

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA



DIFERENTES TIPOS DE REFRACTARIOS

124

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A

OSCAR DIAZ TOLEDO



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

CLAS. TESIS 1976.
AÑO U.T.
FECHA 123
PROC. _____
? _____



QUIMICA

Jurado asignado
originalmente
según el tema

PRESIDENTE: ING. MANUEL F. GUERRERO FERNANDEZ
VOCAL: ING. ALBERTO OBREGON PEREZ
SECRETARIO: ING. ALEJANDRO ESPRIU MANRIQUE DE L.
1er. SUPLENTE: ING. HUMBERTO MALAGON ROMERO
2do. SUPLENTE: ING. Ma. EUGENIA NOGUEZ AMAYA

Sitio donde se desarrolló el tema:

Biblioteca de la Facultad de Química

Nombre completo y firma del sustentante:

Oscar Díaz Toledo

Nombre completo y firma del asesor del tema:

Ing. Alberto Obregón P.

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MIS MAESTROS

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS

A MI TIA:

que con su esfuerzo y ayuda hizo posible
la realización de mis estudios.

"DIFERENTES TIPOS DE REFRACTARIOS"

	<u>Pag.</u>
CAPITULO 1.- Introducción.....	2
CAPITULO 2.- Fabricación.....	14
CAPITULO 3.- Formas Físicas.....	29
CAPITULO 4.- Propiedades.....	46
CAPITULO 5.- Tipos de Refractarios Disponibles...	80
CAPITULO 6.- Designación de Equipo en que se emplean.....	93
CAPITULO 7.- Selección.....	113
CONCLUSIONES.....	120
GLOSARIO.....	124
BIBLIOGRAFIA.....	129

CAPITULO 1

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

REFRACTARIOS

Se pueden definir como "Aquellos materiales no metálicos, que pueden ser usados en la construcción de revestimientos de hornos que operan a temperaturas elevadas".

La estabilidad a temperaturas elevadas, tanto químicas como físicas, es una cualidad necesaria que deben tener los materiales refractarios.

Puede ser necesario que, mientras se encuentran a temperaturas elevadas, deban soportar presiones o aguantar el peso del horno o su contenido o disgregación, resultante de rápidos enfriamientos o calentamientos, o cualquier otro esfuerzo que resulte del cambio de temperatura, abrasión mecánica producida por el movimiento del contenido del horno, ataque químico por los contenidos ya sean sólidos, líquidos o gases.

A principios de este siglo, prácticamente todos los refractarios de arcilla eran fabricados a mano o por el método conocido de extrusión. Aproximadamente durante el año de 1920, se encontró que las propiedades de los ladrillos podían ser notablemente mejoradas, si se les daba forma a presiones elevadas, con prensas. Algún tiempo después, mejoras muy apreciables en las propiedades físicas de los ladrillos prensados, se obtuvieron procesando las materias primas antes de ser moldeadas, de tal manera que una mezcla de granulometría escogida se pudo obtener. Más aún, otras mejoras se obtuvieron al hacer un alto vacío a la mezcla de arcilla durante el prensado. Una mayor uniformidad del producto se pudo obtener al tener control preciso de las temperaturas y atmósfera del horno durante el quemado.

DATOS DEL EQUILIBRIO DE FASES

Ciertas características de comportamiento, de naturaleza química y física, se pueden adelantar por los datos del equilibrio de fases de sistemas de óxidos refractarios. Son pocos los refractarios que como resultado del tratamiento térmico recibido están en estado de equilibrio químico completo. Eso puede ocurrir, sin embargo, en ciertos casos a una velocidad acelerada, cuando el refractario se expone más tarde a altas temperaturas de servicio. Aunque los refractarios en general, contienen varios óxidos, la mayoría de los productos fabricados se consideran, para mayor sencillez, como sistemas de dos o tres componentes óxidos. Durante el uso pueden éstos encontrarse con otros productos reactivos en forma de escombras, vapores o cargas del horno, que complican las reacciones físico-químicas.

Las relaciones cristal-líquido en estos sistemas tienen especial importancia en la comprensión de la facultad del refractario, para conservar su identidad al ser calentado o su estabilidad cuando se somete a esfuerzo. En particular, la viscosidad de la fase líquida y el grado de solubilidad en ésta de los componentes cristalinos del sistema, son influencias que no pueden despreciarse. Los diagramas adjuntos del equilibrio de fases representan sistemas típicos de óxidos refractarios calentados en aire. Las temperaturas se dan en $^{\circ}\text{C}$ y las composiciones químicas en %, a menos que se indique otra cosa.

Refractarios de arcilla y de alta alúmina. - Los óxidos esenciales de estos refractarios son Al_2O_3 y SiO_2 . El diagrama de equilibrio para este sistema se representa en la Fig. 1. Los puntos A y D indican los puntos de fusión de los óxidos esenciales a 1723 y 2050 $^{\circ}\text{C}$. En los refractarios cocidos a estas temperaturas, o cerca de ellas, la sílice está en forma de cristobalita y la alúmina en forma de corindón. El punto B indica el punto de fusión de la mezcla de composición eutéctica en este sistema a 1545 $^{\circ}\text{C}$. El punto C señala la temperatura de 1810 $^{\circ}\text{C}$, a la cual la mulita, el único componente en el sistema, se funde incongruentemente para formar corindón y un líquido. Este punto también muestra la composición del líquido. Los puntos 1 al 6 representan composiciones de varios productos refractarios industriales en el orden siguiente: arcilla silfcea cocida, caolín (deshidratado), los minerales de silimanita (andalucita) cianita y silimanita) mulita, diásporo y bauxita (los dos deshidratados). Aunque los refractarios de arcilla, que son predominantemente caolín, contienen apreciable proporción de líquido silfceo a las altas temperaturas de trabajo, son buenos refractarios porque el líquido es muy viscoso. Los refractarios de este sistema que contienen alúmina suficiente para estar cerca de la composición de la mulita, o por encima de ella, son en su mayor parte cristalinos a las temperaturas del horno y por ello, actúan como super-refractarios.

Refractarios de sílice. - En el ladrillo de sílice, hay dos óxidos importantes: SiO_2 y CaO . A causa del gran predominio de la sílice como fase separada, el comportamiento térmico del refractario está influenciado en grado mayor por la acción de las diferentes formas cristalinas polimórfas de distinta estabilidad térmica. (Ver Fig. 2).

El cuarzo, que es un ingrediente de todos los refractarios de sílice, se convierte durante el tratamiento térmico en una mezcla de las formas estables a temperatura alta, que son la cristobalita y la tridimita, con predominio de la primera. Aproximadamente 2% de CaO se agrega a las mezclas de ladrillo de sílice como "mineralizador" para acelerar la formación de cristobalita y tridimita y para formar la ligazón durante la cocción.

Cuando la cristobalita se calienta a unos 230°C, se invierte súbitamente de su forma cristalina de baja temperatura a la forma cristalina de temperatura alta, con gran aumento de volumen. Lo inverso ocurre al enfriarse. Esta debilidad característica es cosa reconocida, y en general los refractarios de sílice deben calentarse y enfriarse lentamente, en este intervalo de temperatura. La Fig. 3 ilustra la dilatación térmica de estos minerales de sílice.

Es práctica corriente usar ladrillo de sílice para techar los hornos por su resistencia a las cargas de - compresión, casi a su temperatura de fusión completa cerca de 1700°C. Esta rigidez se debe al entrelazamiento de la sílice cristalina y al hecho de que la cantidad de líquido formado (en realidad, dos líquidos inmiscibles) es relativamente pequeña y el líquido muy viscoso. La presencia de porcentajes, incluso pequeños, de - alúmina y álcalis elimina la inmiscibilidad y así reduce las propiedades refractarias; además, estos compuestos forman eutécticos de punto de fusión más bajos que las formadas por SiO₂ y CaO solos. Por esta razón, al beneficar las cuarcitas, se reduce el contenido de alúmina y de álcali si el ladrillo de sílice ha de usarse a - temperaturas muy altas.

Refractarios básicos. - Dos de los materiales refractarios básicos principales, la magnesita y la dolomita, doblemente calcinadas, tienen cierta similitud en su constitución mineralógica. Ambas consisten principalmente en una fase muy refractaria de cristales primarios en una matriz más fusible que tiene su origen en los óxidos accesorios naturales o en los que se agregan antes de la doble calcinación. Los cristales primarios pueden ser simplemente de magnesia o de magnesia y cal. Los óxidos accesorios pueden ser sílice, óxido férrico y alúmina. El sistema complejo de cinco componentes resultantes, CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-FeO₃, ha sido poco estudiado; pero los datos de equilibrio de sistemas afines de dos y de tres componentes dan información que - ayuda a comprender algunas de las reacciones más importantes que se producen.

Magnesita. - El óxido esencial es MgO. En la periclasa comprende la fase refractaria mayor. El óxido de hierro normalmente presente en la magnesita calcinada está en solución sólida con la periclasa en forma de la espinela MgO.Fe₂O₃, muy refractaria. Esta se funde incongruentemente a 1765°C. La relación de MgO y Fe₂O₃ en la fase más refractaria se indica en el diagrama de equilibrio del sistema (Fig. 4).

Como la composición de la espinela es MgO y Fe₂O₃ en la relación de 1:4 en peso, es evidente que la periclasa puede absorber considerable cantidad de Fe₂O₃, sin que se afecte seriamente su refractoriedad. - El papel del pequeño porcentaje de alúmina no está completamente aclarado y depende de si entra en solución sólida con la periclasa en forma de la espinela refractaria MgO.Al₂O₃, o en la matriz de sílice menos refracta

taria.

En el comportamiento de la matriz incluyen mucho las proporciones de sus principales componentes: CaO, MgO y SiO₂, como se ve en el sistema de tres componentes CaO-MgO-SiO₂ de la Fig. 5.

Como la cal es más reactiva con la sílice que la magnesia, la relación cal/sílice tiene interés para prever cuando ocurrirá probablemente la fusión. Si la razón molecular de CaO a SiO₂, por ejemplo, es menor que uno en la matriz, se formarán cristales de forsterita (2MgO.SiO₂), que se funde a 1890°C, y monticelita (CaO.MgO.SiO₂), que se funde incongruentemente a 1499°C; si la razón aumenta a uno, los cristales serán de monticelita; si la razón es 1,5, los cristales serán de mervinita (3CaO.MgO.2SiO₂), que se funde incongruentemente a 1577°C; y, finalmente, si la razón aumenta a 2, los cristales serán silicato dicálcico (2CaO.SiO₂), que se funde a 2130°C. En las proporciones de CaO y SiO₂ normales en la magnesita calcinada corriente, se observan más generalmente forsterita y monticelita, sólo ocasionalmente mervinita y muy rara vez silicato dicálcico.

Dolomita. - Los óxidos esenciales en este producto son CaO y MgO. La base de la Fig. 5, representa el sistema de dos componentes CaO-MgO e ilustra el carácter altamente refractario de todas las mezclas de estos óxidos. La temperatura eutéctica, de 2300°C, es muy superior a toda temperatura de operación práctica. Se agrega óxido de hierro antes de la calcinación como mineralizador y aglutinante. La mayor parte del óxido de hierro se une con la cal y forma un ferrito dicálcico (de hierro trivalente) fusible (2CaO.Fe₂O₃), que es principal material de la matriz. Parte del óxido de hierro pasa a solución sólida con la periclasa, exactamente como en el caso de la magnesita calcinada y, en grado más limitado, con los cristales de cal. El pequeño porcentaje de alúmina presente se encuentra en solución sólida en la matriz de ferrito, como aluminio-ferrito tetra-cálcico.

La Fig. 6, que es el diagrama de equilibrio del sistema CaO-Fe₂O₃, sirve para ilustrar la menor refractancia del componente principal de la matriz. El porcentaje de sílice se mantiene bajo en la mayor parte de la dolomita calcinada para aumentar su refractancia y su estabilidad física. Como la razón molecular de CaO en la matriz es probablemente mayor que la de SiO₂, se forman silicatos dicálcicos y tricálcicos que aparecen como cristales discretos o en pequeñas cantidades en la matriz de ferrito. El silicato dicálcico se dilata mucho alrededor de 10% en volumen, durante la inversión espontánea de la forma β a la γ, a la temperatura de 675°C, que va acompañada de la formación de polvo. Esto se ha vencido en parte por la reducción en el contenido de sílice o por adición de pequeños porcentajes de B₂O₃, P₂O₅ ó Cr₂O₃, que ac-

rán como estabilizadores e impiden la inversión.

Cromo. - La cromita contiene dos fases de interés: una combinación de espinelas, altamente refractaria, que comprende 74-95% de la masa, y una matriz menos refractaria, compuesta en gran parte de silicatos de magnesio hidratados, de los cuales son ejemplo la serpentina y el talco.

Se cree que existen las siguientes espinelas en la cromita: aluminatos, $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (hercita) y MgO . Al_2O_3 (espinela); cromitos, $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ (cromita) y $\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ (pirocromita); y ferritos, $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (magnetita) y $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (magnesio-ferrita).

ATAQUE QUIMICO

Los factores más importantes que causan probablemente la corrosión de los refractarios son: la carga del horno; las escorias, vapores y polvos que surgen durante su uso; los combustibles utilizados y el carácter oxidante o reductor de la atmósfera del horno. Muchos de los materiales corrosivos son alcalinos (básicos). Sin embargo, el uso económico de refractarios ácidos de arcilla y de sílice es factible si las temperaturas de operación son demasiado bajas para causar reacciones o si las propiedades físicas de los refractarios ácidos compensan por su utilidad cierto grado de pérdida por ataque químico.

La mayoría de los óxidos metálicos y escorias con que hay que contar en el refinado de metales, son de carácter básico y atacan fuertemente a los refractarios ácidos a temperaturas altas. Cuando se tropieza con óxidos básicos, los refractarios de magnesio son los que ofrecen mejor resistencia al ataque químico. Por razones prácticas, la magnesia puede combinarse con cromita para obtener mejores propiedades físicas y conservar aún la deseada resistencia química a los óxidos básicos. En los hornos de acero de hogar abierto, los refractarios de magnesita-cromo pueden encontrarse con magnetita (FeO), que reacciona con la cromita y produce hinchamiento y reventamiento en las superficies expuestas. Esto se contrarresta usando para estos casos ladrillo refractario fabricado con mezclas de granos gruesos del mineral de cromo rodeados de finas partículas de magnesita.

La magnesita, por su facultad de absorber fuertemente el óxido de hierro, actúa como amortiguador y retarda la reacción durante la mayor parte de la vida útil del refractario.

Los óxidos de cobre y de plomo son muy básicos, y en las operaciones en que estos óxidos se encuentran en concentraciones apreciables, el ladrillo básico ofrece la mejor resistencia al ataque. En los procesos en que se elaboran compuestos de cal y magnesia, la temperatura es igualmente uno de los criterios que —

afectan a la elección del refractario que ha de usarse, a causa del ataque químico. Los hornos de cal, por ejemplo, operan a temperaturas en general demasiado bajas, incluso en la zona más caliente, para reaccionar con los refractarios ácidos. En condiciones de temperatura más severas, son prácticos los ladrillos de alta alúmina.

Los álcalis Na_2O y K_2O atacan fácilmente a los refractarios silíceos a temperaturas moderadas, con formación de masas fundidas muy fluidas. Estas masas frecuentemente tienen tan poca viscosidad que escurren por las caras de la obra de albañilería y producen erosión física.

El ataque químico por el ambiente gaseoso no es tan frecuente como el de sólidos o líquidos.

En algunas operaciones de hornos, se deposita carbono sobre los refractarios y se quema en ellos. Esto puede crear condiciones reductoras y altas temperaturas locales. En estas condiciones, se observará que la sílice se reduce y se volatiliza.

La atmósfera oxidante aumenta la estabilidad de la mayoría de los refractarios, pues los componentes normalmente están en forma completamente oxidada. Sin embargo, el carburo de silicio al oxidarse deja algo de sílice libre que hace más susceptible el ladrillo a ciertos fundentes o reduce su resistencia. El ladrillo de carbón naturalmente, debe protegerse de toda atmósfera oxidante. Por su elevado contenido de cal, los refractarios de dolomita se desmoronan en atmósfera húmeda. La magnesita doblemente calcinada es mucho más estable y sólo se produce hidratación después de prolongada exposición al aire húmedo caliente.

Además de la composición, también ciertas propiedades físicas de todos los refractarios incluyen, hasta cierto grado, en la velocidad del ataque químico. Así, el ladrillo de bajo contenido de poros abiertos, o, más específicamente, de baja permeabilidad, resiste la entrada de líquidos y gases corrosivos. Por ello, los ladrillos aislantes, a causa de su alta porosidad, nunca se usan en contacto con escorias fundidas.

Como el ataque químico es de carácter tan variado, hasta la fecha no se dispone de un método de laboratorio para el ensayo normalizado que cubre todas las situaciones.

FUSION

Los óxidos refractarios puros a que se hace referencia en los diagramas de equilibrio de fases tienen puntos de fusión verdaderos. Cuando la mayor parte de los refractarios industriales se calientan gradualmente, se reblandecen en un intervalo de temperatura. Esto ocurre especialmente en el ladrillo de arcilla y alta alúmina, a causa de la formación de vidrio de gran viscosidad en la composición silícea eutéctica. El ladrillo -

de sílice, por ser principalmente sílice cristalina pura, se funde más netamente. El reblandecimiento de refractarios básicos, formados en su mayor parte por óxidos o espinelas de gran refractariedad, está influenciado por la refractariedad de los materiales de la matriz, silicatos de magnesio y de calcio.

El reblandecimiento se determina comúnmente, por medio del ensayo ECP.

Estos equivalentes de temperatura y los valores ECP de varios refractarios se dan en la tabla III.

Las máximas temperaturas de servicio recomendadas para el ladrillo de arcilla refractaria son generalmente algo más bajas que los equivalentes de temperatura ECP. Los ladrillos de calderos son una excepción y normalmente se exponen a varios centenares de grados más altos que la temperatura ECP., para aprovechar el reblandecimiento del ladrillo. El ladrillo de sílice se usa a temperatura muy próxima a la del ECP. El ensayo ECP se usa para comprobar la uniformidad de composición de los materiales brutos y acabados en la manufactura de refractarios y para clasificar los refractarios de arcillo por los métodos ASTM.

También se usa en ocasiones para determinar si el reblandecimiento observado en servicio, se debe a contaminación de fundentes o de otros productos.

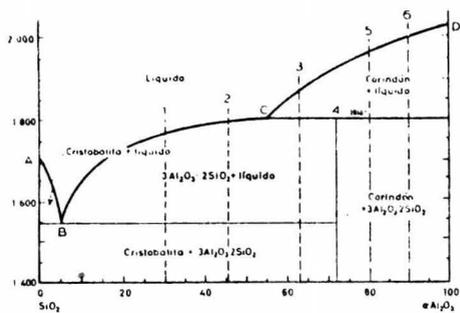


Fig. 1. Sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ (6). (La temperatura eutéctica en el punto B ha sido revisada a 1595°C . como resultado de un trabajo posterior.)

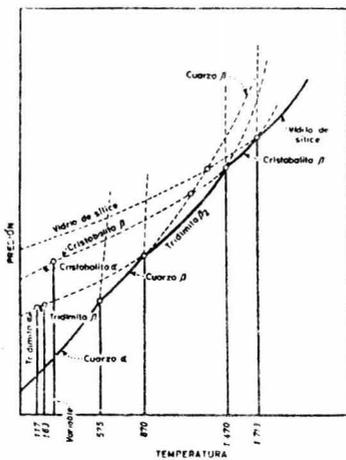


Fig. 2. Relaciones de presión de vapor (estabilidad) de los minerales de sílice (10, 11).

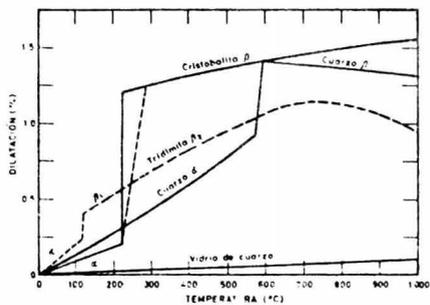


Fig. 3. Dilatación térmica de minerales de sílice (13).

