

# Refractarios electrofundidos en los hornos de calentamiento\*

M. ESNAULT  
Refracel, S. A.

76/1/0051A

RESUMEN

Se hace una breve exposición de los materiales más empleados en este tipo de hornos y modos de instalación. Se estudia la influencia de las condiciones de trabajo de los hornos, temperatura, atmósfera y tipo de materiales a recalentar, y el comportamiento, según estas condiciones, de los diferentes tipos de refractarios, comparando los resultados de los ensayos de laboratorio con la experiencia industrial.

SUMMARY

A brief description is made of the materials mostly used in these types of furnaces and of the methods of installation. The influence of the working conditions of the furnaces temperature, atmosphere and type of materials to be reheated are studied, together with the behaviour, according to these conditions, of the different types of refractories comparing the results of laboratory tests with industrial experience.

RÉSUMÉ

On fait une brève exposition des matériaux les plus employés pour ce genre de four et ces façons d'installation. On étudie l'influence des conditions de travail des fours, température, atmosphère et genre des matériaux à réchauffer, et le comportement, selon ces conditions, des différents genres de réfractaires, en comparant les résultats des essais de laboratoire avec l'expérience industrielle.

ZUSAMMENFASSUNG

Die für diese Ofentypen am häufigsten verwendeten Werkstoffe und die Einbauarten werden kurz beschrieben. Untersucht werden der Einfluss der Betriebsbedingungen der Ofen, Temperatur, Ofenatmosphäre und Art der zu überhitzenden Werkstoffe sowie das Verhalten der einzelnen feuerbeständigen Materialien in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen. Die Ergebnisse der Laborversuche werden mit denen der technischen Betriebspraxis verglichen.

## 1. INTRODUCCION

Los refractarios electrofundidos son hoy día bien conocidos, y no consideramos necesario entretenernos con detalles de los procesos de fabricación y las diferentes presentaciones de esta categoría de productos.

Tendremos principalmente la ocasión de presentar, en el transcurso de esta conferencia, las propiedades de algunos refractarios electrofundidos aluminosos y no haremos más que evocar el interés de los básicos en casos muy particulares.

Nuestro principal objetivo aquí es exponer algunas teorías sobre el comportamiento de los refractarios, especialmente de los electrofundidos, en los revestimientos de los hornos de calentamiento, sobre todo las soleras de hornos de empuje, y la influencia de las condiciones de marcha de los hornos sobre este comportamiento. Pero para mejor situar el cuadro de nuestras observaciones en hornos industriales y ensayos de laboratorio, recordaremos primero algunas generalidades sobre los productos electrofundidos actualmente utilizados en hornos de calentamiento y sus principales métodos de instalación.

## 2. LOS REFRACTARIOS ELECTROFUNDIDOS ALUMINOSOS

Basaremos nuestra exposición sobre tres tipos de productos que pertenecen a las siguientes composiciones cristalográficas:

- A) Corindón-alúmina Beta.
- B) Corindón-mullita.
- C) Corindón-circona.

\* Conferencia pronunciada en la Sección de Refractarios durante la celebración de la XIV Reunión Anual de la S. E. C. V. celebrada en Bilbao, septiembre 1974.

Poseen los tres ciertas propiedades características de los electrofundidos, como la estructura compacta, la dureza, la resistencia a la compresión en frío y en caliente, la alta conductividad térmica, etc. Son fundamentalmente los productos tipo A y B los que se utilizan en hornos de calentamiento. El producto tipo C está destinado sobre todo a la vidriería, y en siderurgia, a los recubrimientos anti-abrasión. Su composición no es favorable para los hornos de empuje, pero ha sido ensayado con éxito en hornos Pits. Estos productos se presentan normalmente bajo el aspecto de bloques colados individualmente en su forma definitiva. Su peso es de 50 a 200 Kg y contienen habitualmente una cavidad interna debida a los rechupes, como se muestra en la figura 1 correspondiente a un bloque electrofundido cortado según un plano de simetría. El rechupe se localiza en la mitad superior del bloque, el cual quedará evidentemente colocado hacia el interior en un revestimiento. Este rechupe es debido a la contracción que se produce en la solidificación, la cual es superior al 15 %, pero el sistema de mazarotas permite reducir la porosidad total alrededor del 10 %. Hasta cerca de la mitad del espesor del bloque, la porosidad es solamente del orden del 1 al 2 %. Es ésta la zona que será objeto de la mayor parte de nuestras observaciones. Sin embargo debemos resaltar desde ahora que la zona de rechupe es utilizable en la mayor parte de los casos. La sección vacía es en efecto inferior al 25 % de la sección total, y ciertos usuarios desgastan, por ejemplo, 22 cm sobre 25, sin problemas.

