, porosidad.

ENSAYOS FISICOS

La resistencia mecánica o solidez del coque se determina generalmente sometiendo una muestra de coque de gran tamaño a un desgaste normalizado y obteniendo la distribución de tamaños sobre tamices normalizados. Ocasionalmente se han citado ensayos destinados a medir la solidez o dureza de la materia del coque antes que la de los trozos de coque, mediante ensayos de abrasión y dureza. TROMMEL MICUM.

La densidad real se determina por desplazamiento del agua en un picnómetro, e indica la perfección de la coquización (el grado de grafitización); su valor se aproximará o excederá ligeramente a 2. Esta cantidad no se determina con precisión fácilmente. La muestra se debe pulverizar muy finamente para asegurar el acceso a la totalidad del volumen de poros. El coque debe desgasificarse a fondo por evacuación antes de añadir el agua. La utilización de otros flúidos da resultados débilmente diferentes, según el grado de adsorción sobre la extensa superficie interna del coque. El desplazamiento con helio, mediante una técnica especial, da el valor más alto y probablemente el más verdadero dado que el helio no se adsorbe sobre la superficie del coque, pero puede difundirse hasta la parte más interna de los poros.

La densidad aparente es la masa por unidad de volumen de coque incluyendo el espacio ocupado por los poros, puede det a partir de trozos de coque y es imposible lograr una buena reproductibilidad, pues los trozos pueden ser muy diferentes unos de otros. El método usual para su determinación implica impregnar una masa grande conocida de coque con aceite de parafina y después determinar su volumen por desplazamiento de aguas, suponiendo que el aceite permanece en el coque y determina exactamente sus límites. Este método consiste en cortar prismas de coque pesar cada uno, cerrar hermeticamente los poros con cera

y determinar el volumen por desplazamiento. En este caso, cada determinación es bastante exacta, pero es preciso una repetición adecuada para obtener un valor medio preciso. La densidad aparente del coque es próxima a 1.

La porosidad se calcula a partir de las densidades real y aparente, y su exactitud está sujeta a los errores de ambas. Su valor permanece en el intervalo 45-55% y a menudo es 50%. Alguna vez se ha considerado que la porosidad puede afectar a la reactividad, pero el intervalo total de variación es tan pequeño, que el efecto tendría que deberse al área de los poros, que depende de la distribución de tamaños de los mismos. Estas áreas varían de un coque a otro, pero la mayor superficie específica encontrada no es, probablemente mucho más grandes que el doble de la más pequeña. Actualmente se cree que la porosidad tiene solo un efecto pequeño sobre la reactividad.

La densidad global es la masa por unidad de volumen, incluyendo el espacio vacío entre los trozos, y normalmente se determina pesando la carga de un vagón bien nivelada. Es de interés como factor para la conversión de volúmenes a pesos, cuando la carga se hace tomando como base el volumen. Corregida en forma de una densidad aparente normalizada, es también un índice sensible de dureza o más bien de grado de fraccionamiento y una autoridad ha declarado que la densidad global del coque se correlaciona con el comportamiento en el H.A mejor que cualquier otra propiedad.

CUADRO NUM. 1-16

ESPECIFICACIONES PARA COQUE DE ALTO HORNO

Materia Volátil	0.75 - 2.0	%/peso
Cenizas	7.0 - 9.0	%/peso
Azufre	0.65 - 1.0	%/peso
Prueba de Fragmentación (Shatter Test) on 2 in	70 - 78	%/peso
Porosidad	45 - 49	%/vol
Tamaño	2.5 - 4.5 igualmente para - carga separadas. Not-size coke 1 3/4 x 2 1/2, 1 x 3/4 y 7/8 x 1 in. Todo el coque de - será de un tamaño aproximado.	

CUADRO NUM. 1-17

CONDICIONES STANDARD DE LA ASTM PARA UN COQUE SECO

	% peso
Materia Volátil	no mayor 2
Carbono Fijo	no menor 86
Cenizas	no mayor 12
Azufre	no mayor 1

CUADRO NUM. 1-18

ANALISIS Y PROPIEDADES DE FUNDICION DE COQUE

Materia Volátil	0.93 % en peso
Carbón Fijo	89.97 % en peso
Cenizas	9.10 % en peso
S	0.70 % en peso
Gravedad Específica Verdadera	1.89 % en peso
Gravedad Específica Aparente	1.04 % en peso
Porosidad	45.0 % en volúmen
Compactabilidad (en zin tamiz)	83.0 % en peso
Prueba del Tambor	
Estabilidad	36.5 % en peso
Dureza	62.9 % en peso
Temperatura de ablandamiento de cenizas (ash-softening)	1452 ^o C 2646 ^o F

CUADRO NUM. 1-19

PRODUCCION NACIONAL DE CARBON
(Toneladas y Pesos)

AÑOS	VOLUMEN	% *	VALOR ₡ \$	%
1950	1 000 000	---	90 000 000	---
1951	1 118 710	11.8	100 683 900	11.8
1952	1 316 867	17.7	118 518 030	17.7
1952	1 432 315	8.8	129 908 350	8.8
1954	1 313 609	-8.4	118 224 810	-8.4
1955	1 342 082	2.2	120 787 380	2.2
1956	1 553 035	15.7	139 773 150	15.7
1957	1 545 102	-0.6	139 059 180	-0.6
1958	1 470 705	-4.9	132 363 450	-4.9
1959	1 605 384	9.1	144 484 560	9.1
1960	1 775 649	10.5	159 808 410	10.5
1961	1,817 616	2.3	163 585 440	2.3
1962	1 893 400	4.1	170 406 000	4.1
1963	2 070 893	9.3	186 380 370	9.3
1964	2 137 558	3.2	192 380 220	3.2
1965	2 005 662	-6.2	180 509 580	-6.2
1966	2 101 187	4.7	189 106 830	4.7
1967	2 254 710	7.2	202 911 628	7.2

₡ Calculado con base en precios oficiales para gravar la exportación, importación y producción (C.R.N.N.R.)

* En relación con el año anterior.

FUENTE: Dirección General de Minas y Petróleo
Secretaría del Patrimonio Nacional

CUADRO NUM? 1-20

PRODUCCION NACIONAL DE COQUE
(Toneladas)

AÑOS	VOLUMEN	%
1958	595 852	-
1959	626 555	5.1
1960	436 299	- 30.4
1961	712 084	63.2
1962	774 604	8.7
1963	903 335	16.6
1964	912 587	1.0
1965	873 405	- 4.3
1966	1 166 667	33.5
1967	1 108 456	- 5.0

FUENTE: Dirección General de Minas y Petróleo. SEPANAL.

CUADRO NUM. 1-21

PROYECCION DE LA PRODUCCION NACIONAL DE COQUE
(Toneladas)

AÑOS	VOLUMEN	AÑOS	VOLUMEN
1958	1 217 084	1975	2 341 727
1969	1 336 358	1976	2 571 216
1970	1 467 321	1977	2 823 195
1971	1 611 118	1978	3 099 868
1972	1 769 007	1979	3 403 655
1973	1 942 369	1980	3 737 213
1974	2 132 721		

CUADRO NUM. 1-22

IMPORTACION NACIONAL DE COQUE
(Toneladas y pesos)

AÑO	VOLUMEN	VALOR
1960	6 143	2 952 904
1961	6 049	2 687 216
1962	9 167	3 635 837
1963	21 245	10 436 915
1964	27 604	14 077 421
1965	58 748	22 751 538
1966	125 446	34 374 709
1967	147 994	46 742 292

FUENTE: Anuario Estadístico del Comercio Exterior de los Estados Unidos Mexicanos.- S.I.C.

CLASIFICACION DEL CARBON MINERAL SEGUN SU RANGO Y CALIDAD (A.S.T.M.)

C L A S E	BASE	LIMITES DE CARBONO FIJO %	LIMITE DE MATERIAS VOLATILES EN %	LIMITES EN PODER CALORIFICO EN KILOCALORIAS	BANCO
I. ANTRACITICO					
1. Meta antracita	Seca	De 98 a 100	De 0 a 2		Alto
2. Antracita	Seca	De 92 a 98	De 2 a 8		Alto
3. Semi-antracita	Seca	De 85 a 92	De 8 a 14		Alto
II. BITUMINOSO					
1. De volatilidad baja	Seca	De 78 a 85	De 14 a 22		Alto
2. De volatilidad media	Seca	De 68 a 78	De 22 a 31		Alto
3. De volatilidad alta					
A	Seca	Menor de 68	Mayor de 31	Mayor 7 770 <u>1/</u>	Medio
B	Húmeda			7 215 a 7 770	Bajo
C				6 100 a 7 215	Bajo
III. SUB-BITUMINOSO					
A	Húmeda			6 100 a 7 215	Bajo
B	Húmeda			5 270 a 6 100	Bajo
C	Húmeda			4 700 a 5 270	Bajo
IV. LIGNITICO					
1. Lignito	Húmeda			Menor de 4 700	Bajo
2. Lignito café	Húmeda			Menor de 4 700 <u>2/</u>	Bajo

FUENTE: Recursos e Industrias del Mundo. Erich W. Zimmermann
1/ No aglomerable. 2/ No consolidado.

PRODUCCION NACIONAL DE COQUE POR EMPRESAS (TONELADAS)

AÑOS	ASARCO MEXICA NO, S. A.	CIA. MEXICANA DE COQUE Y DERIVADOS, S. A.	HULLERA MEXI CANA, S. A.	CARBON Y COQUE, S. A.	TOTAL
1962	346 325	411 547	16 732	-----	774 604
1963	403 881	479 942	19 512	-----	903 335
1964	398 598	491 519	22 540	-----	912 587
1965	390 936	466 049	16 420	-----	873 405
1966	500 267	651 000	15 400	-----	1 166 667
1967	380 157	707 182	6 168	14 955	1 108 456

FUENTE: Dirección General de Minas y Petróleo
Sría. del Patrimonio Nacional.

FUNDENTES

Fundente es un material que recoge o arrastra la ganga y las impurezas. Los fundentes se emplean en la metalurgia extractiva y su objetivo es eliminar o evitar la incorporación de impurezas que impedirían la obtención de productos de buena calidad.

En la metalurgia extractiva, para obtener los metales, se añaden los fundentes junto con la carga de la mena y el combustible. El fundente primeramente debe hacerse cargo de la procién de ganga que no se ha podido eliminar por otros medios físicos, sea por concentración o por flotación. La escoria es el producto resultante de la acción del fundente con la ganga o las impurezas. Los fundentes han de dar escorias fusibles y lo suficientemente flúidas para facilitar la separación de las impurezas del metal fundido.

A veces el fundente sólo tiene por misión proteger el baño, tal como ocurre en el proceso Siemens-Martin, en que las escorias liberan al metal fundido, que se encuentra debajo, de la acción de los gases calientes, y por ser malos conductores impiden el sobre-calentamiento del metal, y en otras ocasiones conservan su calor; pero es más general que la finalidad principal sea la eliminación de las impurezas del metal fundido.

Parece que, al menos para los productos siderúrgicos, no existe duda en la elección del fundente en cuanto a sus acciones protectoras. En tanto el fundente esté fundido, la mayoría de las mezclas son una barrera eficaz.

El propósito primario del fundente es, pues, mantener el metal principal en estado de pureza, bien librándolo de la acción del ambiente o garantizando por su acción la

pureza del metal, o bien para poder realizar adecuadamente alguna otra operación.