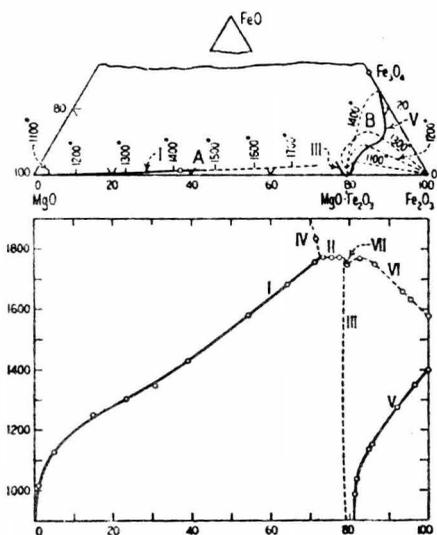


Fig. 4. Sistema $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ en aire a 1 atmósfera (23). (El diagrama superior, composiciones expresadas en porcentajes en peso; en el diagrama inferior, las abscisas representan las composiciones que se obtendrían después de oxidado todo el hierro al estado férrico; el sistema tiene dos campos de solución sólida: A y B.)

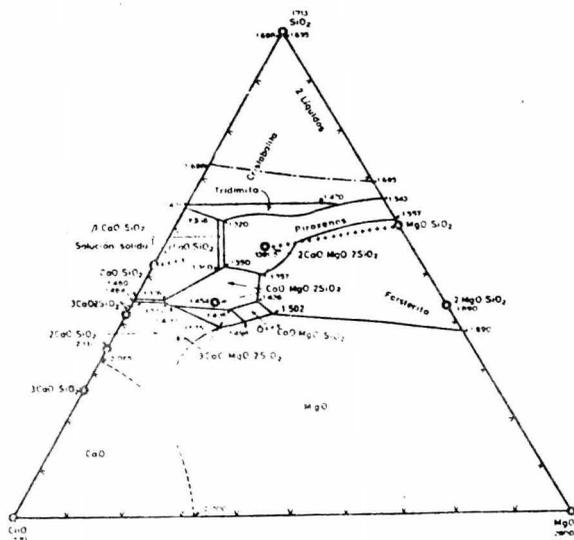


Fig. 5. Sistema $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2$ (18).

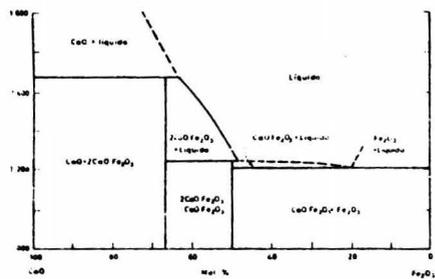


Fig. 6. Sistema CaO—Fe₂O₃. No es un verdadero sistema binario a causa del FeO (24).

TABLA III. Comportamiento físico de refractarios

Refractario	Módulo de rotura ¹ Kg/cm ²	Ensayo de carga (caliente) ² a 23 h (puls = 1,736 Kg/cm ²)		Cambio lineal de recalentamiento (permanente) después de 3 h a °C, %	Pérdida por descantillado (después de 24 h de pre- calentamiento a 1.600° C, peso %)	Equivalente de cono promedio ³	
		Subsistencia después de 3 h a °C (%)	Temperatura de corte con aumento de temp., °C			Nº de cono	Temperatura equivalente, °C
Ladrillo de arcilla refractaria	42-70	4-6 (1.450)	—	+0.8 a -0.6 (1.600)	1-4	33-34	1.745-1.760
Normal superrefractario	42-91	1-3 (1.450)	—	-0.1 a -1.0 (1.600)	1-4	33-34	1.745-1.760
Superrefractario extraresistente	42-91	1-4 (1.450)	—	-0.8 (1.600)	2-0	33-34	1.745-1.760
Superrefractario (tipo soldado)	42-70	2-4 (1.350)	—	+3.0 a -1.0 (1.400)	1:20 (1.600° C.)	31-32 a 33	1.688-1.715
Sesivo fuerte	36-84	3-13 (1.350)	—	+3.0 a -1.0 (1.400)	—	29-31	1.640-1.680
Sesivo medio	36-84	8.9-10.0 (1.350)	—	+2.0 a -1.0 (1.200)	—	19-26	1.520-1.745
Sesivo ligero	42-70	0.3-1.4 (1.350)	—	+0.2 a -0.2 (1.400)	—	28-31	1.615-1.680
Sesivo fuerte (tipo soldado)	28-49	—	1.680	—	No se aplica ensayo normalizado	30-32	1.650-1.700
Ladrillo de sílice	38-84	—	1.620	—	No se aplica ensayo normalizado	30-32	1.650-1.700
Superrefractario	38-84	—	1.620	—	No se aplica ensayo normalizado	30-32	1.650-1.700
Correa	38-84	—	1.620	—	No se aplica ensayo normalizado	30-32	1.650-1.700
Ladrillo de alta alumina	119-232	0-3 (1.650)	—	+0.1 (1.730)	4-6	42	2.016
99% de Al ₂ O ₃	81-98	1-3 (1.600)	—	+0.3 a 0 (1.600)	1-4	39 a 40-41	1.890-1.938
98% de Al ₂ O ₃	105-140	1-4 (1.450)	—	0 a -1.8 (1.600)	Regular ⁴	33-37	1.835-1.866
97% de Al ₂ O ₃	81-105	2-4 (1.450)	—	+2.0 a -0.5 (1.600)	—	36-38	1.810-1.835
96% de Al ₂ O ₃	42-61	2-4 (1.450)	—	+1.7 a 0 (1.600)	1-6	36-37	1.810-1.829
95% de Al ₂ O ₃	81-125	1-1.6 (1.450)	—	0 a -0.5 (1.600)	—	33 a 36-37	1.781-1.810
95% con Al ₂ O ₃ cristalino	38-105	4-6 (1.450)	—	-0.2 a -1.1 (1.600)	Buena ⁵	34-35	1.750-1.785
95% de Al ₂ O ₃	77-98	0-1.75 (1.450)	—	-0.8 (1.600)	1-6	37-38	1.816-1.845
95% Al ₂ O ₃ aluminosilicatos	81-125	—	+310-1.425	-0.2 a -0.6 (1.600)	—	—	—
Ladrillo básico	31-140	—	1.480-1.635	-1.0 a +0.5 (1.600)	—	—	—
Como correa	31-140	—	1.480-1.635	-1.0 a +0.5 (1.600)	—	—	—
Como magnesia (aglutinado químicamente)	63-105	—	1.650-1.680	0 a -1.0 (1.650)	—	—	—
Como magnesia correa	140-210	—	1.450-1.480	+2.0 a -1.0 (1.600)	—	—	—
Magnesita correa	92-158	—	1.480-1.570	-0.3 a -1.0 (1.600)	—	—	—
Magnesita con aglutinado químicamente	92-158	—	1.480-1.570	-0.3 a -1.0 (1.600)	—	—	—
Correa	92-158	—	1.480-1.570	-0.3 a -1.0 (1.600)	—	—	—
Ladrillo refractario especial	42-63	—	1.700-1.680	-0.3 (1.600)	—	—	—
Clase 1.600 F (1.371° C)	42-63	—	1.700-1.680	-0.3 (1.600)	No se aplica ensayo normalizado	—	—
Clase 2.000 F (1.102° C)	84-112	—	1.700-1.680	-0.3 (1.600)	No se aplica ensayo normalizado	—	—
Clase 2.300 F (1.239° C)	105-144	—	1.700-1.680	-0.3 (1.600)	No se aplica ensayo normalizado	—	—
Clase 2.600 F (1.426° C)	123-161	—	1.700-1.680	-0.3 (1.600)	No se aplica ensayo normalizado	—	—
Clase 2.800 (900° F) (1.571-1.648° C)	14-21	—	1.700-1.680	-0.3 (1.600)	No se aplica ensayo normalizado	—	—
Clase 2.800 (900° F) (1.571-1.648° C) (tipo correa)	12-6	—	1.700-1.680	-0.3 (1.600)	No se aplica ensayo normalizado	—	—
Refractarios especiales	—	0.5 (1.500)	—	+2.0 (1.600)	Buena/ Excelente ⁶	37-40	1.820-1.885
Carbón de silicio (carburo de arcilla)	140-210	1.0 (1.550)	—	1.2 a -1.9 (1.730)	—	—	—
Carbón	140-210	1.9-5.0 (1.600)	—	—	—	—	—
Carbón	140-210	1.9-5.0 (1.600)	—	—	—	—	—

¹ Ensayo A.S.T.M. C133-49 y C93-46.
² Ensayo A.S.T.M. C16-19, excepto para la temperatura empleada con ladrillo de 99% y de 90% de alumina y con el grupo de refractarios especiales.
³ Ensayo A.S.T.M. C113-36 y C210-46, excepto en los casos en que la temperatura pasa de 1.600° C.
⁴ Ensayo A.S.T.M. C38-49, C107-47 y C122-47.
⁵ Ensayo A.S.T.M. C24-46.
⁶ Se comparan bien con los datos cuantitativos para ladrillo de arcilla superrefractario, que se consideran excelentes.
⁷ 105 minutos.
⁸ Condiciones reductoras no sostenidas.

CAPITULO 2

FABRICACION

MATERIAS PRIMAS PARA REFRACTARIOS

Arcillas. - Los yacimientos de arcilla de diversos poderes refractarios están ampliamente extendidos sobre la superficie terrestre, con diversos grados de refractariedad. El principal interés es la presencia de caolín, arcillas refractarias, bauxita y diasporo.

La definición que se le puede dar es la de "un material terroso hidratado, que contiene una cantidad apreciable de alúmina o sílice y que puede mostrar propiedades de plasticidad".

Minerales de arcilla. - Contrariamente a la idea antigua de que la arcilla consistía fundamentalmente en un coloide amorfo, se conoce ahora, mediante las técnicas de difracción de rayos X, que sustancialmente todas las partículas de arcilla son cristalinas.

Las unidades estructurales que constituyen la red cristalina de los minerales arcillosos son el grupo Si-O (Fig. 8) y el grupo Al-OH (Fig. 9).

Cuando un grupo se superpone al otro, ambos se unen mutuamente para formar la caolinita (Fig. 10), o bien, con una disposición ligeramente diferente, para formar la dickita (Fig. 11). Estos dos minerales, que forman la base de los materiales del grupo del caolín, tienen la composición $(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4\text{Al}_2$.

Caolín. - El caolín no se utiliza nunca en los refractarios en forma de materia natural, debido a que experimenta una gran contracción durante la cocción, a que son necesarios hornos de alta temperatura para su cocción y a que exige el empleo en la mezcla de grandes proporciones de chamota.

Arcillas refractarias. - Estas arcillas son la columna vertebral de la industria del refractario. En este grupo se incluyen aquellas arcillas que tienen un punto de fusión superior a 1410°C (CPE 15) y no se vuelven blancas durante la cocción.

Algunas arcillas poseen un alto contenido en sílice, mientras que en otras los porcentajes de alúmina son superiores al 38%.

Diasporo. - Desde el punto de vista de fabricación, el diasporo (HA10_2) es excelente y presenta la suficiente plasticidad para permitir un buen trabajo al paso que ofrece excelentes propiedades de cocción.

Su composición química es aproximadamente de 72,4% Al_2O_3 , 10,9 SiO_2 , 16,7% de impurezas y óxidos. Los yacimientos más importantes están en los Estados Unidos de Norteamérica.

Gibsit. - $(\text{Al}(\text{OH})_3)$ - No son tan satisfactorias como el diasporo para la fabricación de refractarios a causa de su alta contracción durante la cocción.

La localización de los yacimientos más importantes se encuentran en Estados Unidos de Norteamérica,

Jamaica, en las Guayanas, Australia, Holanda, Bélgica y Rusia.

Su composición química es aproximadamente de 58,4% de Al_2O_3 , 4,5% de SiO_2 ; impurezas y óxidos un 37,1%.

Minerales de tipo silimanita. - Existen diversos minerales que tienen en su composición Al_2SiO_5 , lo cual arroja un 37% de sílice y un 63% de alúmina.

La silimanita. - Su yacimiento más importante se encuentra en la India.

La andalucita. - Su yacimiento más importante se encuentra en España.

La cianita. - Sus yacimientos más importantes se encuentran en la India, Australia, y la parte sur de Africa (Etiopía, Sudáfrica, Mozambique y Africa del Sudoeste).

Todos estos minerales se descomponen en mulita y sílice, cuando se les calienta por encima de $1555^{\circ}C$ en estado puro y, a temperaturas inferiores, cuando contienen algún fundente. Estos materiales reciben amplia aplicación para refractarios, pero a menudo se les confunde comercialmente entre sí.

Ganister. - Se le da ese nombre para designar la cuarcita verdadera. No todas las cuarcitas son adecuadas para fabricar refractarios, ya que es indispensable un alto grado de pureza y buena resistencia mecánica.

Su composición química aproximadamente es: 98,6% de SiO_2 , 1,1% de Al_2O_3 , 0,3% de óxidos e impurezas.

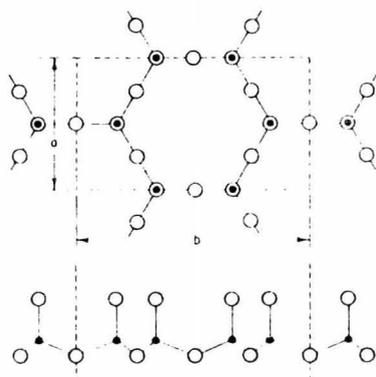
El punto de fusión de la cuarcita es cercano a $1700^{\circ}C$, y del mismo modo que la mulita, muestra - acaso reblandecimiento por debajo de su punto de fusión.

Esto tiene una importancia capital a la hora de utilizarlo como refractario, ya que mantiene su resistencia bajo cargas a temperaturas superiores a las de los materiales a base de arcilla refractaria. Sin embargo, debido a su elevada dilatación térmica, los materiales a base de sílice son muy sensibles a los cambios bruscos de temperatura en los intervalos inferiores de las mismas.

Tierra diatomeas. - Se usa principalmente como aislante de calor. Está compuesto de esqueletos de diatomeas, que son microorganismos. Las características más deseables de este material son sus celdas cerradas y por ello su alta porosidad, que proporciona una baja densidad y una baja conductividad térmica. Es un material ampliamente difundido en la naturaleza.

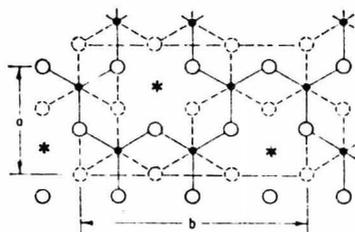
Materiales básicos. - Los refractarios básicos se utilizan para resistir las escorias básicas, y más recientemente debido a su resistencia mecánica a temperaturas elevadas.

Magnesita ($MgCO_3$). - Sus yacimientos se encuentran en: Australia, Manchuria, Grecia, India y Estados



○ : Oxígeno ● : Silicio

FIG. 7 La estructura (malla) tetraédrica.



○ Iones hidróxilo (OH) ● : Aluminio * : VACANTES DE RED

FIG. 8 La estructura (malla) octaédrica.

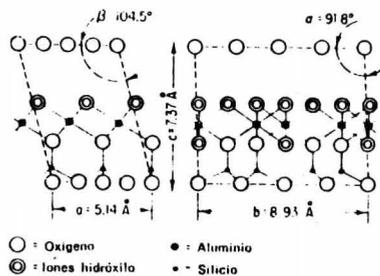


FIG. 9 Celdilla unidad para la caolinita.

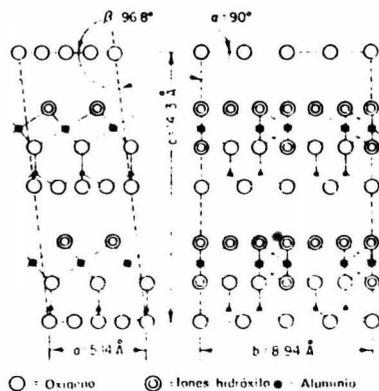


FIG. 10 Celdilla unidad de la dickita.

Unidos de Norteamérica.

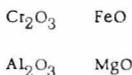
El óxido magnésico se extrae en la actualidad del agua de mar, de las salmueras y de los depósitos salinos tierra adentro. Este proceso de extracción consiste esencialmente en la precipitación, en forma de hidróxido de magnesio que, en cantidad de 0.013%, se encuentra en el agua de mar, por medio de la adición de hidróxido de calcio. El calcio se obtiene de los caparazones de los moluscos o bien de la dolomita.

El precipitado se filtra, se seca y se calcina en un horno rotatorio.

El proceso está altamente mecanizado, ya que es necesario manejar grandes cantidades de agua de mar para obtener una tonelada de magnesita.

La magnesita utilizada en los refractarios se calcina a muerte a temperaturas de 1550 a 2000°C, en un horno de tiro o rotatorio. El producto final, bastante denso, consiste en cristales de periclasa (MgO).

Cromita. - El mineral de cromo contiene una solución sólida de espinelas que se asemejan entre sí :



La cromita se presenta asociada con feldespatos, sílice, carbonatos, etc. Los principales yacimientos se encuentran en Albania, Filipinas, Turquía, República de Sudáfrica y Rhodesia del Sur.

OBTENCION DE LA ARCILLA

Con pocas excepciones, las arcillas se extraen por uno de dos procedimientos: la operación a cielo abierto o de cantera, y la operación de zapa o de mina. Algunos yacimientos de arcilla se explotan todo el año, y otros sólo en el verano. Los primeros ofrecen la mejor oportunidad para instalar maquinaria mecánica. El método de explotación está subordinado a la demanda diaria. En los yacimientos que se explotan por corto tiempo, por ejemplo, sólo cuatro meses al año, no siempre se puede utilizar económicamente la clase de maquinaria que se usa cuando es más largo el período de explotación, pues no es costeable el equipo pesado para períodos cortos de trabajo. Una planta que fabrique 50 000 ladrillos por día requiere diariamente entre 135 y 180 toneladas de arcilla. Es de suma importancia la producción constante. Rara vez se dispone de espacio de almacenamiento, o éste es limitado, de suerte que la regularidad de funcionamiento de la planta depende directamente de las operaciones de extracción de la arcilla. Por consiguiente, al comenzar la explotación de un yacimiento hasta cierto punto están subordinados a este factor la elección de la maquinaria, la mano de obra y la magnitud del laboreo. Estos deben ser de tal manera, que con ellos se logre la constancia deseada de producción.

Los caracteres geológicos y topográficos del yacimiento afectan el método de operar, por cuanto de ellos depende la dureza de los materiales, la cantidad y naturaleza de la sobrecarga, la existencia y distribución de materiales indeseables, la profundidad de los yacimientos, la conformación del terreno, etc. Cuando hay una sobrecapa de 0,90 m los métodos de desmonte no son aplicables a la extracción de 3 m de sobrecapa; un frente de trabajo de 1,8 m de material neto no es explotado de la misma manera que una altura igual que contenga materiales indeseables, ni es acertado explotar un yacimiento de 1,80 a 5,0 m de material, en la misma forma que otro de 15 a 25 m de espesor. Los caracteres geológicos de un yacimiento no afectan tanto la cantidad de maquinaria como la clase de ésta.

Es un factor importante la distancia que hay entre el sitio en que se ejecutan las operaciones de laboreo y la planta. Con frecuencia están contiguos ambos sitios. La arcilla para productos estructurales rara vez se transporta a más de una milla (1 609 metros).

Con respecto a la elección entre la operación de zapa y la de ^{el}cierro abierto, se puede decir en términos generales, que se prefiere la primera:

- 1) Cuando el material es tan valioso que justifica dicho método; por ejemplo las arcillas refractarias que se han de emplear para la fabricación de artículos comparativamente caros;
- 2) Cuando la razón entre el espesor de la capa del material deseado y la sobrecapa es de menos de 1: 3;
- 3) Cuando el estrato del material es por lo menos de 1,20 m de espesor;
- 4) Cuando el yacimiento de arcilla se presenta asociado a hulla.