### 2.1. LA SEGREGACION

Además de estos problemas de aspecto macroscópico, conviene precisar que los bloques electrofundidos

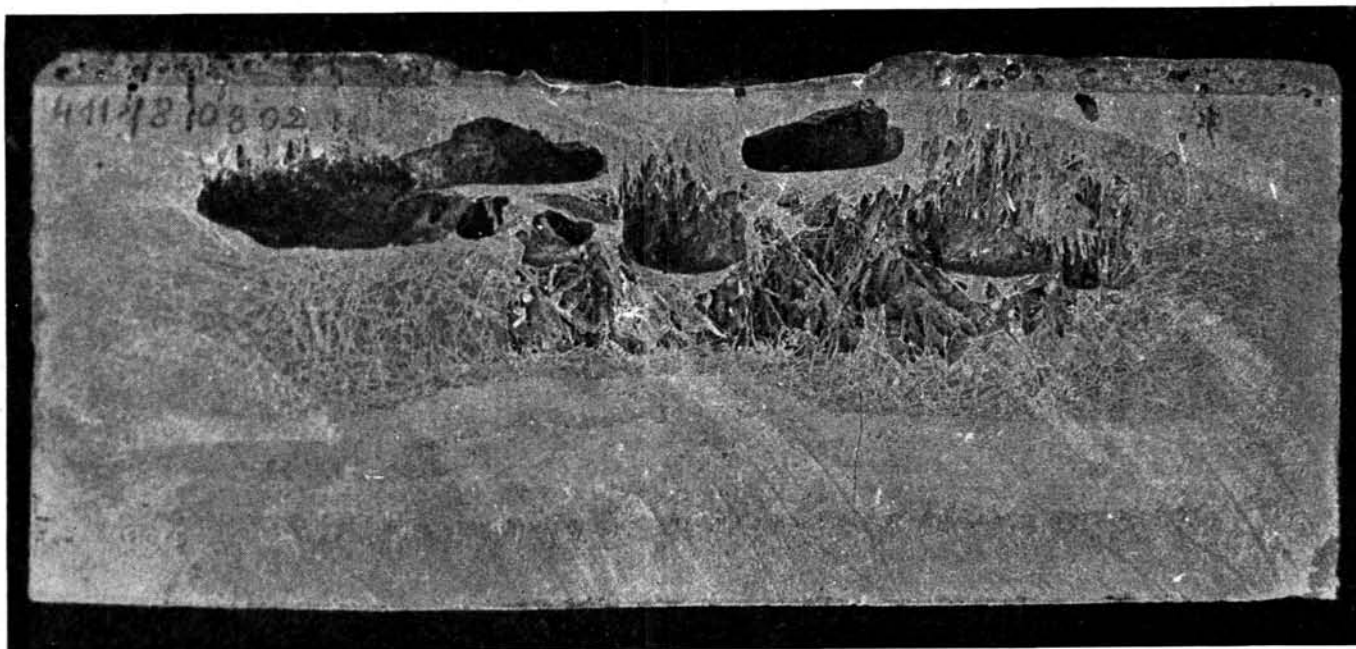


FIG. 1

de los que hablamos no están perfectamente homogeneizados desde el punto de vista químico y cristalográfico. Esto se debe a la segregación que tiene lugar y que obedece a las reglas habituales de la cristalización de una mezcla de óxidos líquidos. El caso de los productos conteniendo mullita es más complejo, precisamente por las condiciones de formación de la mullita. La figura 2 nos da un ejemplo de la variación posible del análisis químico y cristalográfico en el eje de un bloque de refractario a base de corindon-mullita. Es lógico que el análisis de una muestra cualquiera obtenida de un bloque no nos dé las características medias del mismo. Es el análisis del líquido tomado al calor quien asegura la constancia de la fabricación. Debemos realmente tener eso muy en cuenta, así como la segregación en las dimensiones, forma y orientación de los cristales, en la elección de las muestras para los diferentes ensayos de laboratorio y en la interpretación de los resultados.

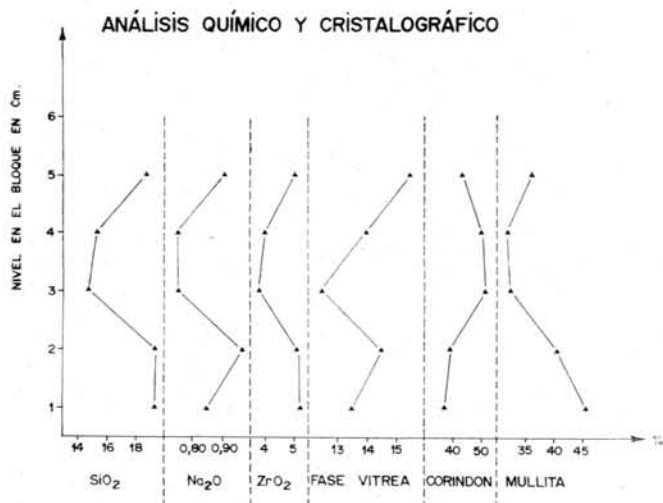


FIG. 2

### 3. REVESTIMIENTOS ELECTROFUNDIDOS ACTUALES

#### 3.1. HORNOS DE EMPUJE

El horno de empuje es la más antigua aplicación de los refractarios electrofundidos en la siderurgia europea.

Ya en 1956, bloques a base de corindon-mullita, conocidos comercialmente con la denominación de Corhart Standard, fueron colocados en raíles de pequeños hornos de palanquilla. Desde entonces, los progresos han sido muy importantes y métodos de instalación apropiados han sido puestos a punto para cada tipo de horno.

En los hornos de empuje los electrofundidos son utilizados en contacto con el acero recalentado, esencialmente en la zona de igualación, donde se puede sacar el mejor partido a las propiedades particulares de estos materiales. Se distinguen tres tipos principales de colocación.

a) El revestimiento mixto con un material aglomerado entre raíles constituidos por bloques electrofundidos de 20 a 30 cm de ancho.

b) El revestimiento homogéneo enteramente en electrofundido de una sola calidad.

c) El revestimiento mixto compuesto de dos materiales electrofundidos, de los cuales uno se coloca como raíles.