El uso de fundentes se ha de estudiar en cada caso para conseguir las mayores ventajas. La selección de un fundente adecuado, para un proceso dado, es principalmente un problema químico que requiere un conocimiento de la composición y propiedades de todos los materiales que entran en el proceso. Con este conocimiento, la selección será regida por las leyes físicas y químicas bien establecidas que se aplican a las temperaturas de fundición. Estas leyes no son distintas de las que rigen los procesos a temperaturas normales. De la mayor importancia son las leyes que hacen referencia a la formación de las sales a partir de la reacción de los ácidos y las bases. Prácticamente, todos los compuestos que forman escorias que intervienen en la fundición o procesos de refinado se pueden clasificar bien como ácidos o como bases, en virtud del hecho de que reaccionan entre sí para formar compuestos que son análogos a las sales de la química de vía húmeda, aunque las unidades estructurales a elevadas temperaturas, son distintas.

Los fundentes, que pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, se clasifican en la metalurgia extractiva del modo siguiente:

- 1.- Sílice, que se encuentra libre, como tal, en las menas y como mineral en las arenas y cuarzo. Se usa principalmente en la fundición de menas de cobre y piritas, en la conversión de la mata de cobre y en la fundición de las menas de plomo con gangas ferruginosas y calcáreas.

- 2.- Oxido de Aluminio, que en general no se añade intencionalmente, pero con frecuencia está en las menas.
- 3.- Oxidos de Hierro que actuan de agentes oxidantes y -- se convierten en oxido ferroso que pasa a la escoria.
- 4.- Oxidos de Manganeso, que realizan principalmente un - papel análogo al de los óxidos de hierro.
- 5.- Piedra Caliza, que se usa en la fundición de las menas de hierro, cobre y plomo, generalmente se añade sin - calcinar, pero a elevada temperatura se descompone en - Dióxido de Carbono que se desprende y óxido de calcio - que es un material básico.
- 6.- Dolomita y Magnetita, que se asemejan a la piedra caliza y se usan más corrientemente en la fundición de las menas de hierro.
- 7.- Fundentes que se utilizan más en la industria metalúrgica y en el refinado de los metales que en la fundición de menas metálicas:
 - a).- Espato-Fluor, que se utiliza mucho para toda clase de flujos, hace la escoria más fluida y aumenta la solubilidad de los óxidos metálicos.
El espato-fluor en grandes cantidades hace a la escoria neutra.
 - b).- Bauxita, que se emplea como fundente.
 - c).- Yeso.
 - d).- Sulfuros Metálicos.
 - e).- Litargirio.

f).- Nitrato y carbonato sódicos, que tienen varias apli
caciones en metalurgia y principalmente como -
flujos.

El empleo de los fundentes se ha de vigilar cuidadosamente.

La principal limitación radica en el carácter químico -
del recubrimiento del horno, pues si éste es básico, un
fundente ácido pronto destruiría el horno.

CALIZA

La caliza es una roca compuesta por lo menos de 50% de - carbonato cálcico, CaCO_3 , con porcentajes variables de - impurezas. En su interpretación más amplia, el término incluye cualquier material calcareo (esto es, que contenga carbonato de calcio), como mármol, coral y marga. Cada uno de los cuales posee propiedades físicas distintas.

Sin embargo, generalmente se considera que la caliza es una roca calcárea estratificada compuesta principalmente del material calcita.

Las rocas clasificadas como calizas comerciales contienen cantidades variables de carbonato de Mg; cuando éste se haya en cantidad inferior a 5% se dice que la caliza es rica en calcio; si está en proporción mayor al 5% se dice que la piedra es magnecciona.

Una caliza que contenga entre 30 y 45% de Mg. se clasifica como Dolomítica.

Las propiedades físicas de las calizas varían bastante el color, según las impurezas que estén presentes, puede variar entre el blanco puro y el negro; la dureza, la densidad, la porosidad y la textura, así como las impurezas que consisten generalmente en óxido férrico, sílice y alúmina, varían muchísimo, incluso en un mismo yacimiento. Estructuralmente la caliza es cristalina; es virtualmente insoluble en agua pura.

RESISTENCIA.- La resistencia de la caliza a la compresión o al aplastamiento oscila entre 98.4 y 583.5 Kg/cm^2 . La resistencia a la tracción no es tan importante y es más difícil de determinar, varía entre 25 y 63 kg/cm^2 .

DENSIDAD.- La densidad bruta de la caliza, el peso de un dm^3 , varía según el contenido de humedad, la textura y - la porosidad de la piedra. La caliza comercial secada al aire en condiciones ordinarias tiene una densidad bruta 1.992 a 2.242 kg/dm^3 . En condiciones de humedad, la densidad bruta puede ser 2.242 a 2.883 Kg/dm^3 .

DUREZA.- Casi todas las calizas tienen una dureza de 2 a 3 en la escala de moks. Esta dureza influye en la facilidad para trabajarla.

El mayor consumo de caliza para fines metalúrgicos se relaciona con la fabricación del hierro y el acero. En promedio, se necesita un tercio de tonelada de caliza por - cada tonelada de acero producido. Se usa universalmente - como fundente en el alto horno para la fabricación de arrabio. La caliza se usa también en la carga inicial de los hornos básicos de Martín, en los cuales lo que se llama - "ebullición de cal" es el gran desprendimiento de gas carbónico que acompaña a la calcinación de la piedra.

Casi todas las fábricas de acero suplementan la piedra - utilizada como fundente con cal durante el proceso del - horno de Martín. Algunas fábricas de acero usan caliza - rica en calcio; otras prefieren caliza magnesiana de alta calidad o una mezcla de caliza rica en calcio y caliza dolomítica. Generalmente se usa piedra de un tamaño que - varía entre 2.5 y 18 cm. La cal (cal viva en forma de - guijas) tiene extenso uso como fundente en la purificación del acero en el horno básico de martín, en el convertidor de Bessemer básico y en el horno eléctrico. Se usa exclusivamente como fundente en el horno eléctrico en lugar de caliza para obtener aceros especiales de alta calidad destinados a máquinas herramientas e instrumentos de precisión. La cal tiene diversas aplicaciones en la fabricación de productos de acero. En el trefilado de alambres obracomolubricante a medida que las barras (o los alambres)-

de acero se hacen pasar a través de las hileras. En la fusión de lingotes, un revestimiento de lechada de cal sobre los moldes de hierro fundido impide la adherencia.

SINTERIZACION

Cuando un compactado prensado en frío se calienta a temperatura suficientemente elevada, su naturaleza cambia en forma sobresaliente. El compactado original, que era débil y desmeruzable, se transforma en un cuerpo mucho más fuerte, aumenta su densidad y las partículas vecinas se unen acrecentando el tamaño de grano. Si la temperatura es suficientemente elevada y el tiempo adecuadamente largo, el compactado puede acercarse a la densidad máxima - característica de su composición.

Aunque en ausencia de compuestos intermetálicos la densidad de una aleación se puede aproximar mucho, suponiendo que la densidad es equivalente a la calculada para la mezcla, si se forma una fase completamente nueva, la densidad puede ser apreciablemente diferente de la calentada. Por consiguiente, se puede tener una densidad inferior a la separada sin que ésta sea causada por la presencia de poros. De todas maneras los compactados sinterizados tienen en general una porosidad del 5 al 15%. - Para densificar completamente el compactado, es generalmente necesaria una operación adicional de prensado (rectificación) u otro trabajado, como forjado o rolado rotatorio, seguida de una sinterización.

En algunos casos, los compactados se expanden en lugar de contraerse durante el sinterizado, tal comportamiento, se ha atribuido normalmente a la expansión del aire atrapado durante la operación de prensado o a otros gases que se forman durante la sinterización.

El mecanismo real que explique la densificación del compactado durante la sinterización no es completamente claro, ya que diferentes investigadores de este fenómeno no

se han puesto de acuerdo sobre él. Sin embargo, parece haber una marcada evidencia, de que ésta es debida a la difusión de vacancias de la red hacia la superficie, a lo largo de los límites de grano. Alexander a demostrado que la reducción de poros cesa cuando los límites de grano no intersectan más la interfase poro-partícula.

ATMOSFERAS PARA SINTERIZACION

Una gran parte de la Sinterización de los metales cuyos óxidos se reducen fácilmente con el hidrógeno (por ejemplo: Fe, Cu, Ni) se realiza en una atmósfera de hidrógeno seco o amoniaco disociado a causa de la acción reductora de estos gases. Los metales que forman hidruros de ben sinterizarse en gas noble muy puro o en vacío.

Naturalmente, el material extraño (como los óxidos superficiales) debe eliminarse antes de y durante la operación de sinterización, de tal manera que puedan conservarse limpias, las superficies necesarias para la inter difusión. La tabla 1-25 menciona algunos metales y sugiere atmósferas para su sinterización.

METALES Y ATMOSFERAS DE SINTERIZACION 1-25

HIDROGENO	AMONIACO DISOCIADO	ARGON O HELIO	VACIO	AIRE
W	Fe	Cr	Ti	Pt
Mo	Ni	Mg	Zr	Au
Co - W	Cu	Cualquier metal (se usa de pre ferencia al vacío para metales con presión de vapor alta)	Cb	Ag
Fe			Ta	Al
Ni				
Cu			Cr	
Cr				

Se debería notar que el gas noble se usa mejor como una atmósfera estática; pero un gas reductor, como el hidrógeno deberá pasar continuamente sobre el compactado, para evitar una reversión de la acción reductora.

Por alguna razón que no está clara, a menudo se tiene un compactado más limpio si éste se embebe completamente en un polvo refractario no reactivo tal como granos de Al_2O_3 fundido.

I.- PELETIZACION

La peletización es un proceso de aglomeración que utiliza minerales crudos y muy finos para formar un producto de forma esférica llamado "Pelet". Las propiedades físicas y químicas del pelet pueden ser ajustadas conforme a las requeridas por el proceso que reciba posteriormente, en nuestro caso, a las especificadas por el proceso de reducción directa.

La peletización comprende básicamente dos pasos de operación (Ver tabla No.1-26), y son:

- a) Peletizado: Que incluye toda la preparación del concentrado y formación de pelets húmedos o verdes.
- b) Endurecimiento: Abarca las etapas de secado, cocimiento y enfriamiento.

Para la formación de pelets verdes de buena calidad, se requieren a la vez dos cosas fundamentales: Primero: Que el concentrado tenga un grado de finura específica, de tal forma, que sirva para provocar una más rápida unión de las partículas entre sí y también que se pueda aprovechar para liberar impurezas y enriquecerlo. Segundo: Que tenga un grado de humedad con el cual se haga más consistente el aglomerado crudo; operación que es ayudada por un cementante.

El endurecimiento depende del comportamiento que tenga el mineral crudo ante las altas temperaturas a las cuales es sometido y de la resistencia que se requiere en los pelets para el manejo que recibirán posteriormente.