Los métodos de zapa o explotación de mina son, en general, semejantes a los de la explotación de minas de hulla. Por regla general, no es económico hacer una mina profunda para extraer arcilla, a menos que haya hulla en cantidad considerable. Algunas arcillas refractarias se extraen de minas profundas, cuando se requiere esta particular calidad de material para productos especiales.

MÉTODOS PARA PRODUCIR EL LADRILLO REFRACTARIO:

Calcinción. - Es un tratamiento térmico a alta temperatura, para preparar las materias primas para el uso. Está destinada a desprender los componentes volátiles combinados químicamente, a desarrollar el estado físico deseado y a producir contracción, con el fin de eliminar ésta considerablemente durante la calcinción fi

nal del ladrillo. El proceso se efectúa en hornos periódicos o rotatorios. Estos materiales calcinados reciben el nombre de chamota, que también se aplica al ladrillo refractario molido.

La calcinación es de aplicación limitada en las arcillas refractarias y materiales diaspóricos, pero la bauxita para usos refractarios ha de calcinarse siempre a temperaturas muy altas, para obtener un agregado duro, denso y que no se contraiga. La cianita también ha de calcinarse para ablandar el mineral, con el fin de molerlo fácilmente y convertirlo en mulita, forma cristalina, estable térmicamente. Esta conversión va acompañada de alta dilatación que sería indeseable durante la calcinación del ladrillo.

La magnesita y el hidróxido magnésico precipitado del agua del mar (y de salmueras), se calientan a 1 600°C o más, en hornos rotatorios para obtener los granos de magnesia calcinada granular adecuada para fabricar ladrillos y otros usos. La dolomita también se calcina. La calcinación se hace en horno de cuba o en horno rotatorio a 1 100°C o a temperaturas más altas.

En la calcinación se agrega desperdicio de taller de laminación, en cantidad equivalente de 5-12% de óxido de hierro, a la roca triturada y se calienta en horno rotatorio a unos 1 650°C. Se obtiene también dolomita calcinada en máquinas de sintetizar.

Trituración y molienda.- Las arcillas duras requieren trituración previa en terrones suficientemente pequeños para el equipo de molienda. Se usan trituradoras de mandíbulas, giratorias o de rodillos, según las propiedades físicas de la arcilla. Los materiales triturados se muelen usualmente en una artesa seca, para reducir los terrones al tamaño adecuado para el cribado. Esta máquina es un tipo de molino chileno, pero tiene el fondo perforado por el cual se extrae continuamente el material triturado. Para la molienda muy fina, se usan molinos de bola y molinos de cilindros y anillos.

La cuarcita, en general, necesita dos etapas de reducción de tamaño en trituradoras de mandíbulas o giratorias. La roca triturada se muele luego en una artesa seca o húmeda, según el proceso subsiguiente: la artesa húmeda, similar a la seca, salvo que su fondo es maciso, se usa generalmente para el ladrillo moldeado a mano o por la máquina de descarga. La artesa seca se usa para preparar la parte más gruesa del material para el ladrillo prensado en seco con fuerza motriz; se usan molinos de bolas para preparar el material más fino.

Como la magnesita calcinada está en forma granular, no requiere trituración y por ello, se muele en una artesa seca suplementada con trituradoras de cilindros y anillos para obtener la fracción fina. La cro-

mita, generalmente en forma de terrones, requiere reducción preliminar de tamaño en trituradoras de mandíbulas, de cilindros o giratorias, y luego se maneja como la magnesita. La cromita, generalmente en forma de terrones, requiere reducción preliminar de tamaño en trituradoras de mandíbulas, de cilindros o giratorias, y luego se maneja como la magnesita.

Cribado. - Se usan varios tipos de cribas para las arcillas refractarias y los más importantes son los tipos vibratorios. En general, sólo se separa el material de tamaño excesivo y todas las gradaciones de tamaños que van pasando continuamente por la criba se emplean para hacer ladrillo. Este mismo tipo de criba se usa también para la arenisca cuando se quiere hacer ladrillo de sílice por prensado en seco, donde se necesitan análisis especiales del tamaño de material cribado. Si el ladrillo de sílice ha de ser moldeado a mano o por máquina de descarga, el material molido deberá pasar por las cribas vibratorias, pero en general se obtiene el tamaño de criba deseado por molienda en artesa húmeda.

Las operaciones de cribado en la manufactura de ladrillo básico son más complicadas y exigen control muy riguroso para obtener el análisis de tamaño de grano deseado para obtener ladrillo con máximas densidad y resistencia. Se usan dos métodos. Uno puede llamarse semicontinuo y el otro de clasificación de grano por máximo y mínimo de intervalo. En la clasificación semicontinua se combinan dos lotes de material en proporciones que den el análisis de tamaño deseado. El primer lote es un material clasificado de modo continuo, en el cual el tamaño mayor es del grosor adecuado. El otro lote se muele finamente para que contenga una proporción alta del tamaño mínimo deseado. Un inconveniente de la clasificación semicontinua es la presencia de excesivo porcentaje de material de tamaño intermedio. Este inconveniente se vence en la práctica más moderna de clasificación de grano por extremos de intervalo (máximo y mínimo de intervalo); en este proceso se preparan bandas seleccionadas por tamaño de partícula y se recombinan en proporciones definidas. Se necesita una serie de tres cribas por lo menos del tipo vibratorio, que dan una banda gruesa, una banda intermedia y una banda fina, respectivamente. Las mezclas compensadas, según requisitos específicos, se preparan tomando 55-70 partes en peso de partículas gruesas y 45-30 partes de partículas finas. Las partículas intermedias se desechan o se usan en pequeña cantidad, sin pasar de 10 partes por ciento.

Mezcla y amasado. - Esta operación tiene por fin hacer una mezcla homogénea de los ingredientes del lote, distribuir el agua de modo que las partículas no plásticas se recubran del material más plástico, desarrollar la plasticidad y reducir la cantidad de aire atrapado. En la manufactura de ladrillo de arcilla refractaria se necesitan tres tipos de mezcla, uno para cada proceso de moldeo: manual, de barro duro y pren-

sado en seco (con energía). Los lotes para el ladrillo manual contienen de 10-20% de agua; los de ladrillo de barro duro, de 10-15% de agua, y los lotes para ladrillo prensado en seco, de 5% de agua. La mezcla de ladrillo manual se prepara en una artesa húmeda. La de ladrillo de barro duro se trabaja en una malaxadora, - una artesa semicircular en la cual un eje de revolución, de paletas inclinadas, agita y mezcla la arcilla y el agua. Conectada integralmente con su extremo de la artesa, hay una máquina helicoidal para el moldeo o final del ladrillo por extrusión. La mezcla para ladrillo prensado en seco se prepara en una máquina amasadora similar a la artesa húmeda. Una variante reciente en el progreso de amasado, es tomar el material de la artesa húmeda o de la malaxadora y extrusarlo por las perforaciones de un fondo de artesa seca. Esta práctica - aumenta la densidad y la resistencia del ladrillo formado. En la manufactura de ladrillo de sílice, el lote con siste en cuarcita triturada o molida, guijarros de sílice y cal apagada equivalente a 2% de CaO. Un pequeño porcentaje de líquido residual de sulfato, bien como líquido concentrado o como residuo seco, se incluye para producir una aglutinación seca. Cualquiera que sea el proceso de moldeo, el lote se mezcla y amasa siempre en una artesa húmeda.

El ladrillo básico se suministra calcinado o sin calcinar (aglutinado químicamente). En el segundo caso, se omite el tratamiento final de cocción. Se logra la aglutinación química durante las operaciones de ama sado y secado, por adición de un producto apropiado. En conclusión, los fabricantes no revelan sus aglutinantes químicos. La aplicación de aglutinación química está limitada a materiales refractarios estabilizados previ amente por el calor antes de incorporarlos.

Para el ladrillo básico, ya sea calcinado o aglutinado químicamente, la operación de mezcla y amasado se hace en una mezcladora, a veces revestida de caucho, que es una modificación de la artesa húmeda. En la artesa se vierte la mezcla de tamaños de grano dosificados de uno o más materiales básicos, y si el la drillo es del tipo no calcinado, se agrega en este punto el aglutinante químico. Como no puede tolerarse reducción del tamaño de grano, las ruedas del molino de la artesa se suprimen o son muy ligeras. En el caso - de omitirse, se usan arados fijos o estrellas giratorias (un sistema de arados ramificados pequeños) para agitar - el lote. El contenido total de humedad, rara vez pasa de 5%, lo cual da al lote amasado la consistencia de arena húmeda. El ciclo de mezcla rara vez pasa de 10 min.

Moldeo.- Los refractarios de arcilla moldeados a mano se limitan en general, a formas grandes o - complicadas o a formas especiales que no justifican el gasto de hacer una matriz especial. El moldeo manual se hace en moldes de madera o revestidos de acero con forros sueltos para poder quitarlos fácilmente. Una -

vez extraídos, algunos ladrillos se secan parcialmente y se presan en una prensa manual.

Aproximadamente el 20% de los refractarios de arcilla se moldean por el proceso del barro duro. En este método, se extruye una columna de arcilla de la máquina helicoidal por una matriz y simultáneamente se desairea, aplicando vacío, para reducir al mínimo la laminación y aumentar la densidad y uniformidad de la mezcla. De la matriz sale una columna continua, de la cual se cortan las piezas por una cortadora de alambre. Se ajustan las piezas a sus dimensiones, se presan y se marcan por una máquina de repsado. Las presiones de moldeo pueden ser hasta de 28Kg/cm^2 . El ladrillo es duro, tenaz y denso. El ladrillo prensado en seco se moldea en prensa mecánica de rótula, que ejerce presiones de 70-1 050Kg/cm². Este es el método de moldeo que más se usa hoy en la industria. La mezcla húmeda se divide automáticamente en porciones y alimenta una matriz incluida en la prensa. Cada ciclo de prensado moldea de uno a cuatro ladrillos, según su tamaño y su forma. Para satisfacer las demandas de ladrillos y de formas para ciertas condiciones de servicio, se usan a veces otros dos procesos especiales de moldeo. El vaciado por colada, uno de estos métodos, se emplea para moldear refractarios de arcilla y de silimanita, cuando las formas necesarias son excepcionalmente complicadas o tienen secciones extremadamente finas. Los ingredientes finamente molidos en este caso, se preparan en forma de barbotina o papilla por adición de agua y pequeñas cantidades de electrolitos, que aumentan la fluidez de la papilla. Esta se vierte en un molde de yeso, que se saca después de iniciado el endurecimiento de la forma y queda ésta vaciada y lista para el secado final y la calcinación.

El otro proceso especial, apisonado neumático, es una variante del moldeo manual y se emplea para formas muy grandes o complicadas. Este método requiere moldes pesados reforzados con acero. En los moldes se introduce la mezcla húmeda en pequeñas porciones y continuamente se requiere que se apisonen con martillos neumáticos.

El moldeo manual del ladrillo de sílice es esencialmente igual al del ladrillo de arcilla, salvo que la mezcla se apisona en moldes de acero, con manos pesadas en vez de arrojarse simplemente en el molde. En la máquina de moldeo por descarga, la mezcla amasada se transporta desde la artesa de molienda húmeda y se eleva a una tolva de descarga de la máquina de moldeo. La tolva tiene un portillo que funciona cronometrado automáticamente y del cual se descarga la masa a un molde múltiple a unos 6 metros por debajo. En el proceso de prensado en seco, el ladrillo de sílice se moldea por prensa mecánica, igual que el ladrillo de arcilla.

La mayoría de las formas corrientes de ladrillo básico se moldean en prensas en seco. capaces de -

ejercer presiones del orden de $700-1\ 050\text{Kg/cm}^2$.

La prensa usual de rótula, o prensa operada mecánicamente, se usa todavía, pero muchas de las - prensas modernas son hidráulicas. La capacidad máxima de prensado de la primera, es probablemente de 500 toneladas, pero las últimas llegan a 800 toneladas.

Un tonelaje apreciable de ladrillo sin calcinar se vende ahora encerrado en planchas de acero de ca libre 20. Este proceso se hace durante la operación de prensado en seco, y en este caso, las planchas son parte integrante del producto acabado, o primero se prensa en seco el ladrillo y luego se colocan las planchas preformadas en una operación aparte. Unas cuantas de las formas difíciles de ladrillo básico son hechas a mano, usando moldes de acero y apisonado neumático.

Secado .- Se usan dos métodos de secado para el ladrillo de arcilla refractaria. El del piso caliente a temperatura regulada, calentado por conducto de vapor o de aire caliente incluidos en él, se adapta mejor al ladrillo moldeado a mano y a las formas grandes. Los secadores de túnel, calentados por el calor residual de los hornos o por serpentines de vapor, se usan comúnmente para productos de barro duro y para algunos ladrillos prensados en seco. Estos últimos, a causa del bajo contenido de humedad de la mezcla se endurecen directamente en el horno, sin necesidad de tratamiento de secado. Para el ladrillo de sílice se usan también pisos calientes o secadores de túnel.

Todos los ladrillos básicos se secan en secadores de túnel, pero éstos funcionan en condiciones algo diferentes, según que el ladrillo vaya a ser calcinado o sólo aglutinado químicamente. Los primeros se secan con calor residual de los hornos de túnel en que se cuecen finalmente los ladrillos. Los ladrillos aglutinados químicamente se secan en secadores de de túnel especiales, que en general funcionan con una sección previa o zona de curado y una sección posterior, donde se elimina toda la humedad residual.

Cocción.- Este es el tratamiento térmico final en hornos, el cual se somete el ladrillo para conseguir aglutinación y otras propiedades físicas y químicas necesarias. Las temperaturas máximas empleadas para el ladrillo de arcilla varían desde unos $1\ 100^{\circ}\text{C}$ a $1\ 650^{\circ}\text{C}$, según el tipo de producto manufacturado. Los hornos empleados son de tipo periódico o continuo. Los hornos periódicos son de sección transversal circular o rectangular y operan según el principio de tiro descendente. Sus dimensiones varían, pero usualmente están diseñados para calcinar de 30 000 a 150 000 ladrillos de 9".

El tiempo necesario para el ciclo de cocción completo, depende del tamaño del horno; los hornos de capacidad para 30 000 ladrillos, normalmente tienen un período de turno de 18 a 21 días. La cocción lleva

siete días, el enfriamiento de 5 a 6 días y la descarga, mantenimiento del horno y nueva carga requieren unos ocho días.

El horno continuo o de túnel es una estructura de sección transversal estrecha, comparada con la longitud. La longitud varía de 220 a 500 pies (67-152 m). Los ladrillos colocados en carros, pasan lentamente por tres secciones, llamadas zonas de precalentamiento, cocción y enfriamiento.

Este tipo de horno es el más satisfactorio cuando se usa en producción continua, para cocer grandes cantidades de refractarios de tamaño normalizado. Por su eficacia y economía, su uso se está extendiendo rápidamente.

El ladrillo de sílice se cuece generalmente en hornos circulares de tiro descendentes; los más grandes admiten hasta 150 000 ladrillos de 9". Al colocar el ladrillo, antes de encender el fuego, hay que dejar sitio para una dilatación del 13% en volumen, que resulta de la conversión del cuarzo en formas de sílice menos densas, estables a temperatura alta. Diversos hornos de túnel se usan con buen resultado para cocer ladrillo de sílice, en particular en las plantas más modernas. Su adopción nunca ha sido tan general, sin embargo, como en las plantas de ladrillo de arcilla. Los hornos de túnel para cocer ladrillo de sílice varían en longitud desde 500 a 600 pies (152-182 m). El ciclo de calcinación completo para un horno periódico típico es de 21 a 27 días; para un horno de túnel es sólo de 6 a 7 días. Para calcinar un ladrillo básico, sólo se usan hornos de túnel, que varían de 300 a 400 pies (91-122 m) de longitud. La sección transversal varía según la anchura y la altura de la carga de ladrillo, colocados en los carros del horno. Generalmente los bloques de carga son pequeños y rara vez pasan de 41 pulg (104 cm) en altura total, o de ocho a nueve hileras de ladrillos superpuestos, con el ladrillo colocado de canto. Según la mezcla usada para moldear el ladrillo, la temperatura de la zona de cocción puede ser hasta de 1 650-1 750°C; el ciclo de operación total varía de 3 a 5 días.

Los refractarios son materiales que resisten altas temperaturas. Su función esencial es servir como materiales estructurales y así, su utilidad depende de su facultad de conservar sus funciones mecánicas a temperatura alta. No hay una línea divisoria bien definida de temperatura, que separe las sustancias refractarias de las no refractarias, aunque en las clasificaciones de la A.S.T.M. de los diversos tipos de arcilla refractaria, la temperatura más baja a la cual uno de dichos tipos ha de satisfacer los requisitos relacionados con su estabilidad térmica es de 1 515°C (2 760°F).

Tipos químicos. - Aunque las principales variedades de los refractarios comunes se clasifican industrialmente como refractarios de arcilla, sílice, básicos y ricos en alúmina, a veces se usa su comportamiento con

otros productos a elevadas temperaturas, para hacer una separación en tres tipos químicos esenciales: ácido, básico y neutro. Sin embargo, más frecuentemente las propiedades físicas determinan la aplicación industrial específica. Los refractarios ácidos en uso general se caracterizan por un alto contenido de sílice. Los básicos contienen principalmente magnesia, cal y otros óxidos alcalinotérreos. Los refractarios neutros comprenden un grupo de materiales que no son ni fuertemente ácidos, ni fuertemente básicos.

En muchos casos, no es posible una distribución clara entre los tipos, pues el refractario y el producto que reacciona rara vez, son sistemas simples de dos componentes ácido-base.

Algunos ejemplos, aceptados en general, de este sistema de clasificación, son los siguientes:

Ácidos: sílice, arcilla refractaria, circonón y circoná.

Básicos: magnesita, dolomita (a veces se considera la cromita, como refractario básico).

Neutros: productos ricos en alúmina, cromo, carbono y carburo de silicio.

Los refractarios que se producen en mayor volumen son los fabricados con arcilla refractaria, cuyo componente principal es el silicato mineral caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Los refractarios de sílice siguen en orden de producción y están constituidos generalmente por cuarcita de grano fino y guijarros de cuarzo, sílice casi pura.

El grupo importante de refractarios básicos está constituido principalmente por magnesita calcinada totalmente, mineral de cromo (cromita) o mezclas de estos productos. La magnesita calcinada consta de periclasa o magnesia cristalina (MgO); el mineral de cromo es una solución sólida de varias espinelas, de las cuales la más importante es FeCr_2O_4 , ó $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ y MgAl_2O_4 ó $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. La dolomita, carbonato cálcico magnésico natural, es un material importante en el grupo básico y se usa bruta, ligeramente calcinada o completamente calcinada. El olivino, silicato de magnesio-hierro ($\text{Mg} \cdot \text{Fe})_2\text{SiO}_4$, se usa como refractario básico, mezclado con magnesita completamente calcinada.

Los refractarios ricos en alúmina (50% de Al_2O_3 , o más), se fabrican con numerosos materiales; unos son minerales naturales; otros se obtienen por extracción química o por síntesis en el horno eléctrico. Los minerales usados son: arcilla diaspóricas y bauxita, que son principalmente hidratos de alúmina; silicatos de aluminio del grupo de la silimanita, con la fórmula general Al_2SiO_5 ó $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, de los cuales la crisanita es el más importante; mulita, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, obtenida por calcinación de cualquiera de los minerales del grupo de la silimanita o por síntesis en el horno eléctrico de arco, y circonón (Al_2O_3) obtenido de la bauxita por extracción química seguida de calcinación a alta temperatura, o directamente por fusión en horno eléctrico;

esto es: alúmina fundida.

El zircón (silicato de zirconio, $ZrSiO_4$ ó $ZrO_2 \cdot SiO_2$) y , con extensión más limitada. La zircona - (óxido de circonio, ZrO_2) ocupan un lugar en la industria. El óxido de berilio (BeO), y el de torio (ThO_2) - son muy refractarios, pero demasiado caros. Se usan en trabajos de laboratorio o similares en pequeña escala.

Los carburos de volframio, tantalio, titanio y boro, figuran entre los productos más refractarios conocidos. Sin embargo, por el alto costo de su producción, hasta la fecha se han explotado más por su dureza - para herramientas de corte y abrasivos.