El tipo del revestimiento más apropiado es escogido en función de la constitución del horno, de sus dimensiones, temperatura de calentamiento, espesor y naturaleza de los productos a recalentar.

Para los hornos de calentamiento de llantones, el revestimiento más frecuente es la solera completa y homogénea en un solo material electrofundido a base de corindon-mullita. Este tipo de solera se ha conver-

tido, se podría decir, en el revestimiento estándar en la siderurgia de Europa occidental.

La variedad de formas de las piezas producidas en estas calidades de refractarios permite cubrir prácticamente, en cualquier caso, el conjunto de la superficie de la solera. Esto es posible a pesar de las dificultades impuestas por los tubos refrigerados que penetran en la solera, en el enhornamiento y deshornamiento, gracias a una serie de bloques con formas relativamente complicadas, que la moldeabilidad de estos productos permite realizar (fig. 3). Por otra parte, las soleras de hornos de llantones se benefician de una estandarización bastante completa para ser construidos con un número limitado de bloques diferentes. El espesor más frecuente es de 250 mm, lo que da a los bloques un peso del orden de 135 Kg; se pueden manipular fácilmente gracias a carretillas con ventosa. La construcción es por tanto bastante rápida, y en ciertos casos puede llegar a ser interesante la utilización de bloques más largos, por ejemplo, 900 mm, que sobrepasan los 200 Kg de peso.

La colocación es simple. El material no necesita más que una cama de pisé, bien sea aluminoso, o bien sea básico a base de granos fundidos, cuando hay peligro de infiltración de escoria líquida. Los bloques son colocados en seco, bien unidos los unos contra los otros:

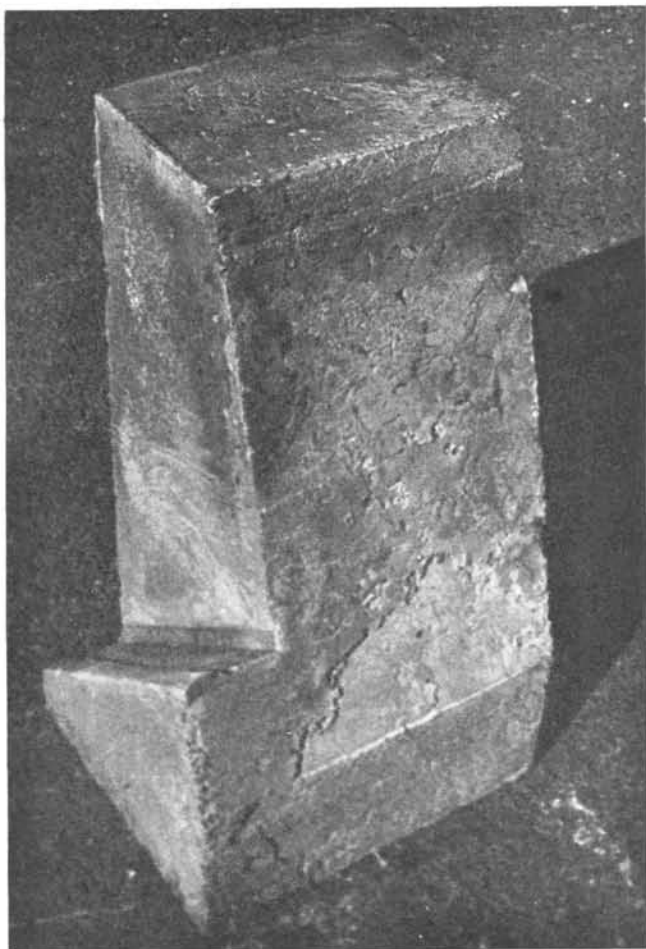


Fig. 3

la dilatación es en parte prevista bajo forma de cartones intercalares y, en parte, por los espacios a los lados de la solera, rellenos de masa apisonada. Los bloques de las hiladas de deshornamiento están a vé-

ces encamisados o separados por una chapa metálica para limitar el arrastre de escamas.

La solera mixta consiste actualmente en un reformamiento del producto a base de corindón-mullita con raíles de un producto a base de corindón-alúmina beta más resistente al desgaste. Veremos en el transcurso de nuestro estudio que esta solución presenta importantes riesgos de engrasamiento, aún mayores cuando la solera completa se hace con producto a base de corindón-alúmina beta. Un electrofundido nuevo a base de corindón-zircón está en curso de ensayo y esperamos pueda eliminar este inconveniente.

Hablando de los hornos de palanquilla y lingotes, la variedad en las condiciones de utilización es mayor y de la misma forma los tipos de colocación del refractario son más diversos. Los espesores del revestimiento se reducen a 150 ó 200 mm habitualmente. La idea base consiste en equilibrar el desgaste de las diferentes partes del horno. En la zona del enhornamiento el producto a base de corindón-mullita se utiliza bajo forma de raíles en una determinada longitud, después en solera completa en la zona de mayor desgaste. Se puede igualmente ajustar el espesor de los bloques en función del desgaste admisible.