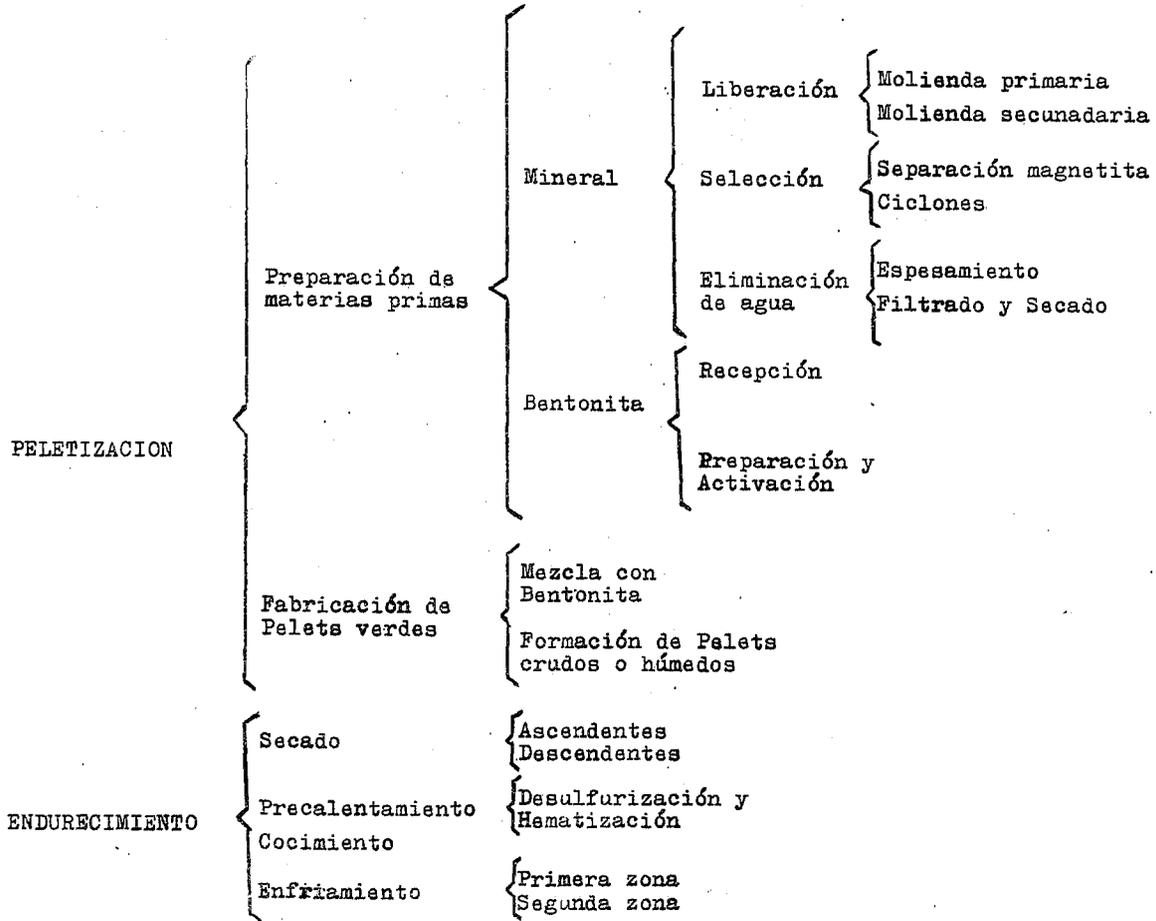
Las especificaciones del producto obtenido en la planta peletizadora de Alzada, Colima, son bastante uniformes y sus características principales son las siguientes:

- a) Tamaño: entre 3/8" y 3/4"
- b) Resistencia a la degradación: 4% menor de 30 mallas
- c) Resistencia a la compresión: 230 Kgs.
- d) Contenido de Azufre: 0.08% máximo
- e) Contenido de Hierro: 65% promedio

Dichos valores reflejan la obtención de un producto de me jores características que el propio mineral, y que presen ta ventajas para la obtención de óptimos resultados en - el proceso de "Reducción Directa", fase siguiente de las operaciones involucradas para la transformación del mine ral de hierro en Acero. Dichas ventajas pueden resumir- se como sigue:

- Producto más uniforme en características químicas
- Uniformidad de tamaño, ausencia de finos con lo cual y con su forma esférica permite una mejor permeabili- dad a los gases en la reducción
- Mayor y más rápida reducción
- Una mayor resistencia que la del propio mineral.

P A S O S E N E L P R O C E S O



PROPIEDADES FISICAS

Entre las propiedades físicas de las materias primas de la carga, las mecánicas constituyen un capítulo muy importante a tener en cuenta en el funcionamiento de la planta siderúrgica. La resistencia a la abrasión, la decrepitación y el hinchamiento se han estudiado separadamente con ensayos de laboratorio específicos. Sin embargo, - conviene revisar previamente los criterios comúnmente - adoptados sobre la calidad física de los finos de minerales desde el punto de vista de su aptitud a la aglomeración. Es muy poco lo que se conoce con una base cierta. Las plantas siderúrgicas se rigen, en muchos casos, por un conjunto de empirismos tecnológicos para juzgar cuál es el tratamiento de aglomeración más adecuado para sus finos de minerales. En resumen, tales empirismos son:

- a) La malla de cribado que retiene el 95% del total.
- b) La proporción de finos menores de 0,150 mm.
- c) La proporción de finos menores de 0,074 mm.
- d) La proporción de finos menores de 0,074 mm. o mejor, 0,043 mm.

También se sabe que un cierto contenido arcilloso favorece el mezclado y formación de gránulos en la mezcla a sínterizar y la formación de la bola en la pelletización, y según criterio japonés los minerales arcillosos se reserván para pelletizar, luego tal cualidad debe considerarse de mayor utilidad en la técnica de pelletización.

Parece ser que la pelletización requiere un menor tamaño, según se dijo anteriormente. Sin embargo, no faltan resultados que demuestran una adecuada sinterización con - porcentos de finos de menos de 0,074 mm elevados en la mezcla mineral a sinterizar, aun cuando lo normal es que

estas fracciones tienen una incidencia desfavorable en la sinterización por disminuir la permeabilidad de la carga, cuyo tamaño medio de grano debe ser grande dentro de los finos para conseguir permeabilidades elevadas y aumentar la producción de las bandas. Los consumos de coque en el proceso de sinterización están en función del contenido de magnetita en el mineral, porque su oxidación es exotérmica y la energía liberada contribuye el aporte térmico requerido en el proceso a igualdad de otros factores, tales como estructura cristalina de los óxidos, composición química de las gangas y distribución de la porosidad y de los minerales que forman la ganga.

Las propiedades de los aglomerados, tanto sinterizados como pellets son, su reductibilidad y su resistencia mecánica. Ambas dependen casi exclusivamente de la habilidad técnica de su tratamiento de fabricación. Hay que destacar que cada mezcla mineral necesita asentar su propio método de fabricación para conseguir resultados óptimos, teniendo presente, además, que las propiedades a la aglomeración de los minerales considerados separada e individualmente no son aditivas. El responsable de la fabricación encuentra que, la buena reductibilidad es opuesta, en todos los casos, a la buena resistencia mecánica del producto. Los resultados son óptimos cuando se consigue una razonable reductibilidad y una razonable dureza o resistencia mecánica en el tambor, teniendo presente que estas propiedades son función específica de cada mezcla.

La degradación durante la reducción resulta, con frecuencia, inversamente proporcional a la reductibilidad. Esto, que se ha tratado como una propiedad importante, no sólo de los aglomerados, sino también de los minerales, no siempre tiene la variación indicada. Lo que si parece comprobado en la práctica es la tendencia a formar bóveda en el horno alto con sinterizados de elevada resistencia mecánica a la degradación con la reducción y po--

bre reductibilidad. En otro aspecto, se sabe que una de terminada cantidad más o menos grande de finos, se introduce al horno con la carga y es obvio que los finos se incrementan con los producidos durante la reducción, y que estos finos son causa de fenómenos perturbadores de la marcha del horno alto, según se ha dicho en repetidas oca--siones.

DECREPITACION DE MINERALES

La degradación de tamaños de los materiales cargados al horno alto, según ciertas opiniones, se produce por simple choque térmico, es decir, por el aumento de la temperatura que sufren las cargas al ser introducidas dentro del horno alto, que es distinta de la degradación debida a la reducción de hematites a magnetita que parece ser - el paso que mayor producción de finos origina. Separar ambos fenómenos en la planta es imposible, pues el aumento de temperatura de las cargas lo reciben en una atmósfera reductora y, por consiguiente, los materiales se calientan y se reducen simultáneamente, y tan pronto como son cargados. Ahora bien, ambos fenómenos pueden determinarse separada y experimentalmente en el laboratorio. La degradación debida a la reducción se determina fácilmente con el ensayo de reductibilidad, y la imputable al choque térmico se realiza por el simple calentamiento al aire de la muestra según el método operatorio que se describe a continuación.

Dos muestras de 500 g de mineral cada una, previamente lavadas y secas, se calienta una a 400 y la otra a 600°C, con una velocidad de calentamiento de 250°C/h. Alcanzada la temperatura del ensayo se mantiene ésta durante 10 min, seguidamente las muestras se sacan del horno y se dejan enfriar en el aire.

El tamaño de la muestra ha sido 5-40 mm. y los resultados obtenidos en este caso se recogen en la Tabla 1-23.

TABLA 1-27 DECREPITACION DE MINERALES

M I N E R A L	DECREPITACION			
	400°C		600°C	
	2,4-5	0-2,4	2,4-5	0-2,4
Hematites compacta (1).....	4,2	0,8	7,2	1,5
Magnetita granulada	0	0	0,4	0,2
Hematites+Limonitas porosas (1).....	0,9	1,5	1,5	1,2
Hematites+Carbonatos oolíticos.....	5,8	0,6	2,0	0,9
Hematites+Limonitas porosas (2).....	0,7	0,6	1,0	0,8
Hematites+Limonitas porosas (3).....	4,9	0,6	0,5	1,0
Hematites+Limonitas porosas (4).....	10,1	0,6	11,6	0,5
Magnetita+Hematites compacta con poros...	0	0	0,2	0,1
Oxidos+Carbonatos porosos compactos.....	7,6	0,6	8,4	0,4
Hematites compacta (2).....	0	0	0	0
Magnetita+Hematites compacta y grano fino	0,2	0,5	1,0	1,2
Hematites compacta (3).....	4,0	0,6	4,0	0,9
Oxidos+Limonitas porosas.....	0,4	0,8	0,8	0,4
Hematites porosa.....	2,5	0,2	2,0	0,2
Magnetita compacta.....	0	0	0,3	0
Hematites+Limonitas porosas (5).....	1,1	0,2	0,8	1,9
Hematites+Limonitas compactas.....	0,8	0,6	0,9	0,7
Hematites+Limonitas porosas (6).....	1,63	0,3	1,0	0,3
Oxidos porosos (1).....	1,88	1,74	2,80	2,70
Oxidos porosos (2).....	0,3	0,2	1,1	2,0
Hematites+Limonitas porosas (7).....	1,05	0,9	1,1	0,7
Hematites compacta (3).....	3,20	0,9	3,0	0,9

HINCHAMIENTO

El enriquecimiento de la ley en hierro del lecho de fusión ha hecho que tome una importancia capital un fenómeno conocido desde hace tiempo, pero que no producía trastornos en las pasadas condiciones operatorias. Actualmente ocurre que los pellets ricos en contenido de hierro al reducirse aumentan en volumen o se fragmentan considerablemente, o experimentan ambos fenómenos simultáneamente.

El hinchamiento o abultamiento de tales materiales con la reducción, ha sido causa del bloqueo de varios hornos altos en los últimos años y, con tal motivo, se ha venido realizando recientemente un gran esfuerzo de investigación para poner a punto los métodos de laboratorio que permitan conocer este comportamiento de los materiales de la carga y evitar los inconvenientes mencionados que, en ocasiones, han llegado a ser catastróficos.

Son dos los métodos de laboratorio puestos en operación para determinar, el grado de hinchamiento. El primero es un dilatómetro que permite tratar la muestra en condiciones reductoras. El segundo es un voluménmetro que utiliza mercurio como líquido de elevada tensión superficial para determinar el volumen de las muestras inicial y en diferentes grados de reducción.