Los nitruros de titanio, circonio, torio, berilio, tantalio y vanadio son también productos muy refractarios, pero costosos. Tienen alguna aplicación potencial en la producción de energía nuclear, hasta ahora se les han encontrado pocos usos.

CAPITULO 3

FORMAS FISICAS DE LOS REFRACTARIOS

FORMAS FISICAS

Los refractarios se libran al comercio en diversas formas físicas: ladrillo, materiales de cementación finamente molidos; plásticos, vaciables y granulares sueltos.

Formas estandar y especiales del ladrillo refractario. - Si el aparejo de ladrillos presentara siempre la forma de una pared uniforme, el único refractario que se necesitaría sería el ladrillo rectangular. Sin embargo, los refractarios deben colocarse muchas veces en forma de revestimientos cilíndricos, arcos curvados y otras construcciones complicadas. Sería posible, por supuesto, cortar los ladrillos rectos en forma de cuña, arco, etc., pero ello resultaría muy caro y, además, se lastimaría la superficie lisa del ladrillo. Por lo tanto, para una construcción eficaz es deseable suministrar ladrillos previamente modelados.

Una forma estandar es la de aquel ladrillo que tiene unas dimensiones ajustadas a las de todos los refractarios.

El tamaño básico del ladrillo rectangular ha sido de 9.4 1/2, 2 1/2 pulgadas, pero ha sido gradualmente desplazado por el de 9.4 1/2, 3 pulgadas del mismo tipo. La serie de formas estandar de 9 pulgadas se muestra en la Fig. 11. Hay otras series de otros tamaños base que pueden encontrarse en el mercado que pueden ser:

9.4 1/2, 3 pulgadas	12.6 3/4, 2 1/2 pulgadas
9.6, 2 1/2 "	12.6 3/4, 3 "
9.6, 3 "	
13 1/2, 4 1/2, 2 1/2 pulgadas	
13 1/2, 4 1/2, 3 "	

El ladrillo curvo (Fig. 12) puede englobarse en las series de 9.4 1/2, 2 1/2 pulgadas y en la de 9.4 1/2, 3 pulgadas, con un diámetro del círculo exterior de 33 a 129 pulgadas (0.80-3.00 m).

Los ladrillos para cúpulas (Fig. 12) presentan dimensiones de 9.6, 4 pulgadas o bien de 9.9, 4 pulgadas, con diámetro del círculo exterior de 42 a 150 pulgadas (1.00-3.70 m), y de 66 a 180 pulgadas (1.67-3.66 m), respectivamente.

Los ladrillos para hornos rotatorios (Fig. 12), de tipo arqueado, poseen dimensiones de 9.6, 3 1/2 pulgadas y tienen un diámetro del círculo exterior, oscilando de 42 a 168 pulgadas (1.00-3.30 m). Los tipos cuneiformes tienen 9.6, 3 1/2 pulgadas, con diámetros del círculo exterior entre 54 y 162 pulgadas (1.4-4.0 m).

Las formas oblicuas están estandarizadas en las dimensiones 9.4 1/2, 2 1/2 pulgadas y 9.4 1/2, 3 pulgadas, con ángulos de 48° y 60°.

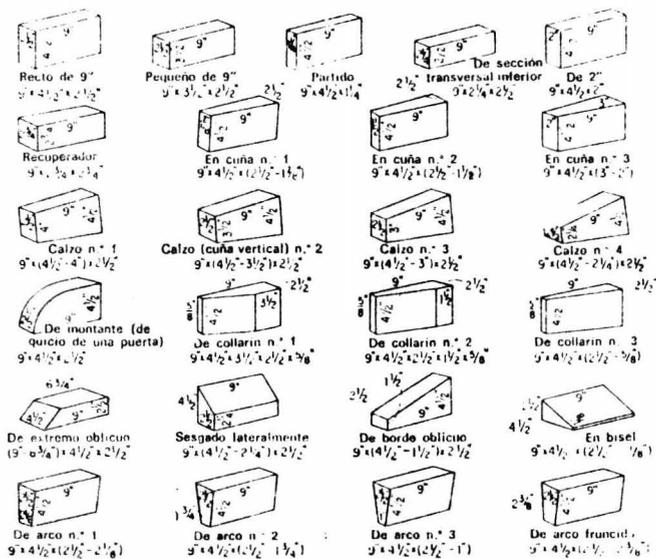


FIG. 11. Formas o modelos estándar (para la serie de 9 pulgadas).

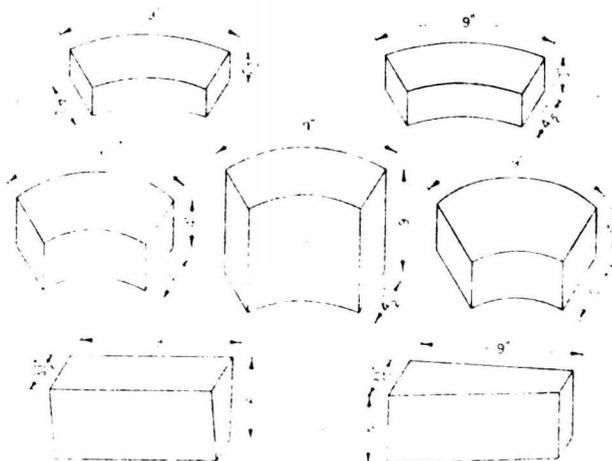


FIG. 12. Ladrillos circulares, bloques para cúpulas y bloques para hornos rotatorios.

Todos los fabricantes publican manuales que ilustran con detalle las diversas formas que tienen en almacén, con lo cual los compradores deben consultarlos para una información más especializada.

Las tolerancias en tamaño y forma se dan en las normas ASTM y son del orden de $\pm 2\%$ sobre las dimensiones superiores de 4 pulgadas y de un $\pm 3\%$ en los casos de dimensiones inferiores. La norma ASTM número C134-41 se utiliza para medir las dimensiones, y la norma C154-41 para medir la curvatura.

Morteros. - Los morteros refractarios se utilizan para unir los diversos ladrillos y piezas especiales refractarias y cumplen las siguientes finalidades: enlazar el paramento de ladrillos, para convertirlo en una unidad sólida, con lo cual será más resistente a los choques y tensiones mecánicas, producir una mayor trabazón entre las superficies ligeramente irregulares de los ladrillos, de tal modo que cada una de las hiladas de ladrillos tenga un apoyo firme en la hilada inferior, y también hacer herméticas las paredes frente a los gases o bien impedir la penetración de escoria en las uniones. Los mejores morteros son combinaciones de arcilla plástica y de chamota de volumen constante, ya que el uso de arcilla refractaria en crudo como mortero, se reduce sólo a aplicaciones que requieren baja temperatura.

Los morteros se diluyen en varias partes de agua y se utilizan como revestimientos de las caras de las paredes de los refractarios, a fin de rejuntar mejor las uniones o también para proteger a las paredes de los elementos destructivos del horno.

Morteros que fraguan con el calor. - Los morteros de este grupo se componen generalmente de chamota y una arcilla aglomerante. No se añaden ingredientes susceptibles de fraguar el aire, como silicato sódico, adquiriendo el mortero su consistencia al vitrificar el aglomerante. Para un servicio a baja temperatura y — también cuando se necesita un mortero muy fuerte, debe utilizarse una arcilla rica en fundentes, mientras que para un mortero que debe funcionar a alta temperatura es aconsejable una arcilla refractaria o bien caolín. La fracción no plástica debe pulverizarse hasta que pase por el tamiz de 35 mallas, mezclándose luego con el aglomerante. Para reducir la contracción, el componente no plástico debe suponer el 60% de la totalidad del mortero como mínimo. Sin embargo, es preciso utilizar suficiente arcilla cruda como para dar las propiedades de plasticidad y trabajabilidad convenientes, y por consiguiente, en estos casos deben seleccionarse cuidadosamente las arcillas. La distribución de los tamaños del grano de la chamota no plástica afecta también las propiedades de manipulación del mortero.

Morteros que fraguan al aire. - Los morteros que fraguan al aire se componen de arcilla refractaria -

precalcinada o bien arcilla magra en crudo, pulverizada hasta el tamaño del tamiz de 35 mallas. A ello se añade arcilla refractaria plástica y una solución que contiene del 5 al 20% de silicato sódico.

La elección de una arcilla plástica como aglomerante y la relación óxido sódico-silicato en la solución de silicato sódico son los factores determinantes de las propiedades del mortero. Para obtener un mortero que sirva para temperaturas elevadas, deben elegirse una arcilla altamente refractaria y una solución de silicato sódico que tenga una proporción baja de óxido sódico con respecto a la sílice. Para condiciones de temperaturas más moderadas, combinando una arcilla de inferior plasticidad, pero de menor poder refractario con una solución de silicato sódico, más rica en óxido sódico, dará un mortero más manejable y de inferior punto de vitrificación, aunque naturalmente, presentará un límite inferior de temperatura de utilización. La base de chabota debe ser dosificada en cuanto a tamaño, para que presente en el mortero acabado el mínimo de contracción de secado y de cocción, procurando que ello sea compatible con una buena facilidad de manipulación.

El contenido en agua de un mortero al aire se ajusta hasta que tenga la consistencia de una gelatina espesa. En el secado al aire, estos morteros desarrollan una buena resistencia y forman una estructura casi monolítica con el paramento, ocurriendo en algunos casos que la junta del mortero es más resistente que los ladrillos trabados.

Para asegurar un buen control del agua de fraguado añadida se utiliza un proceso de mezclado en lechada. Después del mezclado, el mortero se envasa en barriles de acero, que se precintan con tapones de acero y juntas de caucho.

Morteros especiales.- Para aplicaciones especiales, se elaboran los morteros de fraguado al calor y al aire, conjuntamente utilizando otros materiales básicos diferentes de la arcilla refractaria. Los más comunes son: magnesita, cromo, sílice, alúmina y carburo de aluminio, y se usan en la colocación de los ladrillos fabricados con el material respectivo.

Aplicaciones.- El mortero se coloca de alguno de los tres modos corrientes, pero debe destacarse que en la mayoría de los casos, es interesante utilizar una junta lo más estrecha posible. El primer método es el llamado de "cubrición de junta" en el cual, de un mortero bastante plástico, se expande con la paleta una delgada capa sobre la última hilada. También con la paleta se extiende una ligera capa en la parte inferior y en uno de los extremos del ladrillo que hay que colocar, fijándolo seguidamente en su sitio con unos golpes.

El segundo método es el que podríamos denominar de "remojo". Se pone en obra más diluido que en

el caso anterior. El ladrillo a colocar se "remoja" o se mete dentro de la pasta por su parte inferior y por uno de sus extremos, y luego se coloca en su sitio. Puede regularse el espesor de la junta por la consistencia de la pasta. Un método combinado, utilizado a veces, consiste en verter la pasta encima de la última hilada y en "remojarse" el ladrillo con la misma. Ello conduce a unas juntas más gruesas que con el segundo método.

Ensayos de morteros refractarios. - Muchos métodos se han propuesto para ensayar morteros, pero toda vía es difícil obtener una medida cuantitativa de la propiedad, tan subjetiva, de lo que denominamos trabajabilidad.

El punto de fusión puede determinarse mediante los métodos de determinación del punto de fusión por comparación con los conos pirométricos o con un pirómetro óptico. Sin embargo, el punto de fusión no tiene mucha validez; y los ensayos sobre los bloques que se utilizan para los vidriados y esmaltes o bien la fluidez del mortero cuando se utiliza como cemento, son más importantes.

La dureza de la junta se determina generalmente cementando dos medios ladrillos sobre las caras de dimensiones de 2 1/2 x 4 1/2 pulgadas, con una junta de espesor determinado. Después del secado, se rompen tal como se indica en la Fig. 13, o bien, pueden calentarse a varias temperaturas y probar su rotura mientras se calientan o enfrían según la temperatura ambiente. Debe tenerse cuidado mientras se calientan, para evitar cualquier tipo de tensión en las muestras debidas al movimiento de las piezas mientras se secan; de otro modo resultarían valores muy bajos, debido a las finas grietas que aparecen.

La contracción puede medirse bien sobre barras de mortero por técnicas dilatométricas, o bien a través de las características de una capa secada y cocida sobre un ladrillo.

Cementos. - Los cementos refractarios se componen de un agregado grueso de ladrillo pulverizado o de chamota aglomerado con polvo fino de chamota, utilizándose para tres finalidades. La primera es para fabricar moldeados refractarios que se colocarán en verde en los hornos; la segunda finalidad es la de formar paredes monolíticas uniformes, y la tercera reparar y parchear el parámetro desgastado.

Los cementos refractarios se utilizan actualmente un poco más que en el pasado. Se han construido, por ejemplo, soleras muy grandes a base de cemento refractario monolítico y han dado muy buenos resultados. Debe señalarse que los cementos refractarios endurecen por cocción sólo en la superficie caliente, y poseen una capa más débil y más flexible en el lado más frío. Aunque es posible que ello sea a veces una desventaja, en otros casos tal vez ofrezca mayor duración que el refractario calcinado, debido a la flexibilidad de la pared. Sin embargo, solamente pueden obtenerse buenos resultados con cementos en estructuras monolíticas grandes,

si se utilizan con habilidad.

Cementos de arcilla refractaria.- Algunos de los cementos fraguan en frío, es decir, cuando se secan se vuelven más fuertes. Como en el caso de los morteros que fraguan en frío, esta resistencia se consigue añadiendo silicato sódico a la masa. La mayoría de plásticos se elabora a base de chamota de ladrillo, bien especialmente preparada o fabricada a partir de pedazos de ladrillo de desperdicio y de trozos de caceras. El tamaño máximo del grano para estos materiales debe ser del orden de 4 a 2 mallas, para reducir la contracción durante el secado y cocción. La arcilla utilizada para aglomerar debe seleccionarse cuidadosamente, para dar una gran manejabilidad y baja contracción.

Es particularmente importante, que los cementos experimenten una pequeña contracción al secado y a la cocción, ya que de otro modo la estructura se resquebajaría muchísimo después de la primera cocción. Por esta razón, la proporción de chamota es comparativamente grande, oscilando entre el 40 y el 60% del total. No solamente el tamaño máximo del grano es decisivo para lograr buenos resultados, sino que también es muy importante a este respecto, la uniformidad de la chamota. La pasta debe de ser de una consistencia tal, que mantenga su forma al aplicarla al pavimento. No debe desmenuzarse cuando se amasa y no debe ablandarse ni humedecerse cuando se la compacta mecánicamente. Una pasta de buena plasticidad debe poder aplicarse en una cúpula sin escurrirse ni desprenderse.

Mezclas de colada.- Hay muchos cementos que se denominan de "colada" o "comprimidos" y se utilizan para el revestimiento de las calderas de colada en la industria del hierro y el acero, y para las conducciones y zonas por las que circula el metal fundido. Estos refractarios deben poseer propiedades especiales, como son: muy buena manejabilidad y un punto de reblandecimiento cercano a la temperatura de vertido del metal, para que la superficie del refractario quede como barzinado y ofrezca buena resistencia al ataque del metal y la escoria. Mientras muchas de estas mezclas están fabricadas a base de chamota de arcilla refractaria, otras tienen una base de caolín y en algunos casos, se han utilizado arcillas de alto contenido de alúmina.

Cementos especiales.- Además de los cementos a base de arcilla refractaria, se utilizan grandes cantidades de cementos a base de cromo, especialmente en los casos en que es muy fuerte la erosión producida por la escoria al fluir. El campo de aplicación para esta clase de cementos está en las paredes de soporte de los hornos de burbujeo, donde puede ser comprimido alrededor de los tubos de la camisa de agua, para formar un refractario capaz de soportar los castigos enormes de las altas temperaturas y de las escorias.

Este tipo de cemento se elabora a partir de mineral de cromo, bien crudo o bien calcinado, con un

aglomerante de arcilla y muy a menudo con silicato sódico.

Las mezclas comprimidas a base de sílice se fabrican a partir de ganister pulverizado, con arcilla y arena como cementador. Estas mezclas deben hacerse uniformes para conseguir una gran facilidad en su manejo y se usan ampliamente en la reparación de cúpulas. Las aplicaciones de carburo de silicio se utilizan cuando se requiere una alta transferencia de calor o una buena resistencia a la escoria. A pesar de que comparativamente resultan caros, dan un resultado excelente en condiciones severas de funcionamiento. Las aplicaciones a base de magnesita consisten normalmente en granos de magnesita calcinada a muerte, mezclada con algún tipo de aglomerante orgánico, tales como alquitrán o dextrina. Se utilizan para hornos eléctricos básicos, hornos básicos de hogar abierto, etc.

Aplicación de los cementos. - No puede esperarse un servicio satisfactorio por parte de los cementos, si no se han aplicado convenientemente. Deben seguirse al pie de la letra las indicaciones que dan los fabricantes, para asegurarse un funcionamiento perfecto. A pesar de que los métodos varían ligeramente según el tipo de cemento, en general deben tomarse las siguientes precauciones al aplicar este material.

Al colocar un cemento en el suelo de un horno, como por ejemplo, uno a base de mineral de cromo en un horno de fundición, es costumbre seguir el siguiente procedimiento: sacar el material de sus envases y verterlo en una zona limpia del horno cerca del hogar, alisando las protuberancias con una pala, pero sin adicionar agua. Si el material debe dejarse durante un cierto tiempo, debe cubrirse con sacos de arpillera mojados, para evitar que se seque la parte superficial. Empezando por uno de los extremos del horno, se extienden los terrones de material hasta que formen una capa de un espesor aproximadamente de un 50% superior al de la capa definitiva; así, por ejemplo, si se va a colocar un suelo de 3 pulgadas (7.6 cm), el espesor de los maderos de material deberá ser de 4 a 5 pulgadas (10-13 cm).

Es mejor trabajar con un listón de 30 pulg (76 cm), empezando en un extremo del horno. Entonces, con una pala pesada se van partiendo los terrones con golpes profundos, de tal modo que la capa superior del material (que posiblemente estará un poco seca), quede completamente compactada. Entonces, con un pesado pistón se consolida toda la masa con fuertes golpes. El espesor de la capa debe medirse con una varilla. Si es demasiado delgado, toda la masa deberá ser cuarteada otra vez con la pala, antes de añadir más material; en caso contrario, no se consolidaría. La superficie final puede conseguirse disponiendo un entablado en la parte superior y golpeando con el pistón sobre el mismo. Entonces puede empezarse con el siguiente listón de 30 pulgadas (76 cm), teniendo cuidado de asegurarse que está bien apoyado en el listón anterior, para que no se produzcan

discontinuidades. De este modo, pueden colocarse más entablillados y el proceso se repite hasta que todo el suelo está hecho. La superficie final no debe pisarse hasta haber colocado el entablillado.

Es una buena práctica en todas las construcciones en las que se usa cemento, el taladrar la capa con agujeros de 2 pulgadas (5 cm) de profundidad, para que hagan de respiradero, de modo que pueda salir el vapor que se produzca mientras se seca. Puede realizarse muy bien, haciendo un marco rectangular, en el cual se han colocado alcayatas a 3 pulgadas (7.6 cm) del centro. De este modo, el marco puede presionarse fuertemente sobre la superficie del cemento y conseguir los resultados apetecidos.

En algunos casos, se obtienen buenos resultados apisonando el hogar cuando está caliente, con una placa pesada, situada al final de un mango, que puede introducirse por la puerta del horno. Si esta operación se realiza cada final de semana, el hogar se consolida rápidamente y se obtiene una excelente estructura.

Cuando se utilizan cementos en las paredes laterales, son necesarios encofrados de madera para que el cemento pueda ser presionado convenientemente y convertido en una estructura monolítica. A veces los cementos se han utilizado para los techos de los hornos pequeños, utilizando evidentemente un encofrado que presione hacia arriba. Sin embargo, en estos casos lo más corriente es utilizar hormigón refractario.

Los cementos se utilizan también en la reparación de las paredes, y en estas condiciones, debe ponerse un sumo cuidado para obtener un trabajo satisfactorio. La pared debe limpiarse cuidadosamente de cualquier escoria adherida, dejando un paramento rugoso y a veces rebajando la superficie, para que aguante el parche. Esto normalmente se consigue martilleando con un mazo de madera, debiendo tomarse precauciones para extender la capa uniformemente y sin laminaciones.