### 3.2. HORNOS PITS

Vamos a recordar los diferentes tipos de hornos Pits para los cuales los electrofundidos tienen a priori propiedades interesantes. Estas se deben a la estabilidad de los grandes bloques, a su resistencia a la compresión, a su compacidad limitando la penetración del óxido de hierro y facilitando por lo mismo la limpieza. El electrofundido a base de corindón-mullita es corrientemente utilizado en la solera y las partes bajas de los muros en los hornos Pits de limpieza pastosa tipo *cokebreeze* provistos de escorieros de limpieza en la solera. Estos escorieros están equipados con bloques de cuña con chaffán y generalmente encamisados con una chapa de acero inoxidable. En esta aplicación lo que importa son las características generales de los electrofundidos, porque los tres productos reseñados en el apartado 2, muy diferentes químicamente entre sí, así como el producto B con rechupes dispersados en la masa, todos ellos han dado resultados técnicamente satisfactorios.

El producto a base de corindón-mullita es igualmente utilizado en hornos Pits con limpieza de escoria sólida en los que resiste en numerosas células hasta una veintena de limpiezas durante campañas de cuatro a cinco años. La rentabilidad debe ser estudiada en función de las condiciones particulares de la explotación de los hornos.

### 4. PROCESOS DE DESTRUCCION DE LOS REFRACTARIOS EN SOLERAS DE HORNOS DE EMPUJE

Basaremos la exposición de nuestras ideas concernientes al proceso de destrucción de los refractarios en soleras de hornos de empuje sobre el estudio del comportamiento de los revestimientos de electrofundidos, ya que es la solución más extendida actualmente; sin embargo, de ello deduciremos el interés de los electrofundidos en relación con los refractarios convencionales y el papel de la composición del refractario. Nuestra teoría se apoya en la síntesis de los estu-

dios de bloques usados en hornos industriales, observaciones directas en fábrica y ensayos de laboratorio que tratan de reproducir, de una forma simplificada, los fenómenos industriales. Trataremos de explicar las causas de los fenómenos principales de la destrucción de las soleras, que son la abrasión y el engrasamiento, en función de la naturaleza de los refractarios y de las condiciones de servicio de los hornos. Esta explicación será quizás más clara, teniendo en cuenta que los problemas han sido expuestos de una manera muy práctica, si **presentamos primero algunos resultados de laboratorio.**

#### 4.1. ENSAYOS DE LABORATORIO

Para los ensayos se utiliza un aparato que hace intervenir el frotamiento del refractario con el acero en vía de oxidación. El esquema del dispositivo de ensayo se presenta en la figura 4. La superficie refractaria está constituida por tres muestras cilíndricas dispuestas a  $120^\circ$  en un círculo; determinan un plano sobre el que se apoya una corona de acero que ejerce sobre las muestras una presión proporcional a su peso. Esta presión es habitualmente de 0,15 megabarias, que representan la de los llantones sobre una solera completa; presiones más elevadas pueden ser obtenidas esencialmente disminuyendo la sección de las muestras para reducir el frotamiento de palanquilla sobre los raíles refractarios. Todo ello está recubierto de una bóveda con quemador a propano que permite elevar las muestras y el acero a temperaturas del orden de  $1.300^\circ$ , reguladas con precisión, bajo atmósferas controladas en continuo. El soporte y las muestras de refractario están animados de un movimiento circular

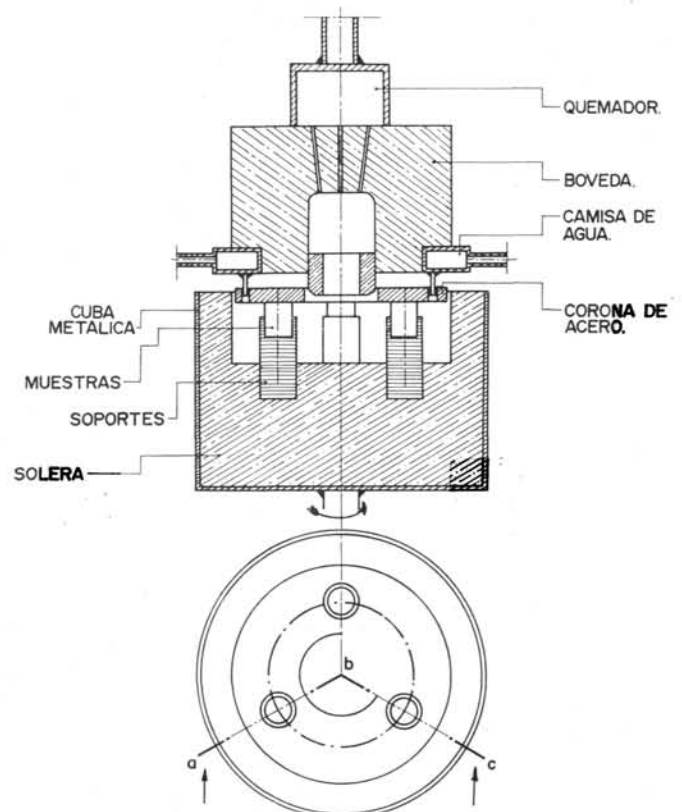


FIG. 4

ciones, son cortadas según su eje. Se mide la altura restante dándonos una medida del desgaste bruto  $U_b$ . El espesor de la capa de óxido de hierro  $d$ , correspondiendo a lo que llamaremos la tendencia al "engrasa-