Aunque en ocasiones se han llegado a encontrar aumentos de volumen hasta del 100%, parece ser que los aumentos moderados de volumen son tolerables, y si se trata de fijar un valor máximo permisible lo estiman opiniones autorizadas en un 20% de hinchamiento, pudiéndose aceptar valores más altos siempre que la resistencia mecánica a la compresión y a la degradación con la reducción sea elevada después de haber experimentado el hinchamiento.

TABLA 1-28 Variación de volumen de los minerales con la reducción

M I N E R A L	Pérdidas calcinación	Antes Fe _t	Después Fe _t	% Variación de volumen
Hematites compacta (1)...	7,95	56,2	64,6	-21
Magnetita granulada...	0	57,5	62,1	-31
Hematites+Limonitas porosas (1)...	10,83	51,1	62,3	-16
Hematites+Carbonatos oolíticos...	4,49	47,7	51,9	-10
Hematites+Limonitas porosas (2)...	11,06	48,8	55,5	-15
Hematites+Limonitas porosas (3)...	11,79	53,9	62,8	-23
Hematites+Limonitas porosas (4)...	11,48	50,1	57,5	-20
Magnetitas+Hematites compacta con poros...	0,26	48,7	68,1	- 0
Oxidos+Carbonatos porosos compactos...	11,24	44,4	57,5	-10
Hematites compacta (2)...	0,73	67,4	70,1	+41
Magnetitas+Hematites compacta y grano fino	2,49	66,0	79,9	- 0
Hematites compacta (3)...	1,40	46,4	54,6	- 3
Oxido+Limonitas porosas...	11,23	50,2	67,6	-24
Hematites porosas...	0,43	51,9	-	+ 3
Magnetita compacta...	0	46,4	49,2	0
Hematites+Limonita porosa (5)...	11,49	51,9	71,1	-28
Hematites+Limonita compacta (1)...	11,21	53,8	68,9	-26
Hematites+Limonita porosa (6)...	10,26	47,9	61,0	-12
Oxidos porosos (1)...	10,74	53,9	64,6	- 3
Oxidos porosos (2)...	6,06	57,5	59,2	+ 6
Hematites+Limonitas compacta (2)...	9,64	47,9	69,2	-20

DEGRADACION Y RESISTENCIA A LA ABRASION

La estructura petrográfica de los minerales parece estar en relación con la degradación y producción de polvos en su manejo dentro de la fábrica. Cualquiera que sea la causa, el efecto es un factor importante a considerar; de una parte se estima como una mala práctica la carga de tales finos en el horno alto y su destino obligatorio es la aglomeración, que normalmente tiene una capacidad limitada de consumo; y por otra parte, el tratamiento más extenso de preparación de los minerales dentro de la fábrica por razones que daremos más adelante, hace que la producción de finos aumente, al aumentar la preparación y en consecuencia, a menudo desborda la capacidad de aglomeración, por lo que es necesario la selección de aquellos minerales cuya producción de finos esté equilibrada con la capacidad de aglomeración.

Así se llega a otro problema y es el de la utilización o mercado de los finos producidos en la mina y de los minerales de naturaleza pulverulenta cuya utilización está condicionada a la aglomeración. Entre las dos alternativas de sinterizarlos o pelletizarlos, se ha discutido mucho sobre quién debe realizarla, el número o el siderúrgico. Creemos que es equivocado afirmar que la sinterización es problema siderúrgico y la pelletización lo es minero.

La cuestión de enfocarse desde el punto de vista de la aptitud del mineral para aplicarle una u otra técnica. Por parte de la siderurgia, que debe resolver el problema de la aglomeración más adecuada de los finos producidos dentro de la planta, ambas técnicas son aplicables si la aptitud de sus finos lo requieren, y es necesario aumentar la capacidad de aglomeración.

Por la parte minera el problema es encontrar mercado a un producto que no lo tiene, y encuentra más ventajoso,

TABLA 1-29 Degradación en el tambor de Gakushin.

Pellets Tamaño mm	R.		M. 1		M. 2		M. 3		M.O.H. 1	
	Antes red %	Después %								
6,35	92,7	88,0	98,7	92,0	97,0	88,5	98,4	96,8	100	91,4
3,175 - 6,35	7,3	10,8	1,3	4,6	0,8	3,7	0,9	2,3	-	3,8
1,676 - 3,175	-	0,3	-	1,3	-	0,9	0,6	0,3	-	1,9
0,5 - 1,676	-	-	-	0,7	-	0,9	-	0,3	-	1,3
0,5	-	0,7	-	1,3	2,5	6,0	-	0,3	-	1,6

Pellets Tamaño mm	M.O.H. 1		S.		Ma.		E.M.T. 1.232°C		E.M.T. 1.260°C	
	Antes red %	Después %								
6,35	100	91,2	100	97,9	100	100	99,7	98,9	100	100
3,175 - 6,35	-	3,8	-	0,3	-	-	0,3	0,3	-	-
1,676 - 3,175	-	1,9	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1,676	-	1,3	-	-	-	-	-	0,3	-	-
0,5	-	1,6	-	1,8	-	-	-	0,3	-	-

Pellets Tamaño mm	E.M.T. 1.288°C		E.M.T. 1.315°C		H.		Mn. (b)		Mm. (s)	
	Antes red %	Después %								
6,35	99,7	99,7	100	100	100	100	93,0	85,0	100	96,0
3,175 - 6,35	0,3	0,3	-	-	-	-	3,7	7,8	-	2,0
1,676 - 3,175	-	-	-	-	-	-	1,5	1,8	-	0,3
0,5 - 1,676	-	-	-	-	-	-	0,9	2,8	-	1,0
0,5	-	-	-	-	-	-	0,9	2,5	-	0,7

comercialmente, su aglomeración en forma de pellets, siendo a esta circunstancia a la que realmente se debe, por ahora, el desarrollo de la técnica de pelletización y el que el mayor tonelaje fabricado en el mundo lo sea de origen minero, sin que esto represente una despreocupación siderúrgica por el problema, siendo buena prueba de ello las nuevas instalaciones de pelletización incorporadas a las fábricas siderúrgicas recientemente.

La resistencia mecánica de los materiales de la carga, principalmente el sinterizado, puede expresarse como resultado de diversos ensayos que determinan lo que se llama resistencia a la abrasión. De estos ensayos, los más usuales son el SEMIMUCUM y el A.S.T.M. El primero consiste en someter una muestra de 16 kg, representativa de todas las fracciones del producto, superiores en tamaño a 10 mm. en un tambor de 1 m ϕ , por 0,25 m de ancho, durante 100 vueltas y a una velocidad de giro de 25 r.p.m. El tambor lleva cuatro resaltes interiores de 10 cm. diametralmente opuestos dos a dos. Después del ensayo se determinan los pesos de las fracciones: 40, 20-40, 10-20, 5-10, 2,5-5, 1-2,5 y -1mm, expresándose el resultado como porcentaje de cada una, o bien, calculando la media y la desviación típica de la distribución granulométrica.

En los Estados Unidos y Gran Bretaña se emplea, preferentemente, el ensayo A.S.T.M., que consiste en tratar 50 libras de muestra de tamaño 3/8-2 pulg. en un tambor de 3 pies de diámetro y 18 pulg. de ancho durante 100 vueltas a una velocidad de giro de 25 r.p.m. El tambor lleva interiormente dos resaltes de 2 pulg. diametralmente opuestos y dispuestos de modo que uno de ellos quede en la boca de descarga. El índice de resistencia se juzga por los porcentajes de las fracciones, mayor de 1/4 de pulg. y menor de 30 mallas después del ensayo; la cifra que representa lo mayor de 1/4 está comprendida entre 60 y 85%

Este ensayo tiene el inconveniente de que el tamaño -
3/8-2 pulg. puede representar solamente una fracción del
producto cargado al horno alto.

El análisis estadístico de los resultados comparativos de
ambos tambores, realizados en la BISRA, puso de manifies-
to que no hay diferencias significativas en la reproduc-
tibilidad de los resultados de ambos tambores individual-
mente. Hay diferencias significativas en cuanto a los re-
sultados obtenidos que dependen de las características --
físicas de los materiales ensayados (magnetitas duras, -
hematites blandos, dos tipos de sinterizados y pellets -
comerciales), de modo que el SEMMICUM tiene mayor índice
de abrasión, y al ser menor la muestra a ensayar, se pue-
de tomar como una ventaja adicional de éste.

[Cuando se trata de pellets se pone cierta consideración -
al ensayo de compresión de éstos individualmente. Resis-
tencias comprendidas entre 100 y 300 kg/pellets son valo-
res aceptables.

Otros tambores de laboratorio son el de Gakushin, de -
155 mm ϕ y 65 de ancho, que gira a la velocidad de 2,4 -
r.p.m. En él se someten a degradación 150 g. de muestra
durante 30 min. dando en total 72 vueltas el tambor.

La degradación de los pellets sin reducir en la mayoría -
de los casos es nula, y como con los reducidos la produc-
ción de polvo es muy pequeña, en conclusión puede decirse
que, el procedimiento no es suficientemente severo, única-
mente puede indicar, comparativamente, la resistencia a -
la abrasión de los materiales de la carga.

GRANULOMETRIA DE LOS PRODUCTOS

La granulometría y distribución de tamaños de los materiales se determina fácilmente mediante clasificación convencional con cribas tipo, para lo cual se han establecido procedimientos normalizados.

El ideal está en la ausencia de finos menores de 5 mm para las magnetitas y 8 mm para las hematitas, y que el tamaño máximo sea para los minerales 30, 25 o 20 mm; para los sinterizados de 40 a 50 mm, y para los pellets, cualquiera de los del mercado. La eliminación de los tamaños finos se justifica por considerar que son un veneno para la operación del horno alto, y en cuanto a la elección del tamaño máximo en el que como se ve hay más tolerancia, lo que se pretende es aumentar la permeabilidad del lecho y simultáneamente la homogenización de la carga que se considera imprescindible para evitar trastornos operacionales y favorecer la cinética de reducción indirecta, de modo que las cargas lleguen a la zona de fusión adecuada y homogéneamente reducidas.

Por la forma geométrica de los componentes, la de los pellets es la más favorable para conseguir el aumento de la permeabilidad que permite soplar mayores volúmenes de viento, y en consecuencia, aumentar la marcha del horno alto, pero tiene el inconveniente de disminuir su eficacia térmica estimada por la relación CO/CO_2 en el gas de tragante y de que con una producción mundial limitada (Tabla 1-51) los precios son todavía caros a pesar de haber disminuido.

Además, los minerales y los sinterizados bien clasificados también comportan una permeabilidad buena, luego la clasificación adecuada de éstos es otro camino para conseguir el mismo fin de aumentar la permeabilidad del lecho.

Se ha dicho que es imprescindible la homogeneización de la carga para evitar trastornos circunstanciales en la marcha de los hornos. Se ha conocido un caso concreto de trastornos frecuentes, en los que una de las causas era debida a la heterogeneidad de tamaños presentada - por un único mineral, en la que fácilmente se apreciaban los trozos de regular tamaño con cuatro especies minero lógicas puras (coalis, siderita, hidróxido de hierro y sílice + óxidos). Para conseguir la homogeneización es necesario un cribado previo de los minerales recibidos - como todo-uno y, posteriormente, moler los trozos grandes para volverlos a cribar. Se tiene con tal operación un beneficio adicional que es el de la estabilización - de las granulometrías y la disminución en la producción de polvos con los transportes siguientes hasta el horno alto. Es difícil dar una visión simple y general del - problema, porque las condiciones y exigencias de las - plantas varían en la eficacia del cribado.