Envasado de los cementos.- Los cementos normalmente se expenden húmedos en latas perfectamente precintadas, a pesar de que a veces los fabricantes envuelven cubos de la mezcla con papel impermeable y lo expenden en cajas de cartón. En ocasiones, los fabricantes tienen problemas con los cementos que fraguan al aire, pues se endurecen mientras almacenados, lo mismo que les sucede a los morteros que fraguan el aire.

Hormigones.- Los hormigones refractarios contienen un agregado y un material de unión, como por ejemplo, cemento hidráulico, que permite el fraguado en frío. El agregado puede ser arcilla calcinada, que proporcionará al hormigón una alta densidad, o bien chamota porosa, tierra de diatomeas, vermiculita o cualquier otro material poroso, que proporcionará al hormigón resultante un peso ligero y una baja conductividad calorífica.

Hormigones refractarios densos.- Los primeros hormigones refractarios se construyeron a base de trozos

de ladrillo machacado o bien arcilla magra como carga del hormigón y de un 15 a un 25% de cemento comercial de alto contenido de alúmina como aglomerante. Este material era suficientemente adecuado para rendimientos bajos, medios y altos, pero fracasaba a temperaturas muy elevadas a causa de las impurezas tanto de la carga, como del aglomerante. En 1946, Pole y Moore describieron un aluminato cálcico ($3\text{CaO} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3$). Este cemento puro permitió la formación de hormigones con excelentes propiedades a altas temperaturas, pero Gitzen, Hart y MacZura creen que es preferible un cemento de composición $\text{CaO} \cdot 2,5\text{Al}_2\text{O}_3$. Estos cementos puros resisten mejor el ataque del CO que los cementos comerciales.

El cemento comercial con alto contenido en alúmina tiene una composición típica, mostrada en la Tabla 1, mientras que se presentan junto a él dos cementos de alta pureza. Los componentes del cemento "d", tal como se han determinado por difracción con Rayos X, se establecen en la Tabla 2.

Cuando estos cementos de alto contenido en alúmina se hidratan, se llega a los productos de la Tabla 3.

El hormigón se forma utilizando un agregado de arcilla o caolín calcinados a alta temperatura, de alúmina sinferizada y en ocasiones de cianita. El agregado se dosifica cuidadosamente en cuanto a su tamaño, para dar un sistema de empaquetamiento denso con un tamaño máximo de partícula de 4 mallas. Al agregado se adiciona cemento finamente molido en cantidad de 15 a 20%. Naturalmente, cuanto mayor sea el contenido en cemento, menor será el punto de fusión. Utilizando cemento del tipo a, de la Tabla 1, y un agregado de arcilla magra calcinada, la relación entre la cantidad de cemento y el punto de fusión se muestra en la Tabla 2. Naturalmente, estos hormigones deben almacenarse en recipientes herméticos al aire, para evitar la hidratación, y debe tenerse especial cuidado para evitar la segregación antes de su uso. La razón agua/cemento debe aproximarse a 0.4 en mezclas para gunitado, y 0.6 a 0.8 para hormigones de colaje.

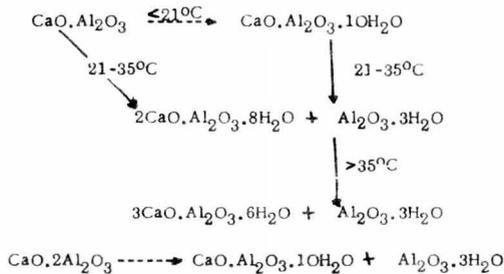
TABLA 1. Composición de un cemento de alto contenido en alúmina

Constituyente	Cemento comercial de alto contenido en alúmina			Cemento de alta pureza	Cemento de alta pureza
	a	b	c	d	e
Al_2O_3	39.2	41.8	50.8	72.75	90.0
CaO	36.9	36.6	39.6	24.88	18.0
ClO_2	9.3	8.3	5.8	0.45	0.05
Fe_2O_3	10.2	4.7	5.6	0.63	0.4
MgO	1.0	1.1	-	0.69	0.4
TiO_2	1.1	0.2	-	Trazas	
Pérdidas al fuego	-	1.1	-	0.46	

TABLA 2. Componentes en el cemento de alta pureza clase d

Componentes	Cantidad
$\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$	48,1
$\text{CaO}, 2\text{Al}_2\text{O}_3$	36,1
Al_2O_3	9,4
$2\text{CaO}, \text{Fe}_2\text{O}_3$	1,1
$2\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$	1,8
$\text{MgO}, \text{Al}_2\text{O}_3$	2,4

TABLA 3. Pasos correspondientes a la hidratación del aluminato cálcico



Los primeros mortigones refractarios que se fabricaron, se vertían en moldes como si fueran material de estructura, tal como se indica en la Fig. 14, pero a principios de los años 20 se inició la técnica del guni tado, primeramente para reparaciones y posteriormente para revestimientos completos. Con pistolas de proyección mejoradas y superiores técnicas de aplicación, se encontró que era posible conseguir densidades tan altas o superiores, incluso en un 5% de la del material de colado y resistencias mecánicas del orden de un 50% superiores.

El proyector utilizado puede ser de tipo seco, como se muestra esquemáticamente en la Fig. 15. Sin embargo, se ha constatado que resulta mejor humedecer la mezcla previamente a su adición a la cámara de pulverización. Debe añadirse una cantidad de agua equivalente a un quinto del peso total para que la mezcla se mantenga fluida. El resto de agua se adicionará en el inyector, siendo controlada la cantidad por el operario. El proyector seco produce un mortigón denso con baja proporción de agua/cemento.

Menos utilizado que el anterior, es el proyector de tipo húmedo, que se muestra en la Fig. 16, donde se forma la pasta, mezclando una cantidad controlada de agua con el material seco y posteriormente forzando la mezcla a través de la boquilla del inyector. El mortigón que ha sido colocado con el proyector húmedo es

FIG. 13 Método para medir la resistencia mecánica de una junta de cemento.

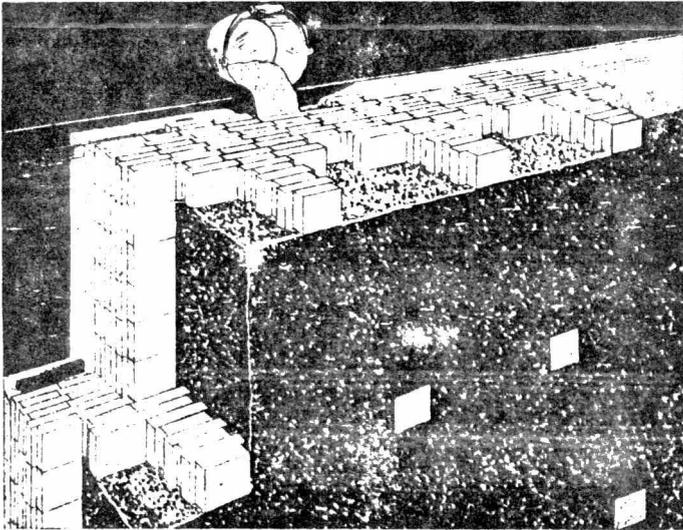
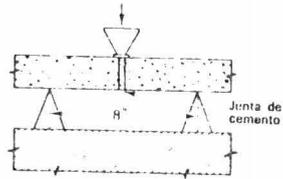


FIG. 14 Colado de hormigón refractario aislante por la parte posterior de una pared refractaria. En la cara caliente se utilizan bloques de anclaje.
(Cortesía de M. H. Detrick Co.)

de inferior densidad que el revestimiento que se obtiene con el proyector seco. La Fig. 18 muestra un proyector en pleno funcionamiento.

Uno de los problemas a resolver es la considerable cantidad de material que rebota, la cual normalmente oscila alrededor de un tercio del total que pasa a través del proyector seco. Livovich ha indicado que adicionando pequeñas cantidades de arcilla o bentonita a la mezcla se evita muchísimo este rebote, aun cuando a menudo ello repercute en las propiedades finales. Ha encontrado este autor que, adicionando un 8% de "ball clay" (bolas de arcilla), disminuye el rebote de un 33 a un 13% y que ello incluye muy poco en la resistencia final. Ya que el material que rebota es de baja densidad, no debe intervenir en la formación de la estructura. Sin embargo, puede ser recuperado y adicionado de nuevo al depósito suministrador del proyector si se controla el contenido de agua. Para formar una estructura uniforme y densa es necesaria una gran habilidad por parte del operario que manipula el inyector.

Se han proyectado varios tipos de anclajes para mantener la firmeza de las paredes o techos monolíticos, tanto si se colocan con la técnica normal de gunitado, como apisonado. Algunos de ellos son tacos metálicos útiles a bajas temperaturas, pero generalmente un modelo refractario el que se encierra en una envoltura, tal como se muestra en la Fig. 18.

Luego que el hormigón está ya colocado, se le deja fraguar sin pérdida de agua. Antiguamente, el hormigón era frecuentemente rociado con agua pulverizada para evitar el secado, pero era una operación que consumía tiempo y requería el mantenimiento del andamiaje en su lugar, hasta que había finalizado el fraguado. Hoy día es práctica general el rociar inmediatamente la superficie de trabajo, una vez terminado, con una membrana impermeable correspondiente a una solución de resina atomizada o bien con un asfalto especial, para mantener la humedad en el revestimiento.

Los hormigones refractarios gunitados encuentran hoy en día muchas aplicaciones, tales como la construcción de los revestimientos de los altos hornos, la colocación de revestimientos para la industria del petróleo, la reparación de hornos de cubilote.

Hormigones refractarios aislantes.- Estos materiales se utilizan muchísimo hoy en día para aislamiento de paredes, y consisten en un agregado de peso ligero, que puede ser vermiculita, tierra de diatomeas o partículas porosas de chamota, con adición de cemento de alto contenido en alúmina. La mayor parte de la mezcla puede ser aplicada con un proyector, para obtener una instalación de bajo costo. Se necesita, sin embargo, mucha experiencia para producir de este modo una estructura de baja densidad. Son normales las densidades -

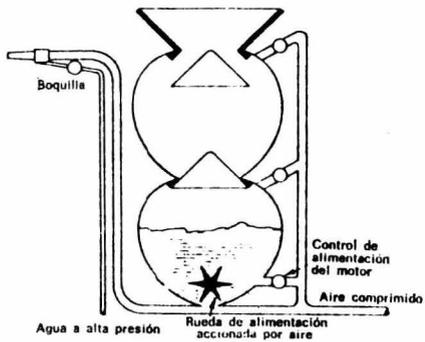


FIG. 15 Pistola de proyección en seco.

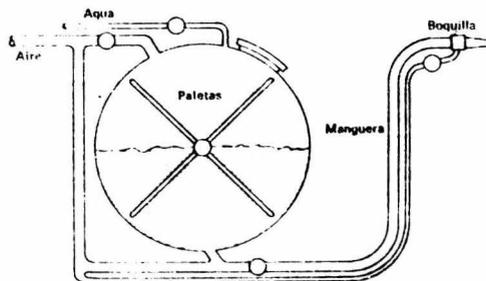


FIG. 16 Pistola de proyección de la mezcla húmeda.

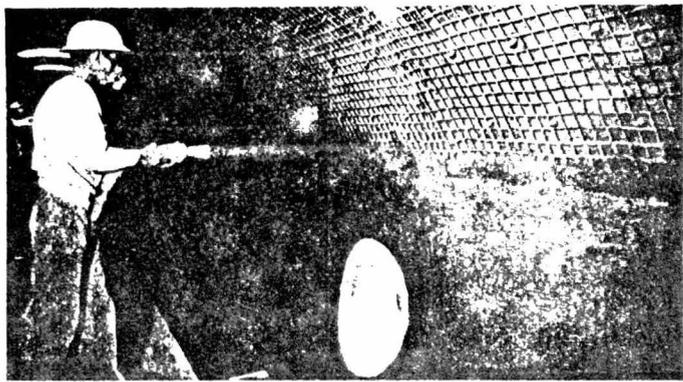


FIG. 17 Pulverización de un refractario de hormigón en el interior de un convertidor en una planta de azufre. (Cortesía de Babcock & Wilcox Co.)

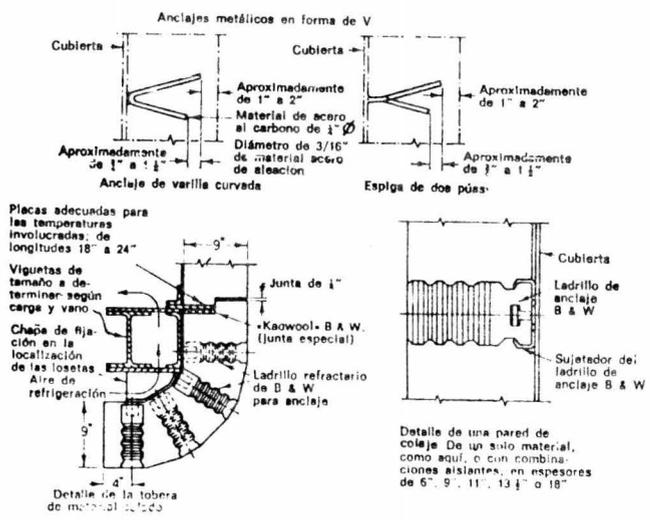


FIG. 18 Tirantes para paredes hechas de coque. (Cortesía de Babcock & Wilcox Co.)

del orden de 40 a 60 libras/ft³ (-0.640-0.960 g/cm³ ó 640-960 Kg/m³).

Recubrimientos. - Los recubrimientos refractarios se utilizan con una cierta extensión en las superficies de ciertos tipos de mampostería para cerrar los poros y presentar una superficie más homogénea, minimizando así la abrasión y la erosión por parte de la escoria. Sin embargo, se han hecho siempre reclamaciones injustificadas con respecto a los recubrimientos que normalmente se considera de un bajo poder refractario, se espera que funcione perfectamente en condiciones mucho más duras que las previstas. Esto no es asequible en todos los casos, y por lo tanto, los recubrimientos no son en modo alguno la panacea de los problemas de los refractarios.

Recubrimientos naturales. - La arcilla refractaria en crudo, que se utilizó con una cierta asiduidad en los primeros tiempos, actualmente ha sido más o menos abandonada, debido a su alto poder de contracción y a su tendencia a descascarillarse cuando está ya en la obra. Los recubrimientos naturales se emplean profusamente en Europa y contienen arcilla, cuarzo y feldspatos en proporciones tales que reducen la contracción y dan fluidez a la masa. Este material es muy similar al de los morteros naturales, anteriormente descritos y generalmente ofrecen buenas propiedades de manipulación a un costo relativamente bajo.

Recubrimientos de arcillas elaboradas. - Para condiciones de alta temperatura, el recubrimiento más comúnmente utilizado es una mezcla de chamota calcinada con un cemento de arcilla plástica. Un buen recubrimiento debe poseer baja contracción y buena adherencia a los ladrillos, de tal modo que no se observe descascarillado o agrietamientos a la temperatura de trabajo. Deben tenerse en cuenta las recomendaciones de los fabricantes de ladrillos, ya que un recubrimiento que puede trabajar muy bien con un tipo de refractario es posible que no funcione en absoluto con otro tipo, aun cuando tenga a veces propiedades similares.

Recubrimientos especiales. - En el mercado existen muchos recubrimientos especiales, tales como los de base de cromita o de óxido cromo, que se utilizan para dar algo más de resistencia a la escoria en el ladrillo refractario o aislante. Hay también recubrimientos que contienen alúmina fundida o carburo de silicio como base y se utilizan para fines especiales. Todos deben poseer la propiedad común de presentar débil contracción y una gran adherencia al ladrillo con el cual se utilizan.

Aplicación de los recubrimientos. - Los recubrimientos se colocan en obra con una brocha o a pistola. Este último método da mejores resultados. Los recubrimientos deben extenderse en capas relativamente delgadas, siendo de 1/16 a 1/8 de pulgada los valores máximos utilizados. Aun este caso, se logra un mejor acabado si el material se extiende en el mayor número de capas posible. Debe utilizarse un promedio de 1/4 a 1/2 libra

de material por pie cuadrado de superficie. Debe tenerse mucho cuidado de que el paramento de ladrillos este limpio y libre de polvo, antes de extender el recubrimiento.

CAPITULO 4

P R O P I E D A D E S

PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO DE LOS REFRACTARIOS

El ladrillo y otras formas refractarias se componen frecuentemente de varias materias primas, destinadas a regular la refractariedad y otras propiedades físicas y su comportamiento. La composición química está así influenciada por las propiedades de las materias primas y por la facilidad de disponer de éstas en los distintos centros de producción. Salvo en muy pocos casos, las composiciones no son críticas, e incluso para tipos bien definidos de refractarios, los componentes pueden variar en un intervalo de varias unidades por ciento. Esto se ilustra en la Tabla I.

La Tabla II resume las propiedades físicas y térmicas de materiales reconocidos.

La comprensión del comportamiento comparado de los refractarios ayuda a su selección para el uso en presencia de las numerosas fuerzas destructivas, con que se tropieza en procesos a altas temperaturas. El comportamiento o resistencia a estas fuerzas se puede determinar, hasta cierto grado, mediante ensayos normalizados y especiales de laboratorio; pero éstos frecuentemente han de relacionarse con observaciones de los materiales en servicio.

El ataque químico, la formación de escorias o la fundición, pueden destruir completamente un material refractario. Los esfuerzos de compresión y tracción aplicados y la tensión inducida por cambios de volumen permanentes en la masa refractaria a elevada temperatura, el choque térmico, el choque mecánico y la abrasión pueden destruir la estabilidad física de una estructura refractaria. El calor específico y la conductividad térmica son, naturalmente, de gran importancia. En algunas aplicaciones se necesita baja conductividad, pues el refractario ha de actuar en parte como aislante.

En otras, como en las paredes de una mufla o en tubos de recuperación, se desea alta conductividad térmica. En los registros de los sistemas regenerativos se desea una capacidad calorífica alta. El funcionamiento de los refractarios está influenciado por su composición, por variables de la elaboración mecánica y en alto grado por el tratamiento térmico recibido durante la fabricación y el uso subsiguiente.

Los materiales refractarios varían grandemente en sus propiedades químicas y físicas. Dentro de las propiedades más importantes, se encuentran su refractibilidad, su resistencia mecánica, su resistencia a la abrasión y erosión, sus características químicas, su porosidad y permeabilidad, su expansión térmica, su resistencia a la disgregación, su conductividad térmica y su calor específico.