TABLA I

Presión	Atmósfera	Temperatura °C	$U_p$ $10^{-2}$ mm.	$10^{-2}$ p mm.	$10^{-2}$ d mm.	Observaciones
1 Kg/cm <sup>2</sup>	3 % CO	1.300	960	290	150	"Engrasamiento"
		1.320	1.900	600	300	
	3 % O <sub>2</sub>	1.300	160	0	0	
		1.320	280	0	0	
150 g/cm <sup>2</sup>	3 % CO	1.300	420	200	70	Principio de "engrasamiento"
		1.320	980	390	210	
	3 % O <sub>2</sub>	1.300	90	0	0	
		1.320	110	0	0	

del orden de cinco vueltas por minuto. La corona de acero está libre en el sentido vertical, pero su rotación queda impedida por dos topos fijados a la bóveda fija. La corona se reemplaza cada dos días y se libera de la calamina midiéndose su pérdida de peso.

#### 4.1.2. RESULTADOS PRINCIPALES

Después de un ensayo de cuatro días o más las muestras, de la misma naturaleza para evitar interac-

miento". El total  $U_b$  más  $d$  corresponde al desgaste real  $U_r$ . Se evalúa igualmente el espesor de refractario transformado por la penetración de óxido de hierro  $p$ ; el total  $U_b$  más  $d$  más  $p$  corresponde a un desgaste potencial  $U_p$ , ya que la zona penetrada ha sido evidentemente debilitada mecánicamente. La tabla I da una primera idea de la influencia de los tres factores principales del ensayo: presión, atmósfera y temperatura, sobre el comportamiento de un electrofundido a base de corindón-mullita.

Se ve que el aumento de presión de 0,15 a 1 megabarias dobla aproximadamente el desgaste. No es, por tanto, un factor esencial.

La pequeña elevación de temperatura de 1.300 a 1.320 °C dobla también, como término medio, la velocidad de desgaste, sobre todo en atmósfera reductora.

En fin, se ve que el desgaste es muy débil en atmósfera oxidante, con un 3 % de exceso de oxígeno, y se multiplica por 5 a 10 en atmósfera reductora, con un 3 % de exceso de óxido de carbono.

La figura 5 pone de manifiesto la influencia de la atmósfera del horno sobre el desgaste en un material

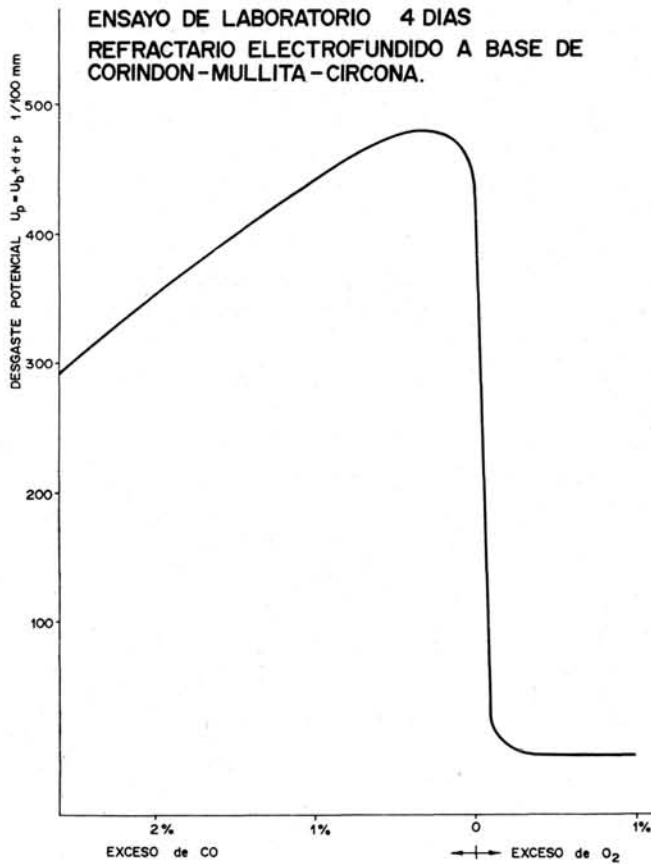


FIG. 5

electrofundido a base de corindon-mullita-circona. Se ve que el desgaste aumenta notablemente en atmósfera reductora cuando el exceso de óxido de carbono baja de 3 a 1 %. Después cae brutalmente a partir de la aparición del exceso de oxígeno. Paralelamente, la pérdida de peso de las coronas de acero, es decir su oxidación, aumenta.

Así, pues, la primera conclusión evidente es que el óxido ferroso o wustita, presente a las presiones parciales de oxígeno de  $10^{-10}$  a  $10^{-8}$ , es el agente agresivo principal y que su cantidad creciente aumenta el desgaste.

Para presiones parciales de oxígeno superiores a  $10^{-2}$  (fig. 6), los óxidos en equilibrio son la magnetita ( $Fe_3O_4$ ) y la hematita ( $Fe_2O_3$ ), poco agresivos para este tipo de refractarios. Se observa, pues, que el desgaste de estos refractarios en hornos de calentamiento es esencialmente de origen químico, y que la abrasión

juega un papel muy débil. Se observa igualmente que el desgaste y el "engrasamiento" son fenómenos de origen similar que, en las condiciones de los ensayos, evolucionan generalmente en el mismo sentido y de una forma aparentemente aleatoria, al menos para el producto a base de corindon-mullita.