Por último, se puede considerar como una cualidad importante la facilidad de transporte y cribado de los minerales todo-uno, de modo que los que tienen gangas arcillosas o limoníticas, tienen tendencia a ser pegajosas - y a aumentar su humedad y en el caso de disponer de instalaciones de capacidad de tratamiento limitadas, los minerales pueden perder su atractivo de utilización a pesar de otras ventajas, por ser muy difícil su manipulación.

PROPIEDADES QUIMICAS

Las buenas propiedades químicas son en muchos aspectos - opuestas a las buenas propiedades físicas; el acierto está en formar mezclas convenientes de modo que se contrarresten los factores negativos. Componer estas mezclas minerales de una manera técnica eficaz, supone estudiar las propiedades físicas y químicas de los minerales, sin terizados y pellets individualmente, y para ello se han desarrollado numerosos ensayos que proporcionan su estimación cualitativa. A continuación nos proponemos hacer un breve repaso de las propiedades químicas y físicas - más importantes.

CARBONATOS E HIDRATOS

Aun cuando un valor pequeño de las pérdidas por calcinación tiene en general poca importancia pudiendo ser un - factor favorable cuando se produce en la parte alta de la cuba del horno, por el aumento de la porosidad y permeabilidad de la carga, que favorecerían la distribución - del flujo de gases y las reacciones de reducción, junto con una absorción de calor en dicha zona que contribuiría a mantener baja la temperatura del tragante. En principio, las cargas bien preparadas deben estar exentas de - carbonatos e hidratos. Termodinámicamente se deduce que los potenciales de oxígeno en la fase sólida (mineral) - son función de términos constantes con la variable exponencial de la relación de elementos reductores (CO y H_2) a elementos oxidantes (CO_2 y H_2O) en la fase gaseosa, - luego al aumentar la concentración de estos últimos componentes (denominador de la fracción) por descomposición - de carbonatos e hidratos, disminuirá el poder reductor - de la atmósfera gaseosa. En este aspecto tienen ventaja, indudablemente, los procedimientos de preparación de la carga que implican su calcinación (sinterización y pelletización), pero es de notar que cuando los minerales no



están constituidos por carbonatos o hidratos, la buena - preparación no precisa de la calcinación.

En la operación diaria del horno alto, salvo raras excepciones se hace imprescindible la adición de carbonatos - en forma de fundentes. Se recomienda como buena norma el que la caliza y la dolomía tengan un intervalo de tamaño estrecho y de granulometría más bien baja, por ejemplo, que el 75 o el 80% del total de la adición esté comprendido en 25-50 mm. El objeto de esto es que la calcinación se realice en la parte superior de la cuba, en una zona de pequeña profundidad y bien definida para que disminuyan las reacciones de disolución de carbono.

INDICE DE BASICIDAD

(Es el formado por la relación de componentes básicos y ácidos de la carga ($\text{CaO} + \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 + - \text{SiO}_2$ y en ocasiones CaO/SiO_2 simplemente).)

Abstracción hecha de los pocos minerales de naturaleza básica, los mayores tonelajes son de naturaleza ácida. Los pellets, que en su mayor cantidad están fabricados con minerales pobres concentrados, tienen asimismo ganga ácida; la incorporación del fundente a su fabricación representaría una dilución perfectamente contraria al deseo de enriquecer los lechos, a la reducción de coste de transportes por unidad de hierro contenido y, en una palabra, a la mentalidad e intereses económicos de su fabricante minero, que termina su cometido en la producción del pellet, ya sea oxidado o más modernamente prerreducido. Ello justifica sobradamente la naturaleza ácida de los pellets, pero podemos añadir que en nuestra experiencia, la producción de pellets autofundentes con adiciones de un 10 al 12% de piedra caliza no es fácil, pues tenía como resultado el colapso de la carga en el tostado, debida a la explosión de los pellets cuando se alcanzaba la temperatura de descomposición de carbonatos. Se modificó el ciclo térmico de tostado en el sentido de disminuir la velocidad de calentamiento y los resultados fueron poco satisfactorios e indeterminados al no haberse insistido en el tema suficientemente. En otro aspecto, para conseguir el mismo fin se adicionó cal apagada, se aumentó extraordinariamente la producción de pellets crudos, pero su tostado no fue posible realizarlo por perder los controles de temperatura, debido a la alta corrosión de la cal en las cañas de protección de los termopares. Futuras investigaciones son necesarias en este sentido para obtener en los pellets índices de basicidad más próximos al requerido en la operación del horno alto.)

[En el estado actual, según se ha apuntado anteriormente, el problema se resuelve compensando la acidez de minerales y pellets con la fabricación de sinterizados superafundentes de índices de basicidad 3 o 4.) La operación de las plantas de sinterización en tales condiciones, tiene el grave inconveniente de poseer un ambiente extremadamente pulverulento, sobre todo en países de climas secos; parece ser buena la norma para conseguirlo, el comenzar a fabricar sinterizados de índice de basicidad 1.2 a 1.3 mediante la adición de cantidades moderadas de fundente y paulatinamente ir aumentando los porcentajes de adición y reconsiderando y evitando simultáneamente la producción de polvos de cada aumento sucesivo.

La caída brusca en las cifras de producción de la planta de sinterización y la disminución de la resistencia del sinterizado de elevado índice de basicidad, pueden aminorarse cuando las condiciones generales de la planta lo permiten, fabricando dos tipos de sinterizado, uno de basicidad normal y otro de elevada basicidad, pues dado que se ha de fabricar este último, se encuentra que la disminución de producción y resistencia del sinterizado pasa por un valor máximo para un índice de basicidad relativamente bajo, y luego, al aumentar los valores de la basicidad no van acompañados de un aumento lineal en las pérdidas de fabricación y en la resistencia del mismo, por lo que la alternativa es interesante y encuentra aplicación a utilizar en las plantas. Para evitar variaciones en los índices de basicidad se recomienda el control periódico y riguroso de la composición química de las mezclas a sinterizar por el sistema de desmuestra continuo.

De cualquier modo, es lógico que la proporción baja de componentes ácidos (SiO_2 y Al_2O_3) en los minerales, aumenta su utilidad porque disminuye el volumen de la escoria por tonelada de hierro. En el límite se puede llegar a

una proporción demasiado baja, como es el caso de algunos pellets fabricados con concentrados de minerales que dan lugar a propiedades mecánicas malas para su tratamiento en el horno alto, sin olvidar la necesidad de un volumen de escoria mínimo que asegure la desulfuración, y que - cuanto más bajo es este volumen las condiciones de marcha son más críticas.

El contenido de Al_2O_3 se considera también como una desventaja, pero hay que tener presente que, tanto la fusión como la fluidez de la escoria dependen del contenido en Al_2O_3 , por lo que interesa que su proporción sea óptima; en las prácticas nacionales su valor está entre el 10 y el 17% en las prácticas inglesas llega en ocasiones al 26%, el valor más frecuente en el arrabio básico es del 18%. Más importancia que su valor absoluto, la tiene la relación $\% Al_2O_3/SiO_2$ de modo que se recomienda que el $\% SiO_2$ sea de dos a tres veces el $\%$ de Al_2O_3 .

SELECCION DE MINERALES POR LOS CONTENIDOS DE S Y P

(El azufre se considera siempre como un elemento nocivo, pero deben recordarse las posibilidades de eliminarlo durante los procesos de sinterización y del horno alto. En general, con la sinterización se elimina del 30 al 70% del contenido total en la mezcla mineral a sinterizar. En el proceso del horno alto se elimina también gran parte del azufre por paso a la escoria, pero cuando el contenido de la mezcla mineral es alto, requiere aumentar la cantidad de escoria y su basicidad, incrementando las adiciones de fundentes básicos, lo que representa un gasto adicional de coque para la fusión del mayor volumen de escoria, que puede estimarse en unos 20 kg de coque por 100 kg de escoria.

La proporción de fósforo se tiene que considerar siempre en función de la clase de proceso de fabricación del acero. Teniendo presente las especificaciones de una acería corriente que normalmente exige $Si=0,7\%$; $S=0,030\%$ y $P=0.10$ a 0.15% , el operador del horno alto debe adaptarse a ellas en el conjunto, para lo cual es posible diferenciar el Si y S del P. Los dos primeros dependen, en cierto modo, de las condiciones de marcha, tales como composición en cuanto a basicidad y volumen de escoria que puede proporcionar el lecho, temperatura del viento y análisis del coque. En cuanto al P que está aportado casi enteramente por los minerales, no se pueden modificar operacionalmente las cantidades que pasan al arrabio, luego la alternativa requiere eliminar del lecho de fusión los minerales fosforosos que desafortunadamente son muy abundantes, pero indeseables con los modernos conceptos de los procedimientos de acería de mayor aplicación actual, lo que justifica la posición rigurosa respecto al contenido de fósforo en los minerales. En resumen, la selección de minerales se hará definitivamente entre los de contenido en fósforo bajo. Minerales de conteni-

do en fósforo medio 0.8 a 0.9, han perdido sus mercados por tal circunstancia. El tratamiento propuesto de molienda a 43 micras y separación magnética a baja intensidad, que disminuiría el fósforo a 0.35% (todavía de valor elevado), es un procedimiento de aplicación dudosa en las actuales circunstancias. Se ha estudiado un posterior tratamiento hidrometalúrgico para una nueva reducción en el contenido de fósforo que parece puede realizarse con éxito técnico, pero sospechamos que bastante apartado de la realidad económica a pesar de la ventaja adicional del enriquecimiento en su ley en hierro, que el producto aglomerado en pellets podría reportar. Una alternativa para la utilización de tales minerales que se puede considerar como un stock natural de interés nacional, es la de consumirlos en mezcla con otros bajo en fósforo, limitando su participación en el lecho de fusión a cantidades, digamos de un 20%, o cambiar el procedimiento de la acería.

Para la producción de acero ordinario los elementos traza (V, Ti, Mn, Cu, Co, Cr, Ni, etc.) en el arrabio son de poca importancia. Sin embargo, cuando se quiere fabricar fundición hematítica o aceros especiales, estos componentes tienen gran importancia y las exigencias en cuanto al análisis de los minerales son muy rigurosas. Las reglas generales en este sentido son difíciles de prestar, cada situación tiene sus exigencias típicas.

COMPOSICION DE LA GANGA Y SU INFLUJO EN LA ESCORIA

Definida la tendencia hacia minerales de contenido en hierro alto, queda todavía otro aspecto importante en su tratamiento, que es el aporte de la ganga, cuya composición define las propiedades de la escoria del horno alto.

Si la fabricación del hierro está determinada por la calidad y composición de la escoria, el estudio de ésta y la decisión sobre su composición es el factor más importante para cumplir las rigurosas especificaciones de la acería. Recordamos aquí lo ya dicho al tratar del índice de basicidad.

Se habla en la bibliografía de volúmenes de escoria de 150 Kg/t. Una marcha en tales condiciones no es fácil de conseguir, por el gran número de mejoras en cuanto a calidades de coque, etc., que es necesario incorporar, y por el estrecho margen de variación de su composición que se puede tolerar en la práctica rutinaria. De cualquier modo aún sin llegar a volúmenes de escoria tan bajos, es evidente que al disminuir estos volúmenes, la ganga de los minerales de donde proceden contarán de modo definitivo en las propiedades de la escoria, y cualquier alteración en la composición o el estado de las gangas afectarán profundamente a la marcha general del horno.