Refractibilidad. - Es la propiedad de los materiales de soportar elevadas temperaturas. Esta caracterís-

TABLA I. Composición química de refractarios

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O y K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Otros
Ladrillo de arcilla refractaria:									
Superrefractario (tipo normal y extracocido)	51-54	40-43	1.4-2.3	2.1-2.5	0.2-0.5	0.2-0.5	0.6-1.4	—	—
Superrefractario (tipo caolín)	50-53	44-46	0.5-1.2	1.0-2.0	0.10	0.22	0.04	—	—
Refractario de servicio fuerte	51-59	35-40	1.6-2.5	2.0-3.0	0.3-0.5	0.5-0.6	1.3-1.6	—	—
Refractario intermedio	36-70	25-36	1.8-3.4	1.8-1.9	0.2-0.4	0.5-0.6	1.0-2.7	—	—
Refractario de servicio ligero	53-69	25-34	2.3-3.4	1.0-2.0	0.3-0.6	0.4-0.6	1.8-2.9	—	—
Refractario silíceo para servicio fuerte	65-78	19-21	0.9-1.4	1.0-1.3	0.1-0.2	0.2-0.4	0.3-1.1	—	—
Ladrillo de sílice:									
Superrefractario	96.4-97.4	0.2-0.4	0.3-0.6	0.03-0.06	2.2-3.0	—	0.05-0.06	—	—
Corriente	94.9-96.5	0.6-1.2	0.4-0.7	0.04-0.1	2.0-3.5	—	0.05-0.25	—	—
Ladrillo de alta alúmina:									
99% Al ₂ O ₃	0.5	99.0	0.2	—	—	0.1	—	—	—
90% Al ₂ O ₃	7.6-9.2	88.8-90.9	0.3-0.5	0.2-0.7	0.2-0.3	0.1-0.2	0.2-0.3	—	—
80% Al ₂ O ₃	12.0-15.0	78.0-82.0	1.7-2.1	3.0-4.9	0.1-0.5	0.1-0.3	1.0-1.3	—	—
70% Al ₂ O ₃	21.0-26.0	68.0-71.0	1.8-3.0	2.9-3.7	0.1-0.2	0.1-0.5	1.2-1.6	—	—
60% Al ₂ O ₃	32.0-37.0	58.6-60.4	1.7-2.4	2.8-3.3	0.2-0.5	0.3-0.5	1.4-1.9	—	—
60% Al ₂ O ₃ (con Al ₂ O ₃ cristalino)	33.5-36.6	58.7-59.6	0.9-1.6	2.0-2.4	0.2-0.5	0.3-0.4	0.8-1.1	—	—
50% Al ₂ O ₃	43.0-47.0	47.0-51.0	0.9-1.6	2.2-2.4	0.5-0.6	0.5-0.6	0.8-1.3	—	—
60% Al ₂ O ₃ (silimanita-mulita)	32.0-35.0	62.0-66.0	0.05-0.2	0.7-1.5	0.1-0.3	0.1-0.3	0.3-0.5	—	—
Ladrillo básico:									
Le cromo (coccido)	3.0-7.0	17.0-30.0	13.0-15.0	—	0.2-0.4	16.0-21.0	—	34.0-42.0	—
Cromo-magnesita (aglutinado químicamente)	5.0-5.5	17.0-22.0	10.0-13.0	—	Indicios 1.0	29.0-32.0	—	28.0-30.0	2.9-3.0*
Cromo-magnesita (coccido)	2.0-8.0	21.0-25.0	10.0-12.0	—	0.9-1.2	30.0-37.0	—	22.0-34.0	—
Magnesita (coccido)	3.7-5.2	0.7-2.0	0.4-2.9	—	1.8-4.5	96.0-92.0	—	0.7-1.0	—
Magnesita-cromo (aglutinado químicamente)	4.8-5.5	13.0-23.0	8.9-9.4	—	0.7-2.7	33.0-49.0	—	16.0-23.0	3.3-4.3*
Forsterita	31.0-34.0	1.5-1.7	9.0-9.3	—	1.4-1.6	33.0-55.0	—	1.4-1.7	—
Ladrillo refractario aliante:									
1 600° F. (871° C.)	Clase	La materia prima puede ser diatomita, vermiculita dilatada, arcilla refractaria o caolín.							
2 000° F. (1 093° C.)		La materia prima puede ser diatomita, arcilla refractaria o caolín. La composición de los dos últimos tipos sería alúmina-sílice frecuentemente con alto porcentaje del peso calcinado usado para aglutinar.							
2 300° F. (1 260° C.)		La materia prima puede ser arcilla refractaria o caolín.							
2 600° F. (1 427° C.)		La materia prima puede ser arcilla refractaria o caolín y materiales de alúmina alta.							
Clase 2 800-3 000° F. (1 538-1 649° C.)	La materia prima es cuarcita con cal para aglutinar.								
Clase 2 800-3 000° F. (1 538-1 649° C.), silíceo									
Refractarios especiales:									
Carburo de silicio aglutinado con arcilla)	7.0-9.0	2.0-4.0	0.3	1.0	—	—	—	—	SiC 85.0-95.0
Carburo de silicio	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Carbono	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Circon	34.6	0.2	0.1	0.2	0.1	Indicios	Indicios	—	ZrO ₂ 64.7
Circóna	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Berilia	—	—	—	—	—	—	—	—	BeO 97.4
Toria	—	—	—	—	—	—	—	—	TiO ₂ 97.4

* Pérdida por calcinación.

TABLA II. Propiedades de materiales refractarios

Material	P.f., °C.	Densidad	Dureza (escala de Mohs)	Calor específico medio (20-1000° C.)	Dilatación calorífica reversible, media (20- 1000° C.) × 10 ⁻⁴	Conductividad térmica kilo-cal./(m ² .(h.) (°C./m)			Resistividad eléctrica* (ohm.(cm ²)/(cm))		
						1 000° F. (538° C.)	1 600° F. (871° C.)	2 400° F. (1 315° C.)	1 500° F. (815° C.)	2 000° F. (1 103° C.)	2 500° F. (1 371° C.)
Alúmina, Al ₂ O ₃	2 015	4.0	9	0.270 (30- 1 300° C.)	8.1 (20- 1 250° C.)	2.72 ^a	2.23 ^a	2.01 ^a	140 000 ^a	24 000 ^a	170 ^a
Berilia, BeO	2 510 aprox. ^d	3.03	9	0.29	9.3 (25- 1 400° C.)	—	—	12.89 (1 119° C.)	4 × 10 ¹⁴	3.5 × 10 ¹²	2 × 10 ¹¹
Carbón grado de altos hornos, 90% C	—	2.10	4-6	0.25	4.0	2.34	2.97	—	0.00305	0.00305	—
Cromita	2 180	4.5	5.5	0.22	8.0	1.56	1.57	1.63	650	185	40
Diasporo ^f	2 015	3.4	6.5-7	0.25	6.5	1.45 ^g	1.35 ^g	1.24 ^g	10 500	1 630	350
Dolomita calcinada	2 370	2.83-2.99	4.0	0.22 ^h (20- 100° C.)	14.0	—	1.86	—	—	—	—
Refractarios de arcilla	1 870	2.6-2.7	—	0.25 ^h (materia prima) 0.252-0.266	3.1 ^h (200- 1 000° C.)	0.93 aprox.	1.12 aprox.	1.33	23 500 ⁱ	1 400 ⁱ	1 900 ⁱ
Forsterita, 2MgO.SiO ₂	—	3.19	6.7	0.22 (20- 100° C.)	10.5	1.40	1.31	1.20	—	aprox.	aprox.
Grafito	—	2.25	1-2	0.34	1.5	86.81	74.40	62.01	0.00076	0.00079	0.00084
Magnesia, MgO	2 800	3.6	6.0	0.287 (30- 1 300° C.)	14.3 (20- 1 400° C.)	3.42	2.83	2.48	4 × 10 ¹⁴	1.5 × 10 ¹²	10 500
Espinela de magnesita MgO.Al ₂ O ₃	2 136	3.6	8	0.257	9.0 (20- 1 250° C.)	1.51	1.65	1.80	Muy alta	Alta	—
Mulita, 3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	1 830	3.16	7.5	0.238	5.3	2.05 ^j	1.76 ^j	1.63 ^j	60 000 ^k	11 500 ^k	Por debajo de 1 000 ^k
Silíce (cuarzo)	1 715 ^l	2.65	7	0.253	40 ^m (30- 230° C.)	1.19 ^m	1.43 ^m	1.78 ^m	240 000 ⁿ	23 000 ⁿ	9 200 ⁿ
Silíce vítrea (véase Silíce y silicatos)	1 710 ^o	2.2	7	0.134 (20- 1 200° C.)	0.54 ^p	—	—	1.65	2 × 10 ¹⁴ (1 000° F.)	2 × 10 ¹² (1 400° F.)	—
Carburo de silicio, SiC	2 159	3.17-3.21	9.5	0.19 ^q	5.2	5.64	3.77	6.01	11 000	6 500	1 500
Silimanita, Al ₂ O ₃ .SiO ₂	1 815	3.24	6-7.5	0.17	5.4	1.31	1.36	—	140 000	21 000	4 500
Toria, ThO ₂	3 050	9.69	6.5	0.06	9.4 (20- 1 400° C.)	—	—	—	6.1 × 10 ¹²	5 × 10 ¹¹	6.2 × 10 ⁸
Circón, ZrO ₂ .SiO ₂	2 500	4.7	7.5	0.132 (21- 315° C.)	5.1 (20- 1 250° C.)	2.46	2.02	1.76	—	—	—
Circona, ZrO ₂	2 700	5.5-6.1	6.5	0.168	11.0 ^r (20- 1 250° C.)	0.62 ^s	0.62 ^s	0.62 ^s	—	—	—

- ^a Los datos disponibles muestran gran variación.
^b 99% de alúmina.
^c Ladrillo con 85% de alúmina.
^d Volátil por encima de 1 650° C. en presencia de vapor de agua.
^e Se oxida, pero en atmósfera reductora se convierte gradualmente en grafito por encima de 2 200° C.
^f El diásporo industrial se compone de granos de diásporo aglutinados con arcilla.
^g Ladrillo de diásporo con 75% de alúmina, porosidad 30%.
^h Valor medio. Intervalo que abarca varios tipos: a 200° C. 4.5 × 10⁻⁴ y a 1 000° C. 9 × 10⁻⁴.

- ⁱ Se oxida, pero en atmósfera reductora se sublima por encima de los 3 700° C.
^j De un cuerpo virtualmente sin poros.
^k Aglutinado con arcilla (alúmina, 67%).
^l Punto de fusión de la cristobalita.
^m Refractarios de silíce.
ⁿ Se reblandece alrededor de 150° C.
^o Temperatura de descomposición, la oxidación empieza a 900° C.
^p Varía considerablemente con la temperatura.
^q Producto "estabilizado".

tica está íntimamente ligada en su concepto a las temperaturas de ablandamiento y fusión de los materiales, así como la deformación bajo carga y cambio de volumen permanente a temperaturas elevadas. Para los ladrillos de arcilla y para algunos de alta alúmina, la refractibilidad se mide por medio del cono pirométrico equivalente; en los ladrillos de sílice y básicos esta refractibilidad se mide bajo el concepto de deformación bajo carga 1.76Kg por centímetro cuadrado. En el caso de ladrillos de alta pureza y de minerales, la refractibilidad se puede estimar, por medio de los puntos de fusión de los materiales puros.

Los valores del cono pirométrico equivalente son una medida relativa de los puntos de ablandamiento de los materiales refractarios bajo tiempo y temperatura controlada, pero no dan ninguna información respecto a la temperatura máxima que resistan los refractarios en servicio. En algunos casos, la temperatura de ablandamiento que corresponde al cono pirométrico equivalente es considerablemente mayor a la temperatura recomendada en servicio.

La refractibilidad de los ladrillos de sílice está relacionada directamente con la pureza de la cuarcita usada en su manufactura y en la granulometría del ladrillo. En la prueba de deformación bajo carga a 1.76Kg por centímetro cuadrado, el ladrillo de sílice convencional se fractura en el rango de 1 635 a 1 676°C; el ladrillo de sílice de calidad superior en el rango de 1 685 a 1 704°C.

Los minerales básicos de periclasa, espinela de cromo y forsterita tienen extremadamente alto punto de fusión. Sin embargo, la refractibilidad de los ladrillos básicos también depende de la composición granulométrica del material.

La temperatura de la prueba de deformación bajo carga a 1.76 Kg por centímetro cuadrado, varía ampliamente con las muchas modificaciones de ladrillos básicos disponibles. Para algunos de ellos esta temperatura es de 1 316°C, mientras que para los ladrillos de magnesita de alta pureza esta temperatura puede llegar hasta 2 205°C.

Resistencia mecánica. - En muchos casos el ladrillo está sujeto a impactos, abrasión y presión simple o combinada a las temperaturas de operación. Por lo tanto, los revestimientos refractarios deben tener resistencia, tanto en caliente como en frío sin ser quebradizos.

Características químicas. - Las características químicas sirven como una base para la clasificación de los refractarios por su refractibilidad, así como una guía para determinar su punto de fusión. Uno de los usos más importantes del análisis químico es para el control de calidad.

La resistencia al ataque químico a altas temperaturas es una cualidad importante, que deben tener los materiales para revestimientos de hornos.

Bajo condiciones de operación, los materiales pueden ser atacados químicamente por la carga del horno, por cenizas, escorias, polvo, gases y en algunos casos, hasta por otros refractarios.

En general, los refractarios silicosos son los más resistentes a los fundentes ácidos y los refractarios básicos a los fundentes básicos. Sin embargo, la resistencia de los refractarios al ataque químico no es una propiedad fundamental, ya que depende de muchos factores que incluyen la naturaleza del material dentro del horno, la temperatura de operación y las propiedades físicas de la reacción que se lleva a cabo en los productos elaborados.

Bajo condiciones normales de operación, no hay reacciones entre los refractarios que perjudiquen al horno, sin embargo, hay varias combinaciones donde los refractarios entre sí son destructivos mutuamente y se deben evitar. Algunos de estos casos es el caso de ladrillos de magnesita con ladrillos de arcilla, ladrillos de magnesita en contacto con ladrillos de sílice arriba de 1 538°C y ladrillos de cromo en contacto con ladrillos de carburo de silicio. Naturalmente, no se deben de usar morteros que ataquen los ladrillos que se han pegado con el mismo. Es práctica común separar los refractarios que puedan reaccionar entre sí, con una capa de ladrillo o mortero que no reaccione con ninguno de los dos materiales.

Porosidad y permeabilidad.- Durante el servicio, la habilidad de los refractarios de ser penetrados por fluidos o gases, tienen bastante importancia en su duración. Un ladrillo completamente impermeable o sin poros podría ser únicamente atacado en sus caras expuestas, mientras que en un ladrillo permeable o poroso la superficie del ataque se incrementaría.

Cuando los ladrillos refractarios no están expuestos a gases o fluidos, la porosidad y la permeabilidad no son de gran importancia en su duración, sin embargo, en muchas aplicaciones hay que tomar estos ataques en consideración, para recomendar el refractario adecuado.

Expansión térmica.- Cuando los ladrillos refractarios se calientan, expanden y al enfriarlos se contraen. Si no se efectuó ningún cambio permanente en la naturaleza del ladrillo durante su calentamiento, el ladrillo regresará a sus dimensiones originales cuando se enfría. Este efecto por lo tanto, se conoce con el nombre de Expansión Térmica Reversible. La expansión térmica en muchos refractarios generalmente procede en una razón uniforme a lo largo de las temperaturas de operación, sin embargo, en el caso de ladrillo de sílice la mayor parte de la expansión del ladrillo se efectúa abajo de los 3 000°C.

En la construcción de hornos, principalmente en los grandes, se deben dejar juntas de expansión entre los materiales refractarios. Esta junta de expansión debe ser adecuada, ya que una junta de expansión insuficiente, en algunos casos causaría disgregación o abombamiento de las paredes y arcos.

Por otro lado, una expansión demasiado fuerte, causaría un ablandamiento estructural, así como fugas de gases o infiltración de aire.

La cantidad permisible de juntas de expansión térmica para ladrillos refractarios arriba de 1 400°C se da en la siguiente tabla:

Tipo de ladrillo	Expansión aproximada por pie en pulgadas
Arcilla	3/32
Alta alúmina 50 a 80% Al_2O_3	3/32
Alta alúmina 90% Al_2O_3	1/8
Alta alúmina 98% Al_2O_3	5/32
Sílice	5/32 a 3/16
Magnesita y magnesita-cromo quemados	1/4
Magnesita-cromo químicamente unidos	3/16
Magnesita-cromo liga espinal	3/16
Cromo y cromo-magnesita quemados	1/8
Cromo-magnesita químicamente unidos	7/32
Forsterita	3/16

Frecuentemente estas tolerancias se disminuyen debido a las temperaturas menores de operación de los hornos u hornos con diseño especial que absorben esta expansión.

Disgregación. - En varios tipos de hornos las condiciones de servicio hacen necesarias que los ladrillos refractarios estén expuestos a condiciones o agentes de disgregación. Estas pérdidas de material refractario se deben a tres tipos de ellas, que con disgregación térmica, mecánica y estructural.

La disgregación térmica está causada por esfuerzos que resultan de la desigualdad de la razón de expansión o contracción dentro del cuerpo del mismo refractario.

Los refractarios que tienen mayor resistencia a la disgregación térmica, son aquellas que tienen promedio bajo de expansión térmica, que están libres de inversiones de cristales y cuya textura es resistente a la flexibilidad y a la revelación de esfuerzos.

Generalmente los ladrillos básicos tienen una mayor resistencia a la disgregación térmica, que los ladrillos de arcilla y alta alúmina. La resistencia a la disgregación de los ladrillos básicos se aumenta grandemente por el uso de caja de acero alrededor de los mismos. La caja metálica reacciona con el material refractario para formar la magnesio-ferrita, que sirve como liga entre los ladrillos en su cara caliente y esto evita que los ladrillos se caigan en pedazos y además la lámina sin fundir de un esfuerzo al demás ladrillo en las partes frías de la estructura.

La disgregación mecánica generalmente es causada por el rápido secamiento del ladrillo o de los monolíticos, o también puede ser debida a la falta de juntas de expansión.

La disgregación estructural está causada por cambios minerales dentro del mismo cuerpo del ladrillo, debidas al calor o a la influencia de los contenidos de los hornos a temperaturas altas.

Estas alteraciones traen como resultado el cambio de volumen del refractario y el aumento de sensibilidad al cambio de temperatura o a zonas que tienen diferentes características de expansión.

Los refractarios de alta pureza y aquellos que tienen baja permeabilidad son los más resistentes a la disgregación estructural.

Conductividad térmica. - Cuando un horno es calentado, la energía calorífica pasa a través de la estructura del refractario, causando una diferencia de temperaturas entre la superficie interior y exterior de las paredes o bóvedas. Parte de esta energía calorífica es almacenada dentro de la estructura del refractario y parte de la misma, pasa a través de paredes, bóvedas, pisos y se pierde a la intemperie por radiación o convección. La cantidad de calor que se pierde de esta manera, en algunos casos es importante económicamente en la operación del horno.

La habilidad para conducir el calor de los materiales refractarios varía grandemente, los factores que afectan principalmente la conductividad son: constitución química y mineral, porosidad, tamaño del poro y temperatura. En algunos casos, se requiere que la conductividad del ladrillo sea alta, para que la mayor cantidad de calor salga a través de las paredes, como el caso de muflaz y de recuperadores. Pero en la mayoría de los casos es esencial tener una baja conductividad de calor, para obtener economía de combustible, pero generalmente la selección del refractario se hace y no se toma en cuenta este factor. Los ladrillos aislantes con sus

bajas conductividades térmicas proveen un gran ahorro de calor, cuando se usan adecuadamente. En los ladrillos químicamente ligados o en los refractarios monolíticos, se efectúan cambios químicos y físicos durante el servicio, causando cambios en la conductividad térmica.

La extensión de estos cambios depende exclusivamente de la temperatura. Debido al gradiente de temperatura a través del revestimiento se forman zonas a través del mismo, con diferentes masas entre las zonas distintas.

Tensiones aplicadas .- La resistencia al aplastamiento en frío (resistencia a la compresión) y el módulo de ruptura se mide por ensayos normalizados típicos para estos materiales de construcción. La resistencia al aplastamiento en frío es generalmente muy en exceso de cualquier carga muerta aplicada en uso. Tiene valor para comprobar el efecto de tratamientos especiales de secado y calcinación en la manufactura. El módulo de ruptura en frío, excepto en algunos tipos de ladrillo refractario aislante, varía aproximadamente entre 14 y - 210 Kg/cm². Se causa mucho daño a los ladrillos por choque si se dejan caer o se manejan sin cuidado. No hay ensayo normalizado para medir la resistencia a este tipo de tensión (pero se ha hallado alguna correlación con una modificación del ensayo en el barril de volteo. Se hacen girar cierto número de vueltas las muestras de ladrillo en un barril de acero, que contiene bolas de fundición; se determina la pérdida de peso causada por la abrasión).

Los refractarios están sujetos a acción abrasiva cuando se frotan unos con otros, por contacto con sólidos en movimiento o en forma de lingotes o planchas de acero, o como polvo en los gases. No se ha ideado un ensayo normalizado para medir la resistencia a la abrasión, en frío o en caliente, por lo cual esta propiedad se calcula frecuentemente por el módulo de ruptura.