Si se efectúan los mismos ensayos con los productos electrofundidos a base de corindon-circón los desgastes quedan multiplicados por seis. Por el contrario, con el producto a base de corindon-alúmina beta el coeficiente de frotamiento evaluado por la potencia

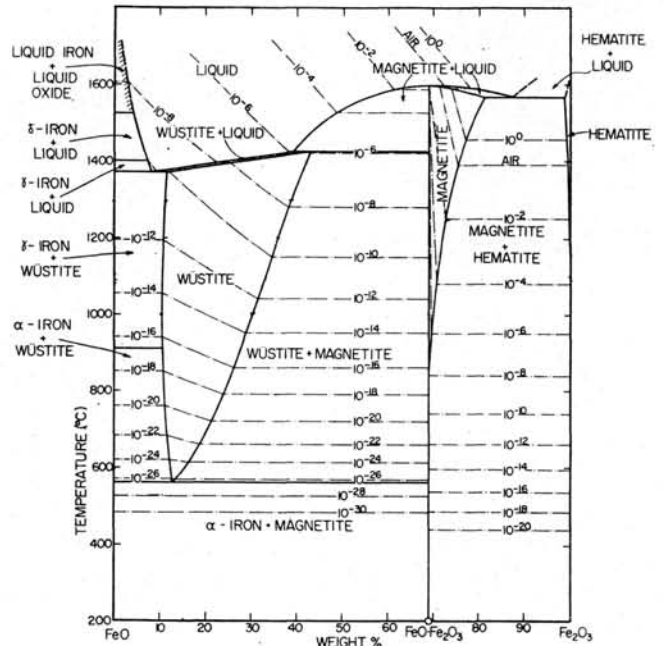


FIG. 6.—Relaciones de fase en el sistema  $FeO-Fe_2O_3$  basadas fundamentalmente en los datos de Darken y Gurry. (*Am. Chem. Soc. Jour.* 67, 1938-1412.)

solicitada al motor de rotación, sobre todo en atmósfera reductora, es tal que las películas de óxido son arrancadas del disco de acero y las muestras de refractario rompen rápidamente por flexión.

Se observa esencialmente "engrasamiento" y muy poco desgaste.

#### 4.2. OBSERVACION DE HORNOS DE EMPUJE INDUSTRIALES Y DE BLOQUES USADOS

De una forma general las mediciones de atmósfera que se han efectuado por encima de los llantones han mostrado que había siempre un exceso de oxígeno del 1 al 6 %, salvo quizás en los periodos de mantenimiento a baja temperatura 800-1.000°. Había, por tanto, una velocidad de desgaste no desconsiderable, y en el momento de las observaciones una cierta tendencia al "engrasamiento". Hay aquí una aparente discordancia con los resultados de laboratorio.

Veamos la realidad: en un horno donde existía una tendencia al "engrasamiento", el estudio microscópico de la zona de reacción de un bloque usado ha puesto de manifiesto que había tenido lugar un ataque por wustita. En la figura 7 se pone de relieve esta interfase. El ataque se inicia por la fase vítrea, más reactiva, y a continuación tiene lugar el ataque de la mullita

dando lugar a la formación de fayalita, la cual es líquida a la temperatura de 1.300 °C. Por último, el corindón reacciona superficial y lentamente dando lugar a hercinita, la cual es estable como segunda fase sólida en presencia de corindón, tal como se puede deducir del correspondiente diagrama de equilibrio  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-FeO}$ . El que estos productos sean sólidos implica que únicamente pueden ser arrancados mecánicamente para permitir el desgaste. Si no fuera así, se comprobaría que la wustita se pega a la hercinita.

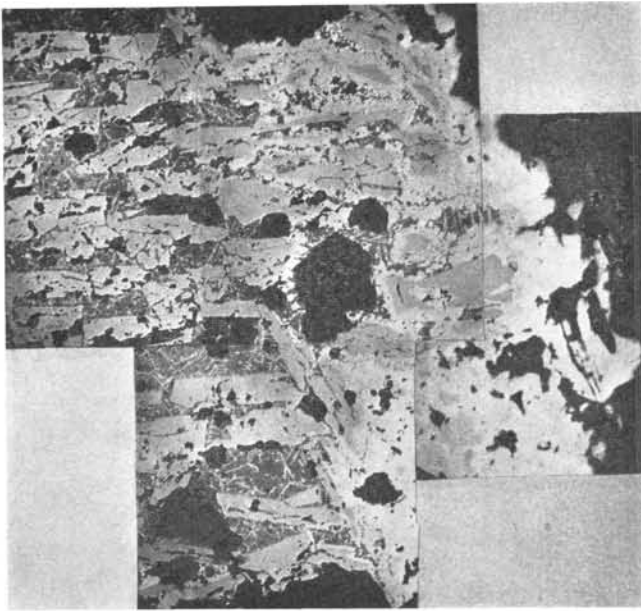


FIG. 7

Por otra parte, los análisis de escorias tomadas del horno, sobre la solera y sobre los llantones, y después templados, han mostrado que a pesar de la atmósfera oxidante su relación  $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$  los sitúan en el dominio de la wustita.