Como ejemplo se pueden mencionar los grandes transtornos operacionales que en la marcha diaria de una fábrica se tuvieron con motivo de la disminución en el contenido de alúmina en lecho, que llegó a ser crítico debido al estrecho margen de variación tolerable en el análisis; la solución se encontró incorporando a la carga escoria de acería para corregir, aumentando el contenido

de alúmina. El control sistemático, riguroso y frecuente de la composición de la carga (análisis de ganga) es imprescindible con la práctica moderna de operación del horno alto.

Por lo que se refiere al estado en que se presenta la ganga en el mineral, tiene gran importancia, pues su evolución para formar la escoria exigirá un consumo energético variable con las diferencias de composición entre la ganga y la escoria; el camino segundo en esta transformación no es conocido, las diferentes viscosidades de los posibles estados intermedios influirán profundamente en los resultados de la operación, pues indudablemente son causa de los principales trastornos habidos en la zona de fusión.

No existen técnicas de laboratorio para estudiar tales efectos. Las analogías aplicadas en la técnica rusa, empleando cera y brea, son de utilidad para relacionarlas con las caídas de presión en la cuba, pero no la tienen para definir la composición óptima. Hace algunos años se puso gran énfasis en las determinaciones de las temperaturas de reblandecimiento y fusión de los componentes de la carga, pero hoy día, tales procedimientos han perdido aplicación, tal vez por no haberse encontrado el camino para relacionar estas informaciones con los resultados de operación.

REDUCTIBILIDAD

Se define como la facilidad para que cada trozo de mineral individualmente libere su oxígeno en una corriente - uniforme de gases reductores, bajo determinadas condiciones de presión y temperatura.

Considerando la reductibilidad desde el punto de vista - cinético se define en función del régimen de cambio en - el grado de oxidación por minuto hasta alcanzar un nivel fijo de oxidación que frecuentemente es el de 40%.

En otras ocasiones la reductibilidad se mide por la pérdida de peso de oxígeno de la muestra, por unidad de superficie, y en la unidad de tiempo. También puede medirse en función de los gramos de hierro producidos por segundo y por cm^2 de frente de reducción bajo determinadas condiciones rigurosamente controladas.

Se reconoce la reductibilidad como el parámetro más importante en la caracterización de las propiedades de la carga. Su determinación experimental puede hacerse someténdola a ciclos térmicos complejos o isotérmicos, y - variando la composición química del gas durante el ensayo o dejándola constante. Además, la muestra puede mantenerse en reposo (ensayos estáticos); o en movimiento (ensayo dinámico de Linder). Hasta la fecha no existe ningún ensayo tipo de reductibilidad que sea comúnmente aceptado, si bien es de advertir, que son grandes los esfuerzos en caminados a normalizar un procedimiento y que se está en vías de ello actualmente. Los resultados de este informe se expresan como grado de oxidación después del ensayo, indicándose, en ocasiones, la velocidad con que se pierde el oxígeno y el tiempo necesario para alcanzar un determinado grado de oxidación.

Teóricamente, el horno alto es un proceso a contracorriente en el que las condiciones iniciales encontradas por los sólidos cargados, son el resultado de unas transmisiones de calor y de masas que tienen lugar a un nivel más bajo del horno. Como en los aparatos antiguos de laboratorio las condiciones de los ensayos sobre temperatura, composición de los gases y tamaño de las partículas se escogían arbitrariamente, no podían precisar un cálculo exacto del consumo de coque o estimar rigurosamente el efecto de un cambio en las condiciones de operación de una marcha determinada, porque no reproducían las condiciones de la cuba del horno alto; sin embargo, con los ensayos actuales se puede lograr una valoración suficientemente buena si las condiciones escogidas son bastante aproximadas a las reales. De modo que para predecir cuáles serán las proporciones de reducción directa e indirecta y con ello establecer el balance térmico total del horno alto o hacerlo parcialmente por zonas para distintos niveles de temperatura, en este último caso es necesario conocer las temperaturas a las que tienen lugar las distintas reacciones.

Técnicamente se reconoce que el grado de reducción indirecta de los materiales de la carga de horno alto no son solamente función de las propiedades de estos materiales. Indudablemente serán factores importantes las relaciones entre las temperaturas y las composiciones del gas, las velocidades del gas y de los sólidos y la presión de gas dentro del horno; todos éstos dependen de la carga total, incluyendo el coque, y de las condiciones de operación tales como consumo de coque, proporción de marcha, temperatura y composición del viento, inyección de combustible auxiliares en las toberas y alta presión en el tragante. Desde el punto de vista de las propiedades del combustible, la reactividad puede llegar a ser el factor que controle la cantidad de reducción indirecta alcanzada. -

Además, deben considerarse también como factores importantes la altura y forma del horno, pues influyen o determinan los tiempos de permanencia y las velocidades para una proporción de marcha dada.

De todos los procedimientos estáticos actualmente propuestos para determinar experimentalmente la reductibilidad, el que reproduce de modo más próximo las condiciones del horno alto es el SCICE (Stationary Charge in Controlled Environment) de Klemantowski. La técnica del tal procedimiento se basa en considerar un horno alto ideal con una perfecta distribución de la carga que desciende sin fricción contra las paredes y en contracorriente asciende un flujo de gas perfectamente distribuido.

Algunas de las limitaciones y desviaciones que encontramos en el aparato SCICE se derivan principalmente de considerar al horno alto como proceso ideal despreciando muchos factores de importancia, tales como la no uniformidad en la distribución de sólidos ni el flujo de gases, la eliminación de la abrasividad al considerar la carga estacionaria y del efecto del empaquetamiento por compresión al no tener que soportar distintas columnas de carga, la producción de polvos por choque térmico y químico y reacciones de disolución y depósito de carbono que modifican la composición y el flujo de gases, determinando además pasos preferenciales de los gases de ciertas zonas sin olvidar el efecto de pared especialmente importante debiendo a las diferencias entre los diámetros del aparato y del horno alto.

Muchas de estas limitaciones van perdiendo importancia de día en día, ya que las condiciones de marcha cada vez se

acercan más a las ideales

El resto de los aparatos estáticos para determinar la reductibilidad son, en general, de operación más fácil porque introducen dos nuevas simplificaciones al proceso ideal del horno alto, una respecto a la temperatura del ensayo, y otra en cuanto a la composición de la atmósfera. La primera consiste en tomar para los ensayos temperaturas comprendidas entre 900 y 1000° C, que corresponden a la zona determinada o denominada de reserva térmica del cambiador de calor que es el horno alto. La segunda, fija la composición de gases de un 30 ó 40 % de CO, y el resto, hasta completar el 100 % de N₂: esto se justifica pensando en que esta zona los porcentajes de CO son aproximadamente los citados, y por otra parte al ser los potenciales del oxígeno en fase sólida, función experimental de la única variable establecida por la relación de las concentraciones de CO y de CO₂ si esta última concentración es cero, los potenciales de oxígeno serán máximos para unas condiciones constantes de ensayo.

En resumen, las simplificaciones consisten en despreciar los valores de las reductibilidades que puedan conseguirse a temperaturas inferiores a las del ensayo, y en condiciones de la atmósfera menos reductoras, frente a los que se obtienen con las del ensayo que son mucho más favorables a la reducción. Fenomenológicamente, en el horno alto la zona de las condiciones citadas es la más extensa de la cuba y la más activa respecto a la reducción indirecta

Al no conocerse con seguridad la participación del H₂ en la reducción indirecta, la mayoría de los aparatos prescinden de él en la composición de la atmósfera.

Entre los numerosos ensayos estáticos que se encuentran en la bibli

bliografía , los experimentados en el curso de los últimos cuatro años , han sido el de Gakushin y el método VDEh.)

ENSAYO GAKUSHIN

Fue desarrollado en el Japón para determinar la calidad de los pellets. Existen varias versiones que se diferencian entre sí solamente en pequeños detalles; todas son isotérmicas y a 900°C . En el método operatorio la muestra se seca previamente a 105°C hasta peso constante, y se coloca en un cilindro vertical de acero inoxidable, donde se calienta en atmósfera inerte a la temperatura del ensayo. El fondo del cilindro está relleno de bolas de alúmina que actúan de precalentador del gas (Al_2O_3). El gas del ensayo es una mezcla de CO y H_2 en cantidad de 15 l/min. A la salida del tubo de reacción los gases se analizan de modo continuo para determinar la relación CO/CO₂, que permite seguir la cinética de reducción.

Los criterios que se utilizan para valorar la calidad de los pellets comerciales son:

- 1^o.- La extracción del oxígeno debe ser, por lo menos, del 60%.
- 2^o.- La resistencia a la compresión de los pellets reducidos de 12.7 mm Ø deberá ser de 25 kg/bola, como mínimo.

A continuación resumimos esquemáticamente las distintas versiones del ensayo: (1-30)

L-30

Versión N."	Peso Muestra g	Composición gas		Duración horas	Cantidad gas l/min	Temperatura °C
		CO %	N ₂ %			
Oficial 1958 (1)	500	30	70	3	15	900
Oficial 1962 (2)	500	30	70	3	15	900
Sumitoma (3)	300	30	70	3	15	900
Yawata (4)	300	30	68+2% H ₂	3	15	900
Fuji (5)	300	30	70	3	15	900

El grado de oxidación se calcula por la pérdida de peso de la carga y por el análisis químico de la muestra reducida.

La resistencia de los pellets reducidos se determina:

Por rotación en un tambor durante 30 min a 2.4 r.p.m. versión (1), y a 30 r.p.m., versión (2).

Mediante análisis granulométrico antes y después del ensayo, versiones (3) y (4).

Calibrando el tamaño medio de los pellets antes y después del ensayo, versión (4).

TABLA 1-31 Producción mundial de pellets

	U.S.A. t	Otros Países %	Total Mundial %
En el año 1965 fue	30,000.000	22,000.000	52,000.000
Para el año 1975 será	71,000.000	119,000.000	190,000.000

METODO VDEH

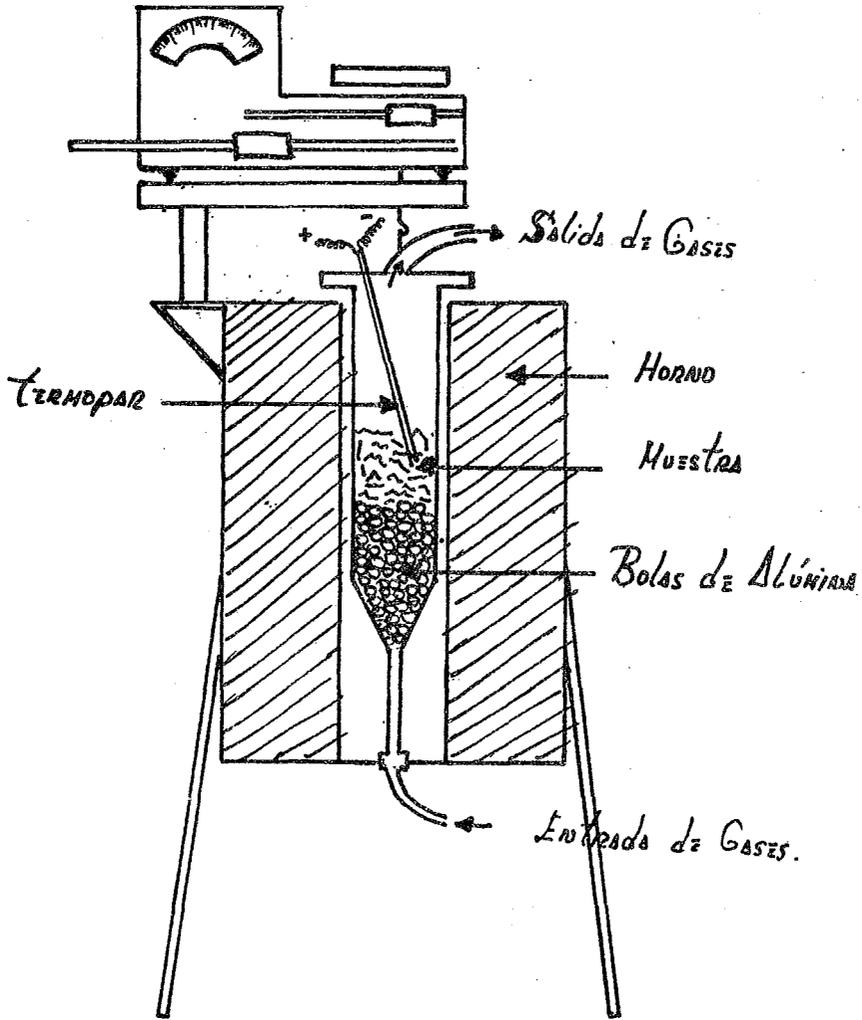
Como el anterior, es también de lecho estático e isotérmico. La diferencia fundamental radica en que con éste se sigue la cinética de las reacciones de reducción por la pérdida de peso de la muestra, que se determina de modo continuo durante el ensayo.