Al interpretar los datos del ensayo de carga en caliente, hay que tener en cuenta que el ensayo se hace en muestras calentadas totalmente a la temperatura de ensayo. Cuando se usan ladrillos refractarios en techos y muros de hornos, usualmente sólo se calientan por un lado. Si esta estructura está cargada uniformemente, el refractario puede tener sobre-tensión por el lado caliente; pero esto no causa necesariamente el fallo de la estructura, pues la deformación resultante en la cara caliente puede simplemente transferir tensión a las partes internas o más frías del arco o del muro en donde la tensión tendrá poco efecto.

Los ensayos transversales a elevadas temperaturas, aunque no normalizados, se hacen en aparatos diseñados especialmente con un número limitado de refractarios de arcilla y de alta alúmina. El módulo de ruptura aumenta a medida que la temperatura sube hasta 1 000°C.

En algunos casos, no hay disminución de la resistencia transversa hasta que la temperatura llega a - 1 200°C.

Desconchado.- El desconchado se puede definir como la fractura del ladrillo o bloque refractario y se debe a diferentes causas como:

- 1.- Un gradiente de temperatura en el ladrillo, debido a un enfriamiento o calentamiento no uniformes, que es suficiente para producir tensiones de magnitud tal, que puedan llegar a una rotura.
- 2.- Una compresión de la estructura del refractario, debida a la expansión de la totalidad de la pieza, suficiente para producir roturas por el esfuerzo.
- 3.- Una variación en el coeficiente de expansión térmica entre la capa superficial y el cuerpo del ladrillo, debida a la penetración superficial de la escoria o a un cambio estructural, mientras funciona, lo suficientemente grande, como para cizallar la capa superficial.

El primer caso es el efecto predominante en refractarios, tales como sílice, magnesita y cromita. Ya que este fenómeno está producido por las propiedades inherentes al refractario. El segundo caso es debido casi siempre a un pobre diseño del horno, y raras veces podrá atribuirse al refractario. El tercer caso puede hacerse mínimo, utilizando ladrillos cocidos a temperaturas más altas que las temperaturas de operación subsiguientes y evitando la penetración de la escoria hasta donde sea posible.

Características de un ladrillo que posea una buena resistencia al desconchado.- Normalmente se dispone de un material específico a partir del cual puedan hacerse los ladrillos. Con este material es imposible alterar la difusividad de un modo apreciable, y solamente podrán producirse pequeños cambios en el coeficiente de expansión térmica. Por lo tanto, si deseamos, a partir de un material dado, fabricar el ladrillo de mejor calidad (o sea el más resistente al desconchado), se deberán hacer dos cosas: 1) Obtener una estructura que posea la mayor flexibilidad posible; 2) Eliminar todas las posibles grietas y estratificaciones.

El mejor método para obtener la flexibilidad es utilizar chamota de gran tamaño, de alto grado de porosidad y de bajo grado de vitrificación.

Estas características no pueden obtenerse en alto grado, sin sacrificar otras de considerable importancia a su vez (mecánicas, contracción residual alta).

Se ha visto a menudo que cuando se ensaya el desconchado de una serie de ladrillos, habrá una gran variación entre los mejores y los peores del mismo lote. Si se sabe que estos ladrillos se han hecho por medio de un proceso idéntico, y que todos fueron cocidos a la misma temperatura, podemos concluir que las diferen-

cias que resultan en las resistencias al desconchado son debidas únicamente a una cierta falta de homogeneidad en la estructura del ladrillo. Es imposible afirmar de un modo definitivo y concluyente, que cualquier método de fabricación de ladrillos da los mejores, o peores resultados, frente al desconchado, a pesar del hecho de que generalmente se ve que los ladrillos reprensados, cuando se han templado adecuadamente dan mayor uniformidad en el ensayo frente al desconchado. De todo ello se desprende la gran necesidad que existe de disponer de un ensayo sencillo que posibilite el afirmar que ladrillos de un lote dado, conducirán a una pobre resistencia al desconchado y cuales no lo harán. Se han hecho algunas investigaciones para probar cada ladrillo escuchando el ruido emitido, cuando se les golpea con un martillo, pero aún así no se han obtenido resultados definitivos para poder hacer afirmaciones.

Rotura por desconchado en funcionamiento.- Los tipos de rotura por desconchado, cuando los ladrillos están en servicio en una pared, son muy variados. Quizá la más típica sea la que se indica en la Fig. 19, que consiste en dos grietas por cizalladura que parten ambas del centro del ladrillo. A menudo aparece una pequeña grieta por tensión, tal como se indica en la Fig. 20. La fractura corresponde perfectamente a las fuerzas determinadas en estas condiciones. Este tipo de rotura no es a menudo grave, porque los fragmentos son tan grandes, que continuarían permaneciendo en su lugar.

Otro tipo de rotura por desconchado, que a menudo tiene lugar, es la separación de una delgada capa de material de la cara del ladrillo, como se ve en la Fig. 21. Esto sucede normalmente cuando la fractura transcurre entre el material vitrificado y el cuerpo del ladrillo. A menudo se irá descortezando capa a capa, dando así una duración considerable antes de que la pared se vuelva demasiado delgada.

Los cantos de los bloques que están al aire dentro del horno, y que por lo tanto exponen su superficie a la acción del calor, son bastante susceptibles al desconchado y deberían evitarse en lo posible a la hora del diseño.

El desconchado en la pared se aumenta enormemente con cargas de compresión debido a la expansión. Las juntas de expansión deben dejarse por lo menos cada 4,5 m de longitud, y deben tener un grosor de 1,27 a 2,54 cm.

Otro método es colocar una tira de cartulina entre los ladrillos en cada junta vertical (o piezas más gruesas en juntas alternadas). Estas se quemarán completamente y permitirán al ladrillo expansionarse libremente, sin que por otra parte haya un movimiento general de la pared, como ocurriría si las juntas estuvieran colocadas a una cierta distancia entre sí. A veces se utilizan piezas o placas delgadas de acero, que se

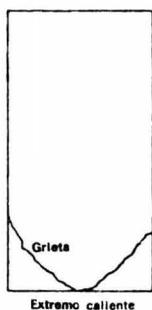


FIG. 197 Típica fractura de desconchado que ocurre a menudo en servicio. (*J. Am. Ceram. Soc.*)

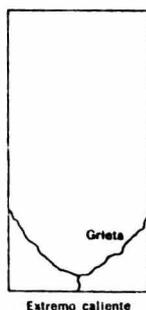


FIG. 198 Grieta por tensión en el extremo de un ladrillo debida al fenómeno del desconchado. (*J. Am. Ceram. Soc.*)

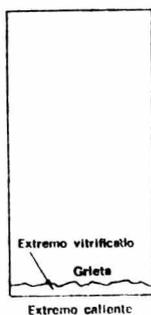


FIG. 201 Separación de una capa delgada debida al fenómeno de vitrificación. (*J. Am. Ceram. Soc.*)



FIG. 202 Desconchado de los bordes expuestos de un horno.

sacan a medida que la pared va progresando, sustituyendo así el papel de cartulina.

En el caso de arcos, a menudo hay una contracción en las extremidades, debido a tensiones producidas por la temperatura. Sin embargo, debe tenerse mucho cuidado en ver si hay separación entre los extremos interiores, cuando las condiciones de temperatura y presión son severas.

Otro factor que influye en el desconchado es la alteración en la estructura de la cara caliente del ladrillo producida por la penetración de escorias, por sinterización, o por reacciones gaseosas. Esta alteración - cambia el coeficiente de expansión de la cara caliente, en relación con la estructura original, con lo cual se introducen esfuerzos cortantes que a menudo serán la causa de la fractura y el descascarillado. Este puede ser la razón principal por la cual un ladrillo denso, cocido a alta temperatura, da a menudo mejores resultados que los que deberían esperarse según los ensayos de desconchado, llevados a cabo en el laboratorio.

La rotura debida al calentamiento rápido del ladrillo que aún está húmedo, ha sido considerada a veces como un tipo especial de desconchado.

La rotura mecánica que tiene lugar cuando los depósitos de escoria penetran en la estructura, cortándola en forma de rebanada, se clasifican también, según algunos usuarios, como desconchado. El fabricante de ladrillos puede contribuir escasamente, para evitar que se produzcan este tipo de roturas. Lo único que está a su alcance es suministrar ladrillos más duros y que soporten mejor los cambios de temperatura.

Ha habido quizá demasiada tendencia por parte de los fabricantes y usuarios de refractarios, en especificar las propiedades que debería tener un ladrillo de gran resistencia al desconchado, según los datos que se obtuvieran en el laboratorio. Sin embargo, ello no tiene una validez general, ya que muchas veces se ha dado el caso de que un ladrillo denso y duro ha permanecido en servicio de un modo mejor y durante más tiempo que uno al que se le registró una buena resistencia al desconchado en el laboratorio. Esto es debido probablemente no a errores en el ensayo de laboratorio, sino a las condiciones de carga mecánica, que aparecen durante el servicio, y que de alguna manera no se tuvieron en cuenta a la hora de efectuar las pruebas preliminares.

PUNTO DE FUSION

Determinación del punto de fusión por comparación con los conos pirométricos.- Un método común para determinar el punto de fusión es comparar las características de pandeo de la muestra, con una serie de conos pirométricos standards que están todos en el mismo horno.

Tiene la desventaja de que no da un grado de precisión extraordinariamente fino, debido a diferentes causas que se puedan presentar en el horno, el rango es de $\pm 15^{\circ}\text{C}$ (Fig. 24).

Determinación de los puntos de fusión con un pirométrico óptico.- Puede hacerse una determinación más precisa del punto de fusión, que está preparado para el ensayo de la muestra, calentándola en un horno en condiciones de cuerpo negro. Con atención ordinaria, puede obtenerse una precisión de $\pm 7^{\circ}\text{C}$, y, con especial cuidado en la calibración, es posible una precisión de $\pm 4^{\circ}\text{C}$.

La mayoría de los puntos de fusión se han determinado sobre muestras en forma de tetraedros truncados similares al cono pirométrico estándar. Se ha utilizado comúnmente esta forma de muestra, porque el pandeo puede verse fácilmente sin aparatos especiales de medida, pero tiene ciertas desventajas para un trabajo preciso, debido a:

- 1) El tamaño de la muestra varía, dependiendo de la contracción del material refractario;
- 2) La densidad de la muestra varía con el material, de tal modo que las fuerzas de pandeo son variables;
- 3) Las fuerzas de pandeo varían con la posición del cono.

Aparentemente una forma mucho mejor para ensayos de punto de fusión sería una barra pequeña sostenida por sus extremos. Al calentarse la barra se reblandecerá y se comparará en su mitad.

Observando el centro de la barra con una lente de lectura, es posible representar en un gráfico el grado del desplazamiento en función del tiempo, y obtener así una curva capaz de dar un valor preciso del punto de fusión, tal como se indica en la Fig. 25. Sin embargo, son necesarias ciertas precauciones en este tipo de ensayo:

- 1) El material debe ser precalcinado a fin de que se contraiga hasta un volumen estable;
- 2) La distancia entre los soportes debe disponerse para que pueda dar una tensión definida en la muestra basada en su densidad y su sección.

Efecto de la atmósfera sobre el punto de fusión.- El punto de fusión de la sílice o alúmina puras es poco influenciado por la atmósfera del horno; sin embargo, cuando está presente cualquier impureza, especialmente óxidos de hierro, la atmósfera tiene un marcado efecto sobre el punto de fusión. Se encontró que cuando se reducía el óxido de hierro de la mezcla a su condición metálica, por debajo del punto de reblandecimiento, resultaba un pequeño descenso en el punto de fusión. Aparentemente, un proceso de reducción hace al óxido de hierro más activo y susceptible de combinarse con los otros constituyentes.

Los conos de ensayo que están sometidos a una atmósfera reductora, raras veces se doblan de un mo-

do suave. A menudo se forma una capa dura, permitiendo al centro, que está fundido, salirse fuera de la base. Debe tomarse como punto de fusión el momento en que el cono de ensayo cae gradualmente hasta que la punta toca la base, como ocurre en el caso (a) de la Fig. 25. Cuando un cono inclina su base, tal como ocurre en (b), es probable que exista interacción entre el cono y la placa que lo soporta. Algunos materiales, incluso bajo las mejores condiciones, no darán lecturas definidas sino que, o se hincharán, como puede verse en el caso (c), o se derrumbarán, como ocurre en el caso (d).

Si no es para una finalidad especial, los puntos de fusión deberán obtenerse siempre en una atmósfera neutra u oxidante.

Lo que el punto de fusión indica, es si un material es o no conveniente por encima de una cierta temperatura. Por ejemplo, si se deseara hacer un ladrillo refractario para ser utilizado a temperaturas de horno de 1 600°C y se seleccionarán varias muestras de arcilla, la prueba del punto de fusión eliminará inmediatamente todas aquellas cuyo punto de fusión fuera igual o inferior a aquella temperatura. Sin embargo, una arcilla cuyo reblandecimiento tiene lugar a 1 850°C no será necesariamente mejor para este ladrillo que otra en la que dicho fenómeno tenga lugar a 1 750°C.

El punto de fusión de un material no es en absoluto un criterio de su capacidad, para soportar una cierta carga a altas temperaturas, ya que sus posibilidades de aplicación van ligadas más directamente a la temperatura a la cual pueden utilizarse con éxito. Por ejemplo, la magnesita comercial tiene un punto de fusión por encima de 2 000°C; sin embargo, no soportará una presión de cierta magnitud a temperaturas superiores a 1 400°C ó 1 500°C. Por otro lado, un ladrillo de mulita tiene un punto de fusión de 1 780°C, y no mostrará deformación hasta la temperatura de 1 727°C.

Medida del tamaño de partícula. - Análisis por tamizado. - La determinación de la distribución del tamaño de partícula en un material granular es de considerable importancia.

Una muestra que deba ser tamizada debe estar completamente seca y los terrones perfectamente triturados. Entonces debe pasarse la misma, a través de una serie de cedazos, según el tipo de distribución exigido. Hay que procurar sin embargo, agitar los cedazos un tiempo suficientemente largo, para asegurarse de que todo el material de tamaño inferior ha pasado por los cedazos correspondiente.

Macroestructura. - La macroestructura de los refractarios es importante, porque es difícil de encontrar un material homogéneo. El tamaño y forma de los poros, la forma de las partículas de la chamota, y la distribución del aglomerante son de gran interés en este sentido. Por medio del estudio de la estructura, los mé

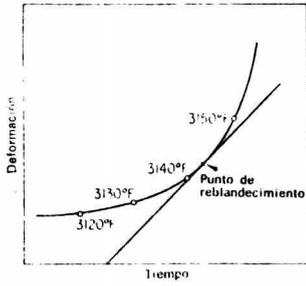


FIG. 23: Método para la determinación del punto de reblandecimiento.

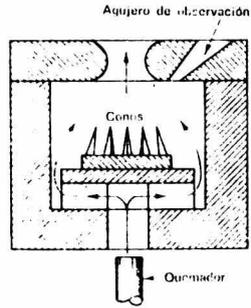


FIG. 24: Horno calentado con gas para la determinación del punto de fusión.

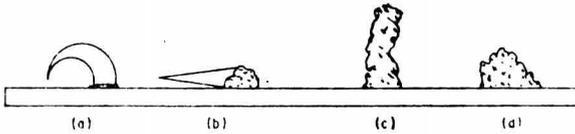


FIG. 25: Comportamiento de los conos de ensayo durante el calentamiento.

todos de fabricación pueden mejorarse, para conseguir un producto de calidad superior.

RESISTENCIA A LA COMPRESION

Las resistencias a la carga por parte de los refractarios, se miden casi invariablemente con una muestra en compresión, que se calienta a un régimen determinado, y la determinación de la magnitud de la deformación al final del ensayo. Se ensayan dos ladrillos standard comprimiendo sus extremos. No es un ensayo a temperatura constante, excepto durante la última hora y media, en la que únicamente se intenta aumentar la temperatura del centro del ladrillo, hasta la temperatura de la superficie. La medida de la deformación se toma del movimiento de las vigas, que evidentemente depende del movimiento de los puntos de sostén, de la estructura y de la mampostería.

No da información adecuada para las necesidades del diseñador en el sentido de que permita predecir comportamientos.

En Europa, el ensayo de comportamiento frente a la carga, se lleva a cabo generalmente con modelos más pequeños. Se prefiere este método porque la temperatura puede hacerse más uniforme en todo el modelo y el horno puede ser así de menor tamaño y más fácilmente controlable.

Por otro lado, una estructura tan pequeña tiene la desventaja de que no puede ser plenamente representativa del comportamiento de los ladrillos de grano grueso, y además hay que tener en cuenta el factor de que la longitud de las muestras es tan pequeña, que la precisión en la determinación de la elongación es bastante limitada, cosa que no ocurriría con muestras de superior magnitud. Sin embargo, hay ciertas ventajas con cada tipo de muestra; teniendo especial cuidado en llevar a cabo las experiencias correctamente, cualquiera de ellos podrá dar resultados dignos de crédito.

RESISTENCIA A LAS ESCORIAS Y VIDRIOS

En general, la acción de la escoria puede dividirse en efectos químicos y efectos físicos.

Efectos químicos. - Condiciones de equilibrio. - Es muy importante hacer una distinción entre las condiciones de equilibrio y la velocidad de reacción. Por ejemplo, si una mezcla de magnesia y sílice, se mantiene a una temperatura definida, después de un cierto tiempo se habrá convertido en silicato magnésico con un punto de fusión relativamente bajo. Cuando la conversión sea tan completa, como lo permita la proporción de sustancias, se alcanza el equilibrio y a aquella temperatura no ocurrirá ningún cambio más. Si la temperatura es baja, la reacción progresará con extraordinaria lentitud; pero, por otra parte, si la tempera-

tura es alta, la reacción tendrá lugar rápidamente; sin embargo, en cada caso, se alcanzará un estado de equilibrio. Será aconsejable primero investigar las condiciones de equilibrio, para las combinaciones de varias escorias y refractarios, ya que si las condiciones de equilibrio no producen un material fusible a temperatura inferior, a la que se mantiene el refractario, puede que no tenga lugar una reacción seria con la escoria. En tal caso, la velocidad de reacción no nos importará. Sin embargo, en general, la escoria o el material producido por la reacción de la escoria con el refractario, funde a una temperatura inferior a la que se mantiene el — horno.

Puede afirmarse en general, que la reacción de la escoria depende de la formación de un compuesto o mezcla de bajo punto de fusión.

Generalmente, el análisis de una escoria está constituida principalmente de SiO_2 y de otros elementos como Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , etc.

Velocidad de reacción. - El segundo factor que influye en las reacciones que tienen lugar con escorias es la velocidad con que se desarrollan. Supongamos que un refractario se baña con una escoria que es capaz de combinarse con el refractario, para formar un compuesto de bajo punto de fusión. Si la reacción tiene lugar rápidamente, estos compuestos de bajo punto de fusión se formarán en grandes cantidades y se deslizarán por la cara de la pared, con lo cual dejarán nuevas superficies expuestas, que serán susceptibles de ser atacadas de nuevo por la escoria; por lo tanto, la resistencia a la escoria por parte del refractario será pobre. Por otra parte, supongamos que se forman los mismos compuestos de bajo punto de fusión, pero con poca velocidad de reacción. Entonces los compuestos se formarán en pequeñas cantidades, y la resistencia del refractario a la escoria puede ser buena. Esta es la razón por la cual, la idea de que los refractarios básicos deben utilizarse frente a escorias básicas y los refractarios ácidos frente a escorias ácidas, no es totalmente verdadera. A pesar de que las cualidades ácidas y básicas determinan los productos de formación, no determinan necesariamente las velocidades de reacción.

La velocidad de reacción viene muy influida por la temperatura. En muchos casos, un aumento de 10°C doblará la velocidad de reacción. Esta es la razón principal por la que ciertos refractarios resistirán muy bien la escoria a temperaturas normales de trabajo, pero se corroerán rápidamente si la temperatura del horno se aumenta en 50°C .

Efectos físicos. - Velocidad de flujo. - Ya que la velocidad de reacción depende de la concentración del material de escoria en la superficie del refractario, es evidente que cuanto más rápidamente se mueva -

la escoria líquida por la superficie del refractario, con más rapidez habrá una renovación de escoria en la superficie del mismo.