Una observación directa de un horno en periodo de "engrasamiento" ha permitido dar una de las explicaciones del fenómeno. Las placas de calamina se desprendían de las extremidades de los llantones, por ejemplo, bajo el efecto de una variación de temperatura o de un choque mecánico; después eran mezcladas y amasadas por los llantones siguientes. Es, pues, un óxido de hierro, cuyo análisis es el análisis medio de la placa de calamina y no el de su cara en equilibrio con la atmósfera, el que llega bajo presión en contacto con el refractario. Ahora bien, numerosos estudios han mostrado que, al contacto con hierro y en presencia de un exceso de oxígeno, la calamina está constituida por capas de los diversos óxidos de hierro, ferroso, ferroso-férrico y férrico. La proporción de estas capas cambia poco, mientras que el hierro se oxida y la relación  $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$  permanece cercana a 9. Esto explica los análisis globales que hemos encontrado y la posibilidad de reacción del refractario con la wustita. Hemos verificado que la escoria así colocada sobre la solera es fácil de limpiar en caliente en el transcurso de las horas siguientes, pero que si se espera, primero, el espesor de la capa aumenta; después, su adherencia a la solera aumenta y la operación de limpieza se hace penosa. A veces es necesario bajar la temperatura para efectuarla.

#### 4.3. SINTESIS

Los elementos precedentes han permitido esbozar una teoría que es generalmente confirmada por las consecuencias prácticas que se pueden deducir. Ella concierne a los factores que gobiernan la cinética de la reacción del óxido de hierro  $\text{FeO}$  con los refractarios.

##### a) La concentración del agente agresivo en óxido de hierro ferroso:

Una vez que la placa de calamina se ha desprendido del llantón, no está en equilibrio con el hierro y se puede oxidar en función de la atmósfera del horno. Su velocidad de oxidación se opondrá, pues, a su reactividad con el refractario. Es evidente que una atmósfera reductora mantendrá una alta concentración de óxido ferroso y favorecerá la reacción y, por lo tanto, el "engrasamiento" o el desgaste por erosión. Pero incluso en una atmósfera oxidante la reacción será posible en todo el dominio de la wustita (hasta  $\text{FeO}_{1,2}$  a 1.300 °C), no solamente a causa de sus propiedades químicas, sino también físicas.

La wustita permanece en un estado semiplástico, se amasa y compacta fácilmente sobre el refractario, mientras que los óxidos superiores son más "secos".

##### b) La cantidad de agente agresivo:

Mientras la calamina permanece fija a los productos a recalentar, su papel es despreciable. Pero como nos ha puesto de manifiesto el ensayo de laboratorio y la figura 5, cuanto más importante es la cantidad de escoria depositada sobre la solera, mayor es la reacción. Parece, además, que la calamina se desprende más fácilmente del llantón cuanto mayor es su espesor. La cantidad de escoria viene fundamentalmente determinada por las condiciones de calentamiento antes de la llegada sobre la solera de igualación, es decir, por:

*La temperatura*, sobre todo en zona inferior de calentamiento. Esta influencia es muy fuerte y un descenso de 20 a 40° es suficiente generalmente para disminuir considerablemente el desgaste y la tendencia al "engrasamiento".

*La atmósfera*. Cuanto más oxidante, mayor es la cantidad de calamina. Sin embargo, hemos visto que un exceso de oxígeno es necesario. El margen de maniobra es por lo tanto débil.

*La naturaleza del combustible*, esencialmente el contenido en azufre de los humos. Cuando el contenido de azufre del fuel pasa de 0,5 a 4 %, la cantidad de calamina puede doblarse.

*El tiempo*. La duración de la estancia de los llantones a alta temperatura favorece evidentemente la formación de calamina.

##### c) La temperatura en la solera:

Normalmente son los productos a recalentar los que calientan la solera. Por lo tanto, no se trata sólo de la temperatura en los hornos o la bóveda de la zona de igualación. Como consecuencia de los ensayos de laboratorio, en los que toda la zona de reacción está en equilibrio con la atmósfera del horno, hemos comprobado que 20 °C doblan la velocidad de reacción. Hay por tanto un interés evidente en descender esta

temperatura tanto como lo permita la laminación posterior.

Esencialmente, la superficie inferior de los llantones no debe estar sobrecalentada cuando entran en la zona de igualación. El máximo de calorías debe ser suministrado en la zona de precalentamiento.

d) *La presión sobre la solera:*

La presión favorece la mezcla y amasado de la escoria, su distribución homogénea y un buen contacto con la solera. La densificación de la escoria aminora su velocidad de oxidación y, por tanto, aumenta su reactividad. Sin embargo, veremos que un mínimo de presión puede ser útil para disminuir el "engrasamiento".

e) *La naturaleza del refractario:*

Ahora se comprende mejor el interés general de los electrofundidos. Como hemos podido ver, resisten perfectamente a la abrasión pura, es decir, en las condiciones en que la calamina es poco reactiva. Pero, además, la ausencia casi total de porosidad disminuye la superficie de reacción con los agentes agresivos y su penetración en el refractario. La superficie atacada del refractario queda mecánicamente resistente, pero en este aspecto un término medio debe ser encontrado entre el desgaste por erosión y el "engrasamiento". Ello es fácil con los productos a base de corindón-mullita, por eso son tan empleados, pero es casi imposible en las condiciones normales de recalentamiento con productos a base de corindón-alúmina beta del tipo A. ¿Cómo se desplaza este equilibrio desgaste-"engrasamiento"?