Inicialmente el peso de muestra era de 1,000 g, por diversas razones se redujo a la mitad, y los resultados que se dan a continuación se han obtenido con 500 g de muestra mineral.

El tubo de reacción, de acero inoxidable, es de 97 mm ϕ interior, su fondo se rellena de bolas de alúmina, que actúan de precalentador del gas, y sobre ellas se coloca una rejilla que soporta la muestra mineral a ensayar. Cuando el tubo está cargado se sitúa dentro del horno de calentamiento, suspendido verticalmente de una balanza de 1 g de exactitud, bajo carga constante de 9 kg y, además, ha de soportar tres tensiones fijas, dos de los tubos de conexión de goma para la conducción de entrada y salida de los gases, y la tercera del cable del termopar. Véase el esquema de la figura 1.32.

El calentamiento a 900°C se hace pasando una corriente de N₂, y alcanzada esta temperatura, que es la de reducción, se mantiene constante, cambiando la atmósfera inerte por la de reducción, formada por 40% de CO y 60% de N₂, la cual se continúa pasando hasta que la balanza no aprecia pérdida de peso. Seguidamente la muestra se enfría en atmósfera de nitrógeno.

Figura 1-32- Aparato de la VDEh



RESULTADOS OBTENIDOS CON EL ENSAYO VDEH

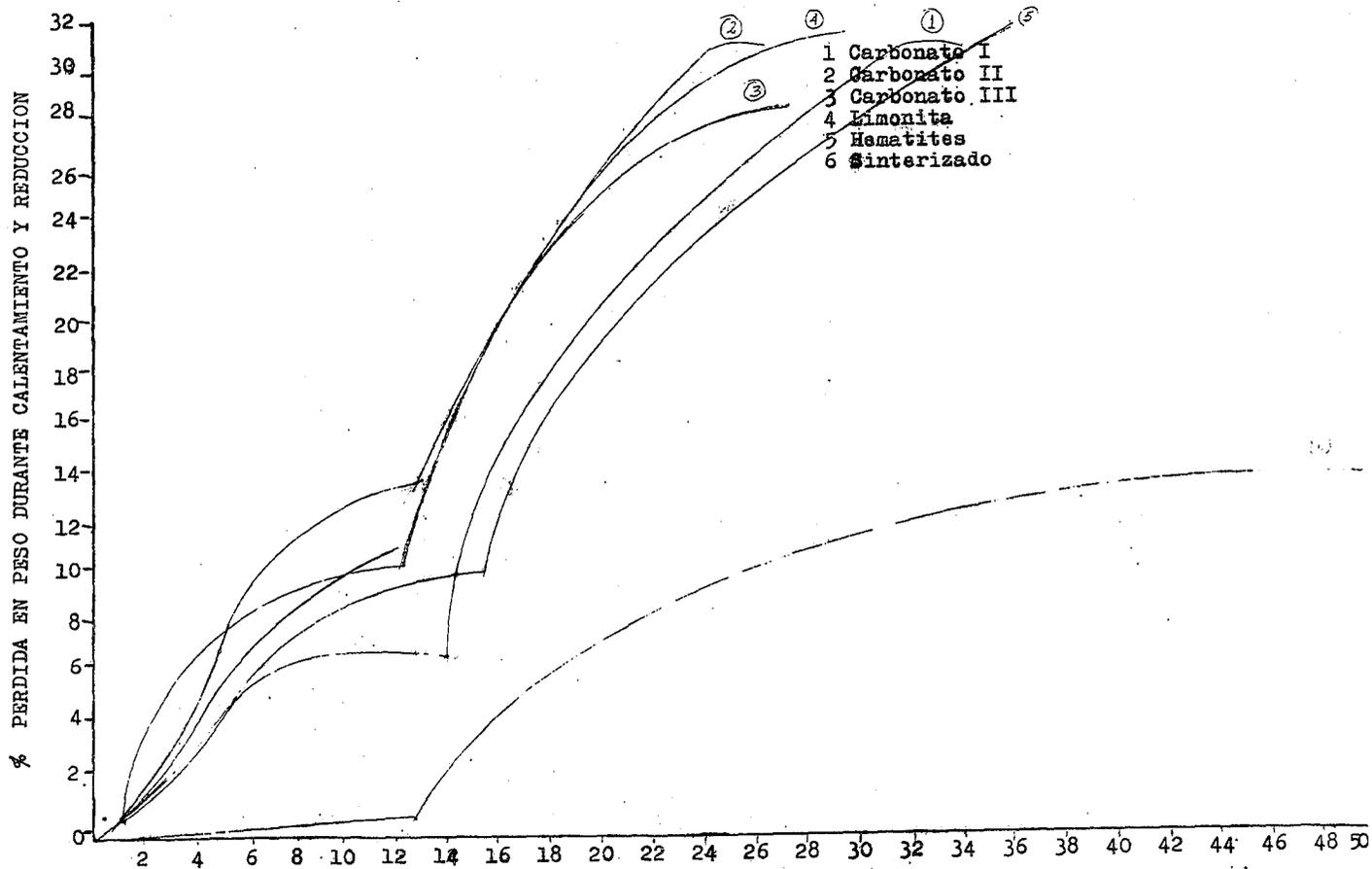
Este método se ha empleado para estudiar los minerales mezclados que componen los lechos de fusión de diferentes altos hornos, así como cada uno de los minerales y el sinterizado que se emplean en otros altos hornos para formar su lecho de fusión.

Los ensayos se han realizado con la fracción granulométrica comprendida entre 5 y 40 mm, para lo cual las muestras recibidas todo-uno se cribaron a 5 y a 40 mm; lo menor de 5 mm se despreció, y la mayor de 40 mm, molido en la quebrantadora de mandíbulas a 40 mm, se reincorpora a la fracción 5-40 mm separando los eventuales finos menores de 5 mm que se producen en la trituración.

De los resultados obtenidos tienen una gran importancia - la duración del ciclo de reducción por estar relacionados con el tiempo de residencia de las cargas en la cuba del horno (zona de preparación) o de reducción indirecta. La velocidad de descenso o el tiempo de residencia, pueden - determinar el grado de preparación (reducción y producción de polvos) con que las cargas pasan en su descenso a la zona de elaboración o de reducción directa y fusión. En la figura se recoge esquemáticamente la duración de los ciclos de reducción de los distintos minerales, sinterizado y lechos, que pueden utilizarse para seleccionar los - minerales que componen el lecho o cuando las condiciones de marcha del horno se fijan de antemano, o el case inverso para definir la proporción de marcha máxima con un lecho de fusión formado con tales minerales.

La figura 1.33 es un esquema de los porcentajes de pérdida de peso totales en los ciclos de calentamiento y de reducción, imputables al agua y al anhídrido carbónico de descomposición de hidratos y carbonatos y al oxígeno eliminado por reducción, respectivamente.

Figura 1-35



El comportamiento de los minerales durante los ensayos - está representado detalladamente en la fig. 7, que relaciona los porcentos de pérdida de peso con el tiempo, es decir; es decir, el comportamiento cinético de las muestras. Para cada mineral se obtiene una curva en dos tramos, el primero correspondiente al ciclo de calentamiento y, el - segundo al ciclo de reducción. Las abscisas de estas curvas deberán ser iguales para todos los ensayos, dado el pequeño peso de muestra, pues representan la duración de los ciclos de calentamiento; pero las variaciones de tensión eléctrica, los errores personales y otros, introducen modificaciones que sitúan la duración entre unas 2 y 2 h. 30 min., a las que corresponden unas velocidades de calentamiento de 6 y 7.5°C/min. La posible corrección de los tiempos de duración de este ciclo en la representación introduciría mayores dificultades para seguir el curso de cada uno de los ensayos, por lo que se ha prescindido de tales correcciones. Mencionaremos, no obstante, la necesidad de transportar al origen las curvas de la reducción cuando se requiera tener una visión comparativa de dos o más ensayos de reducción.

En la figura, claramente diferenciada del haz de curvas, la correspondiente al sinterizado, en el primer tramo - (ciclo de calentamiento) pone de manifiesto la ventaja de la calcinación que comportan los minerales preparados con esta técnica sobre los minerales crudos. Sin embargo, en cuanto a la reducción, es considerablemente inferior a la de los minerales, y se requerirá un mayor tiempo de residencia en la zona de preparación para alcanzar, en definitiva, un valor global de reducción considerablemente de productos férreos mencionados anteriormente, sugieren que debe revisarse la técnica de fabricación de tal sinterizado.

Por lo que se refiere a las discordancias en las cinéticas de reducción de los minerales, se pueden adoptar dos criterios, o bien limitar la participación de aquellos que introducen diferencias acusadas, o bien, disminuir la malla de cribado de los que tienen una reductibilidad menos favorable para que el conjunto sea homogéneo.

En la Tabla 14 se presentan los resultados de los análisis químicos, de los grados de oxidación, calculados a partir de ellos para antes y después de la reducción y de la producción. Los resultados indican que aunque la degradación es apreciable, la producción de finos menores de 5 mm no alcanza en ningún caso el 4%, por lo que no son de esperar trastornos operacionales en el horno alto por tal causa, - lo que simplifica la selección por este aspecto.

TABLA 1-34 - Resultados del ensayo VDEh

M I N E R A L	Fe _t	Fe ⁺⁺	Fe _t	Fe ^o	Fe ⁺⁺	Grado de Oxidación		Degradación 5 mm
						Inicial %	Final %	
Carbonato (1)	54,86	0,42	86,24	69,19	17,05	99,74	12,53	3,45
Carbonato (2)	57,01	0,28	75,73	62,27	13,46	99,83	11,86	2,44
Limonita.	52,03	0,28	73,30	61,14	12,16	99,99	10,51	--
Hematites	56,38	--	73,36	69,84	4,02	100,0	3,18	--
Carbonato (3)	53,7	0,56	66,62	59,46	7,16	99,61	7,11	1,16
Sinterizado..	50,13	8,36	59,70	41,85	17,85	94,44	19,94	0,80
Magnetita + Hematites comp. y grano fino ..	64,79	1,61	89,27	76,30	12,97	99,18	9,67	--

METODO DE LINDER

El método ideado por Rolf Linder considera las condiciones de la cuba de los hornos altos suecos y reproduce en un ciclo de 5 h de duración el calentamiento y la composición y flujo de gases en un aparato giratorio para determinar experimentalmente la reductibilidad, encontrando concordancia entre el grado de oxidación después del ensayo y el grado de reducción directa en el horno alto.