## 5. EL DESGASTE Y EL ENGRASAMIENTO

El equilibrio entre las dos formas de destrucción del refractario depende de la intensidad de la reacción wustita-refractario, de la resistencia mecánica, de los productos de reacción y del efecto de abrasión de los productos a recalentar:

a) Si la reacción es débil (por ejemplo, baja temperatura y atmósfera oxidante), los productos de reacción, incluso refractarios, son fácilmente arrastrados por abrasión. El desgaste es lento y el "engrasamiento" poco importante, incluso con los productos tipo A. Pero con los refractarios convencionales, moldeados y no moldeados, la reacción puede ser ya suficiente para comenzar el "engrasamiento".

b) Si la reacción aumenta (por ejemplo, temperatura creciente), pero con productos de reacción pastosos (formación de fayalita), aún pueden ser arrastrados. Entonces el desgaste resulta ya notable, pero el "engrasamiento" permanece muy bajo; es el caso de los productos a base de corindón-mullita de composición correcta.

c) En las mismas condiciones que b) si los productos de reacción son sólidos y resistentes a la abrasión, el desgaste es despreciable, pero el "engrasamiento" es inevitable. Es el caso de los productos a base de corindón-alúmina beta, sobre los que la capa de hercinita que se forma constituye un buen soporte para el pegado de sucesivas capas de wustita.

d) También a temperaturas moderadas en la solera, pero si la cantidad de calamina formada antes de la entrada en la zona de igualación es muy fuerte (por ejemplo, alta temperatura en la zona inferior de calentamiento), la acumulación de óxido de hierro puede ser más rápida que la erosión, y el "engrasamiento" aparece incluso en los productos tipo B.

e) Si la temperatura (sobre la solera) es todavía más elevada y la cantidad de calamina depositada suficiente, la erosión puede arrastrar muy rápidamente a los productos de reacción pastosos y el desgaste es muy rápido. Con los productos a base de corindón-alúmina beta, este fenómeno sólo puede producirse a temperaturas muy elevadas y normalmente "engrasan". Mejoras en los productos tipos B y C pueden disminuir el desgaste, sin que llegue a haber "engrasamiento". Parece que, con los refractarios convencionales, cualquiera que sea la temperatura, el espesor de la zona penetrada y la cantidad de productos de reacción son demasiado considerables para que puedan ser arrastrados. El engrasamiento es también el fenómeno habitual.

f) *Caso particular de los aceros al silicio:*

La temperatura de recalentamiento de estos aceros es normalmente muy elevada y la calamina contiene silicio que baja su punto de fusión. Las escorias son obligatoriamente líquidas y estamos en las mejores condiciones de reacción con el refractario, tanto más porque se ha comprobado que la sílice estabiliza la forma reducida del óxido de hierro. Se puede más bien hablar de desgaste por corrosión, es decir de disolución del refractario. Los electrofundidos tipo B son más sensibles a este ataque que los de tipo A, e incluso los electrofundidos básicos serían más convenientes si la escoria permaneciera siempre líquida. Pero el acero al silicio no representa generalmente más que una parte de la producción. La escoria líquida se cuele en gran parte por las puertas; una capa puede ser retenida sobre la solera y solidificarse por oxidación y baja temperatura, cuando se vuelve a calentar acero ordinario. Los fenómenos son entonces los mismos de los que hemos hablado antes; pero el "engrasamiento" puede ser favorecido, porque la capa, a veces espesa de escoria solidificada, constituye el mejor soporte para el pegado de más capas de wustita. Esta escoria puede ser refundida durante la campaña siguiente de aceros al silicio, pero también puede ser necesario desescoriar mecánicamente en estado sólido. Hasta el momento, sólo los electrofundidos tipo B permiten este desescoriado sólido, porque la penetración es poco profunda y la separación entre el refractario sano y la escoria puede ser realizada fácilmente sin peligro para el refractario. Por el contrario, los electrofundidos de alta alúmina tipo A o los básicos más resistentes químicamente no pueden ser desescoriados sin fracturación, porque la cohesión escoria-refractario es muy fuerte.

## 6. CONCLUSION

En el transcurso del presente trabajo, muy pocas veces se han dado cifras precisas, por ejemplo, relacionando las temperaturas tomadas en los hornos y las velocidades de desgaste del refractario. En efecto,

las únicas temperaturas que serían interesantes conocer con precisión, en valor absoluto, serían las de la zona de reacción y las de la calamina acumulada, eso en cada punto de la solera. Esto es, evidentemente, imposible experimentalmente. Pero se concibe fácilmente que, aun pareciendo iguales las condiciones de dos hornos, existan diferencias de por lo menos 20° entre ciertos puntos de las soleras, lo que vimos que era suficiente para provocar fenómenos de naturaleza e intensidad muy diferentes. Sobre una misma solera,

estas diferencias explican su desgaste irregular y a veces la aparición de nódulos en la prolongación de los tubos enfriados con agua.

Como consecuencia, para aprovechar mejor los refractarios, la conducta óptima del horno es sobre todo una cuestión de experiencia y de razonamiento a partir de las ideas que acabamos de presentar. Para esto es indispensable el máximo intercambio de información entre los especialistas de laminación y los fabricantes de refractarios.