El aparato de laboratorio para determinar la reductibilidad está esquematizado en la figura 1-35. El tubo de reacción gira a 30 rpm y la muestra a ensayar está formada por 500 g de mineral, sinterizado o pellets, en mezcla con 200 g de coque.

Este ensayo se aplica muy extensamente, habiendo sido normalizado, lo que ha representado introducir pequeñas modificaciones en el primitivo método operatorio de Linder, que fundamentalmente son: aumentar el caudal de gases de 15 l/min a 20 l/min. e introducir hidrógeno en la composición del gas reductor. En la figura 9 se representan esquemáticamente el ciclo de calentamiento y la composición gaseosa de la atmósfera reductora en el ensayo normalizado, y se ve que en las dos primeras horas la temperatura pasa de 20 a 700°C a una velocidad de 5,66°C/min y en las tres horas últimas de 700 a 1,000°C a una velocidad de 1,66°C/min, siendo la composición de los gases la siguiente:

Atmósfera tiempo	CO %	CO ₂ %	H ₂ %	N ₂ %
1.a y 2.a horas	30,0	10,0	0,5	59,5
3.a y 4.a horas	31,5	5,0	0,5	63,0
5.a hora	32,5	2,0	0,5	65,0

Al finalizar el ciclo de 5 h la muestra se enfría en atmósfera inerte, después de lo cual se descarga el tubo, se separa a mano el coque, se tamiza por 1.68 y 0.595 mm y se hace el análisis químico, calculándose a partir de él el grado de oxidación por:

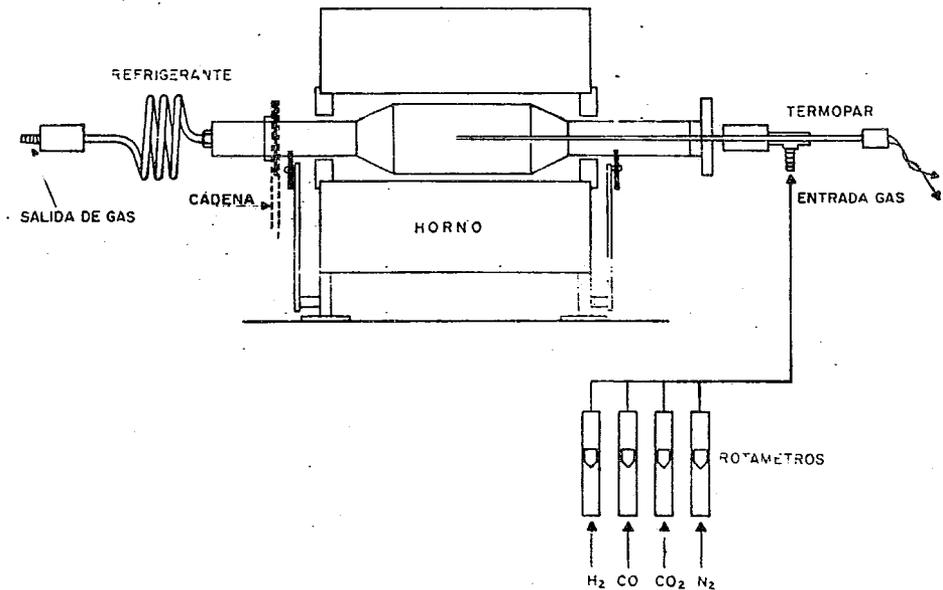
$$\% \text{ grado de oxidación} = 100 \left(1 - \frac{\text{Fe}^{\text{O}}}{\text{Fe}_t} - \frac{\text{Fe}^{++}}{3\text{Fe}_t} \right)$$

Este ensayo es de un gran valor comparativo y proporciona, además, una idea de la degradación debida a la abrasión y a la reducción simultáneamente.

Generalmente los materiales de alta reductibilidad se degradan considerablemente durante la reducción. En Norteamérica se da más importancia a la degradación en el ensayo Linder que a la reductibilidad, y se dice que la carga ideal no debe romperse en más de 10%, a menos de 1.68 mm. Es difícil comprender tal afirmación porque es difícil medir hasta qué punto se produce la degradación en el horno alto. Si los sinterizados japoneses considerados como de los mejores del mundo, se degradan en el horno lo mismo que en ensayo de Linder, no parece que la degradación tenga efecto alguno perjudicial sobre la operación del horno, pues aun cuando se admite que la carga de materiales finos es una mala práctica, quizá debido a la segregación de los mismos originada por el sistema de carga (tolva, campana), la degradación homogénea originada durante reducción de un sinterizado de granulometría uniforme y a una profundidad determinada dentro de la cuba del horno alto, dará lugar a que estos finos tengan una distribución uniforme a los niveles de su formación, que podrán reducir la permeabilidad global, pero no dar lugar a la formación de chimeneas o canales de pasos preferenciales de gases con el consiguiente arrastre de polvos en el gas de tragante.

En general, el ensayo de Linder es de gran utilidad para comparar entre sí reductibilidades de los materiales que componen la carga y también puede adaptarse al estudio de los efectos de la inyección de aceite pesado o hidrocarburos gaseosos con o sin enriquecimiento del viento, es decir, que permite simular cambios en la práctica del horno alto, aunque para correlacionar sus resultados con los de la marcha del horno alto se encuentran limitaciones, siendo una de las más evidentes la falta de similitud en el contacto entre gas-sólido en el horno alto y en el tubo del aparato de Linder.

Figura 1-35- Aparato Linder



CONCLUSIONES

- El desarrollo contemporáneo de la técnica del horno alto se debe, sobre todo, a la preparación de la carga que tiene — que ser rica, fácilmente reducible y de granulometría homogénea.
 - La experiencia y la técnica pueden mejorar los resultados de producción de la planta siderúrgica mediante una adecuada política de selección de minerales, y esto es independiente de que se empleen o no las técnicas avanzadas de inyección de los combustibles auxiliares por las toberas, de la contrapresión en el tragante, etc.
 - La política de selección de materias férreas para la práctica del horno alto moderno debe ser extremadamente cuidadosa. Las alternativas son muy variadas y las flexibilidades numerosas. La elección acertada está asistida por la información del departamento de investigación y desarrollo.
- Siempre existe un método óptimo para preparar las mezclas minerales que componen el lecho de fusión y no hay que juzgar la calidad de un determinado mineral hasta que se haya encontrado el método experimental adecuado de tratamiento y comprobado los resultados mediante ensayos de calidad.
- La calidad de los minerales cribados depende del tipo de yacimiento, de su composición mineralógica y del tamaño de los granos. La calidad de sinterizados y pellets depende de las propiedades físicas y químicas de los minerales de partida, pero de modo fundamental, de la habilidad técnica de sus plantas de fabricación.

- La carga al horno alto de materiales finos, menores de 5 mm, se considera comúnmente como una mala práctica, que origina la mayor parte de los trastornos operacionales. Con la reducción de los minerales se produce una degradación dentro del horno, localizada en la parte alta de la cuba, que disminuye la permeabilidad de la carga, y con ella la producción, pudiendo ser causa de trastornos operacionales.
- Respecto a los índices de basicidad, los componentes del lecho de fusión pueden considerarse como aditivos, propiedad que se emplea para compensar la naturaleza, generalmente ácida, de minerales y pellets.
- La reductibilidad se reconoce actualmente como el factor más importante para definir las propiedades de las cargas del horno alto. Los ensayos de laboratorio suministran una información muy útil.
- La reductibilidad de los pellets comerciales disminuye al aumentar el diámetro de las bolas y la temperatura de tostado. A igualdad de diámetro y de temperatura de tostado todos los pellets comerciales tienen reductibilidades e índices de degradación muy similares e independientes de los procedimientos empleados en su endurecimiento. Siendo su degradación invariablemente muy pequeña.
- Para una misma fracción granulométrica, dos distintos minerales tienen diferentes reductibilidades e índices de degradación que dependen de la composición y textura del mineral, de modo que las reductibilidades son mayores en las hematitas blandas que en las magnetitas duras; y con las degradaciones ocurre lo contrario, son mayores en las magnetitas que en las hematitas. El comportamiento de los carbonatos de hierro se distingue por sus elevados índices de reducción y degradación. Los resultados experimentales confirman las

ventajas de moler los minerales a tamaños relativamente pequeños y la posibilidad de obtener un lecho de reductibilidad homogéneo mediante molienda selectiva.

- El sinterizado ácido, duro y con elevado contenido de FeO - tiene una reductibilidad muy pobre.
- La técnica de fabricación de sinterizados y pellets será óptima cuando los fabricados tengan una buena reductibilidad-compatible con una razonable resistencia mecánica a la degradación en el tambor. La optimización es específica de cada mezcla.
- La degradación de los minerales por choque térmico parece ser que está relacionada con su estructura petrográfica y es otro importante factor a considerar, pues puede afectar profundamente a la operación del horno alto.

B I B L I O G R A F I A

- METALS HANDBOOK American Society for Metals.
- COAL, COKE AND COALS
CHEMICALS. Philip J. Wilson Jr and
Joseph H. Wells.
Mc. Graw - hill.
- FUELS AND COMBUSTION
HANDBOOK Allen J. Johson,
George H. Auth.
Mc. Graw - hill.
- FUELS COMBUSTION AND
FURNANCES John Griswold
Mc. Graw - hill.
- THERMODYNAMICS OF
STRUCTURE Jere H. Brophy
Robert M. Rose
John Wulff.
John Wiley and Sonss, Inc.
- COMBUSTIBLES Y REFRAC-
TARIOS J. D. Gilchrist
Alhambra, S.A.
- MANUAL DEL INGENIERO
QUIMICO John H. Perry
U.T.H.E.A.

CURSO DE METALURGIA

L. Quevron

L. Oudine

Editorial Aguilar.

TECNOLOGIA DE LOS METALES

Malishev G. Nicolajev

y Shuvalov

Moscú Paz, S.A.

METALLURGICAL ENGINEERING

Schuhmann, Reinhart.

Addison - Wesley.

METALURGIA GENERAL

Emilio Jimeno y

R.F. Morral

Madrid Saénz.

AN INTRODUCTION METALLURGY

Alan Howard Cotrell

London Arnold.

LA CONQUISTA DEL ACERO

Friedrich Toussaint

Düsseldorf, Stahlersen

ENCICLOPEDIA DE QUIMICA

INDUSTRIAL

Dr. Fritz Ullman

LA UTILIZACION EFICIENTE

DE LOS COMBUSTIBLES

Trad: Joaquin Ocon Garcia

Madrid.

Editorial Aguilar, S.A.

HIGH - TEMPERATURE MATERIALS AND TECHNOLOGY

Campbell, Ivor Eugene

New York, Wiley.

GEOGRAFIA DEL HIERRO Y
DEL ACERO

Joaquin Abadal Montal.
Barcelona Labor.

CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
OF LIME AND LIMESTONE

Boynton Robert S.

TRABAJOS DIVERSOS DE LA CO
MISION DE FOMENTO MINERO

Departamento de Estudios
Económicos.

TRABAJOS DIVERSOS (ESTADIS
TICAS) DEL CONSEJO DE RE-
CURSOS NATURALES NO RENOVA
BLES.

TRABAJOS DIVERSOS (ESTADIS
TICAS) DE LA DIRECCION
GENERAL DE MINAS Y PETROLEO

Secretaría del Patrimonio
Nacional.