Se sabe perfectamente que un líquido, puede fluir de dos modos diferentes. El primero es por flujo laminar, cuando la dirección del flujo es paralela a la superficie sobre la cual está fluyendo; y el segundo es por flujo turbulento, cuando las partículas del líquido están sufriendo movimiento en todas direcciones. La transición de flujo laminar a flujo turbulento depende del tamaño, velocidad y viscosidad de la sustancia fundida. Es evidente que el flujo turbulento es mucho más efectivo para proporcionar escoria nueva a la superficie que el flujo laminar; por lo tanto, es conveniente mantener una velocidad de flujo lenta y una viscosidad alta, ya que la viscosidad depende de la temperatura, tenemos otra razón por la cual altas temperaturas promueven una acción más rápida de las escorias.

Difusión a través de la sustancia fundida. - Se ha demostrado que se establece una zona de reacción entre el refractario sólido y la escoria fluida. Esta zona tiene pocos milímetros de espesor en todos los casos, pero se vuelve más delgada cuando la velocidad de flujo de la escoria aumenta.

La velocidad de corrosión se puede disminuir por:

- 1.- Disminución de la velocidad de flujo de la escoria, aumentando así el espesor de la capa límite.
- 2.- Disminución de la temperatura, aumentando así la viscosidad que disminuirá la velocidad de difusión.
- 3.- Reducción de la superficie activa, eliminando las rugosidades.

Penetración de la escoria. - Si el refractario es un material denso, esta superficie será uniforme, pero, por otra parte, si el refractario es poroso, la superficie puede engrosar considerablemente, debido a la penetración de la escoria en los poros. Por lo tanto, el ladrillo con porosidades altas presenta mayores velocidades de corrosión que el ladrillo que presenta menos porosidades o si es más denso.

Dilatación y contracción. - Hay una serie de razones por las cuales los cambios de volumen de los refractarios, al calentarse, son de interés.

En primer lugar, se necesita un conocimiento de las expansiones y contracciones reversibles para diseñar juntas de expansión adecuadas, y también para predecir la resistencia al desmenuamiento. En segundo lugar, los cambios irreversibles dan una buena idea de la temperatura máxima a la cual el refractario puede ser utilizado. La curva de expansión puede utilizarse también para detectar inversiones cristalinas reversibles, como las que se hallan, por ejemplo, en la sílice.

Los ladrillos pueden mostrar o bien una dilatación, o bien una contracción, cuando se calientan hasta la temperatura de funcionamiento. En general, los ladrillos no se cuecen a una temperatura tan elevada en el proceso de fabricación como alta es la temperatura de trabajo; consecuentemente, con el tipo de arcilla normal, el ladrillo disminuirá en volumen a las temperaturas de trabajo. Esto no es conveniente, sobre todo en bóvedas y arcos, porque las juntas abiertas que resultan constituyen una fuente de esquinas y rebordes que pueden ser el inicio del desconchado y de erosión por parte de la escoria. Las roturas abiertas concentran, en el caso de un arco, la carga sobre un área relativamente pequeña del bloque, lo que disminuye sobremanera la estabilidad de la estructura. Una ligera expansión no es particularmente perjudicial en la pared o el arco, si se han diseñado adecuadamente.

Teoría de la dilatación secundaria. - Hay tres fenómenos que pueden producir un aumento de volumen de los objetos sometidos a la prueba de recalentado y son:

- 1.- Sobre calentamiento, o sea que desarrolle una estructura vesicular o hinchazón permanente.
- 2.- Abertura de las estratificaciones de la arcilla.
- 3.- Transformaciones o reacciones entre las fases cristalinas durante la cocción, dando productos de densidad verdadera, inferior a la de los reactivos. En general, estos fenómenos tienen lugar en ciertos márgenes de temperatura definidos. Cuando la temperatura a la que el ladrillo se cuece por primera vez, está por debajo de este margen, el ladrillo puede dilatarse si está sometido a una temperatura de recalentado en el margen de expansión. Cuando la temperatura inicial de cocción está en el margen de dilatación, la pieza de barro puede contraerse, expandirse o mantener constante su volumen en la prueba de recalentado, dependiendo del tiempo y de la atmósfera de cocción.

El No. 2 puede ser debido a un aumento global de volumen, debido a la aparición de laminaciones naturales o planos de orientación en los granos de arcilla. Para disminuir o anular la tendencia de las arcillas a dilatarse se han sugerido métodos como la pulverización, mezcla de arcillas que se dilatan y contraen, - cocción lenta, atmósfera oxidante y alta presión de formación. Esta dilatación secundaria es característica de muchos depósitos arcillosos. La dilatación secundaria de los ladrillos de arcilla refractaria se debe sin duda - alguna, a la aparición de laminaciones en los granos de arcilla.

Porosidad aparente. - La porosidad aparente expresa, como un porcentaje, el cociente que resulta de dividir los poros permeables de una muestra, entre el volumen exterior de dicha muestra; esta propiedad física de los materiales refractarios, podemos decir que depende de los siguientes factores: presión que se utiliza

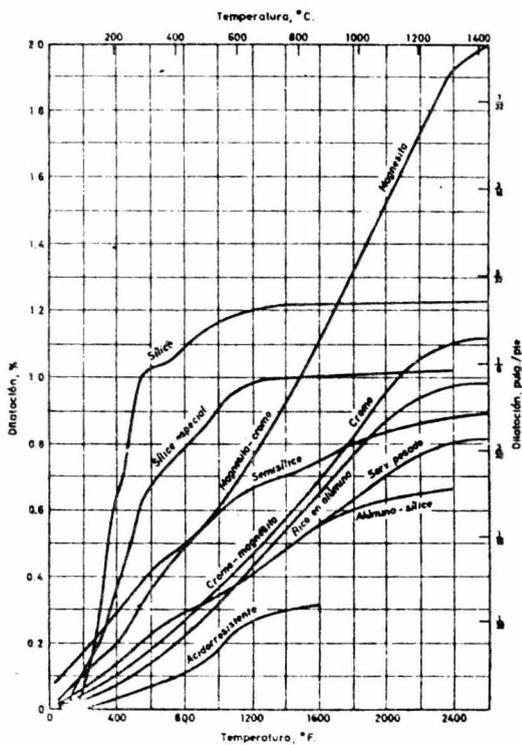


Fig. 26 Dilatación térmica lineal de refractarios. (General Refractories Company.)

al prensar, granulometría de las materias primas utilizadas, mezclado de las mismas y temperatura de quemado, si es que el producto pertenece a la variedad de quemado. Con respecto al primer factor, o sea, presión a que se prensa el material, es obvia su influencia en la porosidad del material, aun cuando dicha influencia tiene sus límites máximos, pues pueden introducirse algunos defectos en el ladrillo, al abusar de la prensa; la granulometría del material es un factor pudiéramos decir, controlador de la mejor distribución de la porosidad en un ladrillo, es decir, podemos tener, en un momento dado, igual por ciento de porosidad en dos materiales distintos, pero en uno, tener poros más grandes que en el otro y desde luego, algunas ocasiones convendrá el primer caso y en otros el segundo, según el uso específico a que se piense destinar el ladrillo, el poro grande que generalmente se logra con granulometría más gruesa en las materias primas, indudablemente ayuda mucho al ladrillo para resistir el choque térmico, o sea cambios bruscos de temperatura, en cambio, la granulometría fina, que nos conduce a porosidad constituida por poros relativamente más pequeños, ayuda mucho a detener los ataques químicos y las penetraciones de sustancias fundidas o semifundidas en el seno mismo del ladrillo.

Despostillamiento térmico. - Podríamos definir como despostillamiento térmico, la pérdida de fragmentos de la cara expuesta de un refractario, debido a grietas y roturas originadas por cambios bruscos de temperatura. La determinación de esta prueba se efectúa calentando un panel del material bajo prueba, hasta una temperatura determinada y enseguida provocando un enfriamiento mediante agua atomizada con aire, durante cierto tiempo; lo anterior se efectúa por un número de ciclos determinado y finalmente se permite el enfriamiento natural de los especímenes; el reporte de esta prueba será dado en por ciento de pérdida en peso de los ladrillos, originados por la separación de fragmentos de material. Este tipo de despostillamiento es causado por los esfuerzos resultantes de un desigual crecimiento o encogimiento de las diferentes partes de un ladrillo, que provocan la aparición de esfuerzos internos entre capas de diferentes temperaturas; estos esfuerzos pueden llegar a ser de tal magnitud, que agrietan el ladrillo y provocan la formación de fragmentos que constituyen el despostillamiento térmico. Podemos deducir pues, que un ladrillo refractario será resistente al choque térmico, cuando posea expansión térmica, cuando ésta sea uniforme y cuando posea una granulometría tal, que introduzca flexibilidad al ladrillo y lo alivie de esfuerzos, cuando estos aparezcan, una expansión térmica mínima redundando en estabilidad lineal o volumétrica del ladrillo anulando pues, la causa principal del despostillamiento térmico; por otra parte un ladrillo con uniformidad en su expansión térmica a través de un rango de temperatura, será más resistente al choque térmico que otro que posea igual expansión térmica, pero irregular o brusca

a través del mismo rango. Con respecto a la granulometría de la materia prima, podemos decir que es la forma más común utilizada para producir materiales más resistentes al choque térmico, dentro de un mismo tipo o calidad; utilizando una cierta proporción de grano grueso dentro de la granulometría de la materia prima, se controla eficazmente el despostillamiento por choque térmico, pues el grano grueso origina que la porosidad del ladrillo esté constituida por poros más grandes, los cuales se encargarán de absorber los movimientos internos de los constituyentes.

El tamaño de las piezas fabricadas también tiene influencia en la resistencia al choque térmico, siendo mayor éste cuando las piezas sean de menor tamaño; en los materiales básicos ligados químicamente, es común utilizar placas internas de acero para dividir las piezas refractarias en 2 ó 3 porciones, con la finalidad de aumentar la resistencia al despostillamiento térmico de las mismas.

ATAQUES QUÍMICOS QUE PUEDEN CAUSAR FALLAS SEVERAS

El ataque químico puede causar fallas severas, y debe ser considerado cuando se selecciona un refractario. Debido a que las condiciones variarán tan grandemente de una pieza del equipo a otra, sólo generalizaciones pueden ser hechas acerca de la estabilidad relativa de materiales aplicables a los refractarios.

Son muchos los factores que ejercen influencia a la resistencia del refractario a los ataques químicos, tales como la naturaleza química de los dos materiales de reacción, si el químico es sólido, líquido o gaseoso, temperatura, presión, porosidad, viscosidad de escoria y concentración.

En general, los ácidos causan ataques a los refractarios básicos, el más reactivo será el ataque alcalino.

La sílice, arcilla refractaria, carburo de silicio y zirconio, son generalmente considerados ácidos; alta alumina, zirconia y grafito son casi neutros; la magnesita y el cromo y mezclas de estos, son considerados básicos.

Críticamente, la temperatura controla el rango de reacción de una sustancia con un refractario. En la mayoría de los procesos químicos, el rango se incrementa con la temperatura más alta. Para aquellas reacciones que dependen de un rango de temperatura limitada, un ligero incremento en el proceso de temperatura puede cambiar drásticamente la vida de un refractario. Debido a las reacciones químicas que pueden tener lugar dentro del refractario por sí mismo; el forro de aislamiento para conservar el calor puede levantar la temperatura e incrementar el rango de la reacción en el refractario. Levantando la presión se hará lo mismo para incrementar simplemente la concentración de los reactantes en los gases.

Otros factores que pueden influenciar en la rapidez de la reaccion es el rango de los cuales los reactivos son puestos en contacto con el refractario, y el rango a la que los productos de la reaccion son secados. La profundidad, de penetracion y, por lo tanto, la resistencia al ataque quimico, depende de la permeabilidad y porosidad del refractario. Un refractario que no es permeable, ni poroso, reaccionará en proporción baja, in diferente del ataque quimico que lo esté causando.

Mientras que la mayoría de los refractarios ofrecen resistencia al ataque quimico en ciertos rangos, - otras composiciones pueden ofrecer superior estabilidad. Si el ataque quimico es un problema, o si el cambio de proceso es planeado, un estudio debería ser hecho de la relativa estabilidad quimica de los diferentes materiales. Mientras que muchos factores afectan el ataque quimico, algunas generalizaciones acerca de la resis tencia de los refractarios a varios procesos de materiales, se dan en la Tabla III.

La fuerza y resistencia de abrasión, a menudo son requeridos de los refractarios.

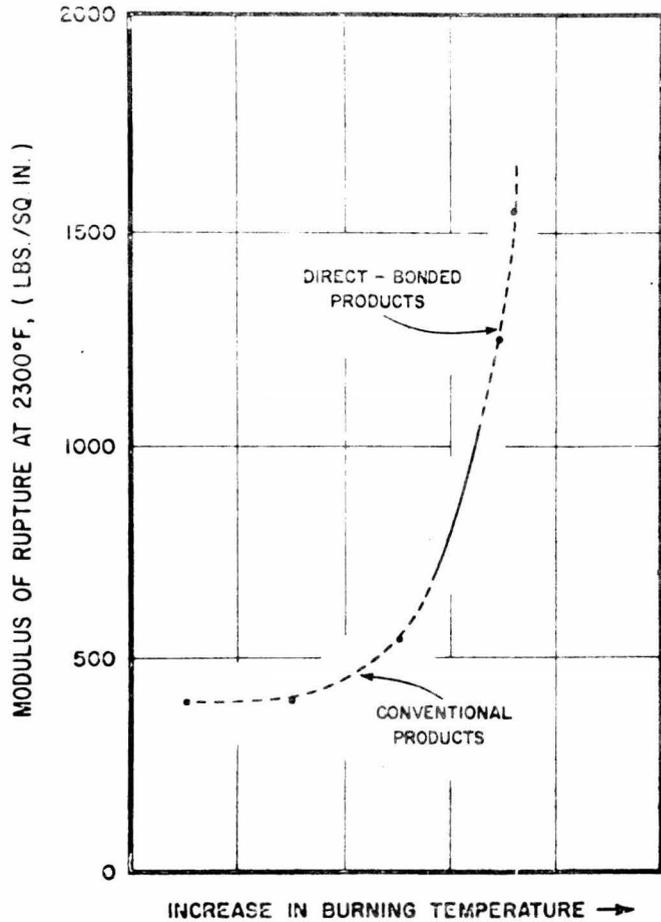
Como una regla general, la resistencia de un refractario a la abrasión e impacto será proporcional a su fuerza. El desgaste causado por partículas finamente divididas o líquidas, se resiste mejor con un producto que tenga una fuerte ligadura, tal como el ladrillo cocido.

Algunos refractarios son diseñados principalmente, para resistir la abrasión. Para temperaturas moderadas, en especial el ladrillo de arcilla refractaria, hecho de un cocido denso, que resisten bien la abrasión en el punto de fusión bajo. Los carburos de silicio extreman la flexibilidad y dureza, ofreciendo la ventaja que casi no sobrepasan la resistencia de abrasión, de baja a muy altas temperaturas.

TABLA III

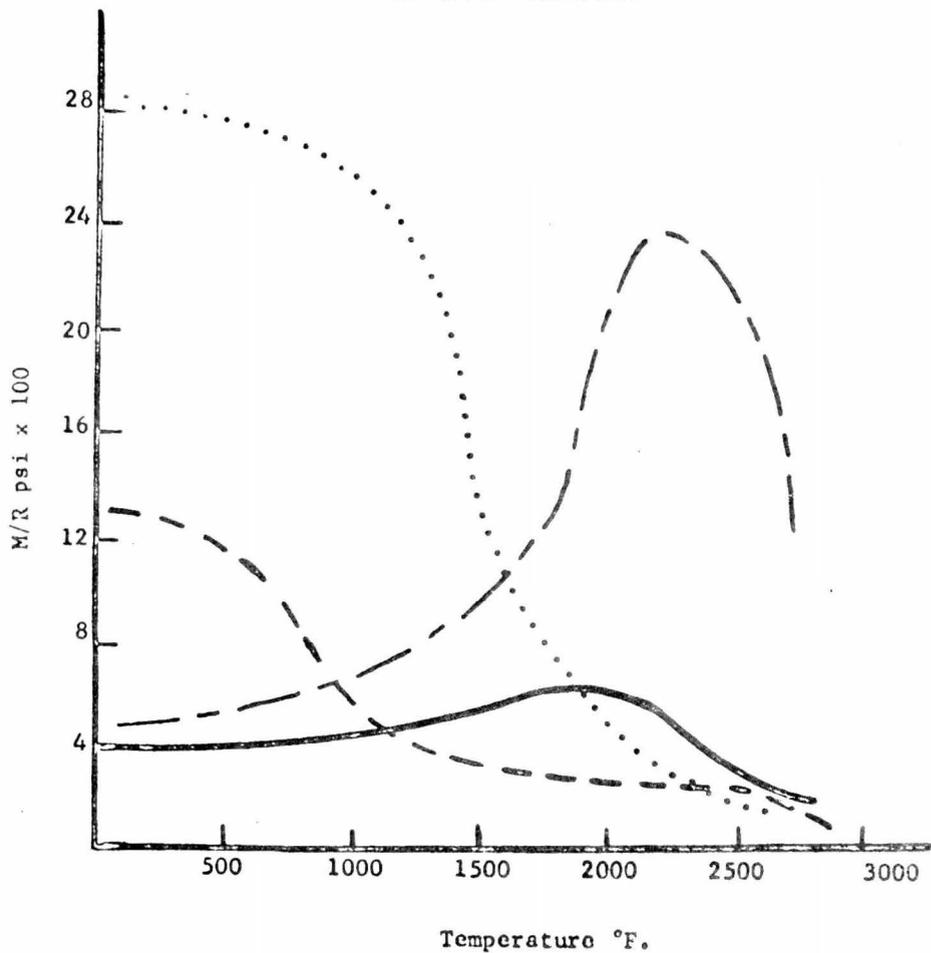
RESISTENCIA DE LOS REFRACTARIOS A UNA VARIEDAD DE LOS MATERIALES EN PROCESO

CONDICION DE SERVICIO	ESTABILIDAD QUIMICA DE VARIOS MATERIALES
Atmósfera oxidante	Todo óxido y combinaciones de óxidos (silicatos, arcilla refractaria) son inafectables; el carbón y el grafito serán oxidados; el carburo de silicio es claramente estable a 1650°C.
Vapor o vapor de agua	Esto puede ser causado por la hidratación de los refractarios de magnesita a bajas temperaturas y serán oxidados el carbón y grafito a una temperatura de 705°C.
Hidrógeno	Silice y refractarios que contienen silice (arcilla refractaria, SiC, zircón, mulita, etc.), son atacados a una temperatura de 1095°C. Los refractarios de alta alúmina, ZrO ₂ , MgO y aluminato de calcio, muestran buena resistencia.
Sulfuro y sulfatos	El sulfuro reacciona con refractarios que contienen silice a una temperatura de 870°C. El carbón y los óxidos de alta pureza, muestran buena resistencia. Los sulfatos reaccionarán en mayor rango con la mayoría de los refractarios.
Atmósfera reductora	La mayoría de los refractarios son estables, sin embargo, las impurezas - como óxidos de hierro, cuando se reducen, pueden causar destrucción, particularmente si presenta poros.
Monóxido de carbono	Las impurezas del fierro pueden actuar como un catalizador, a causa de la deposición del carbón en refractarios de arcilla. El CO puede oxidar al grafito y al SiC, causando destrucción en los refractarios básicos.
Cloro y fluor	El Cloro puede atacar los silicatos a una temperatura de 650°C. El fluor atacará todos los refractarios, exceptuando al grafito. Los refractarios básicos tienen resistencia pobre a ambos elementos.
Acidos	Los refractarios básicos tienen pobre resistencia. Las arcillas refractarias y de alta alúmina tienen buena resistencia, excepto para HF, zircón, zirconia y CSi tienen buena resistencia. El carbón y el grafito no reaccionan.
Alcalis	Las arcillas refractarias y de alta alúmina, son buenas a bajas temperaturas, los refractarios de magnesita son parcialmente buenos, el cromo pobre y el grafito excelente.



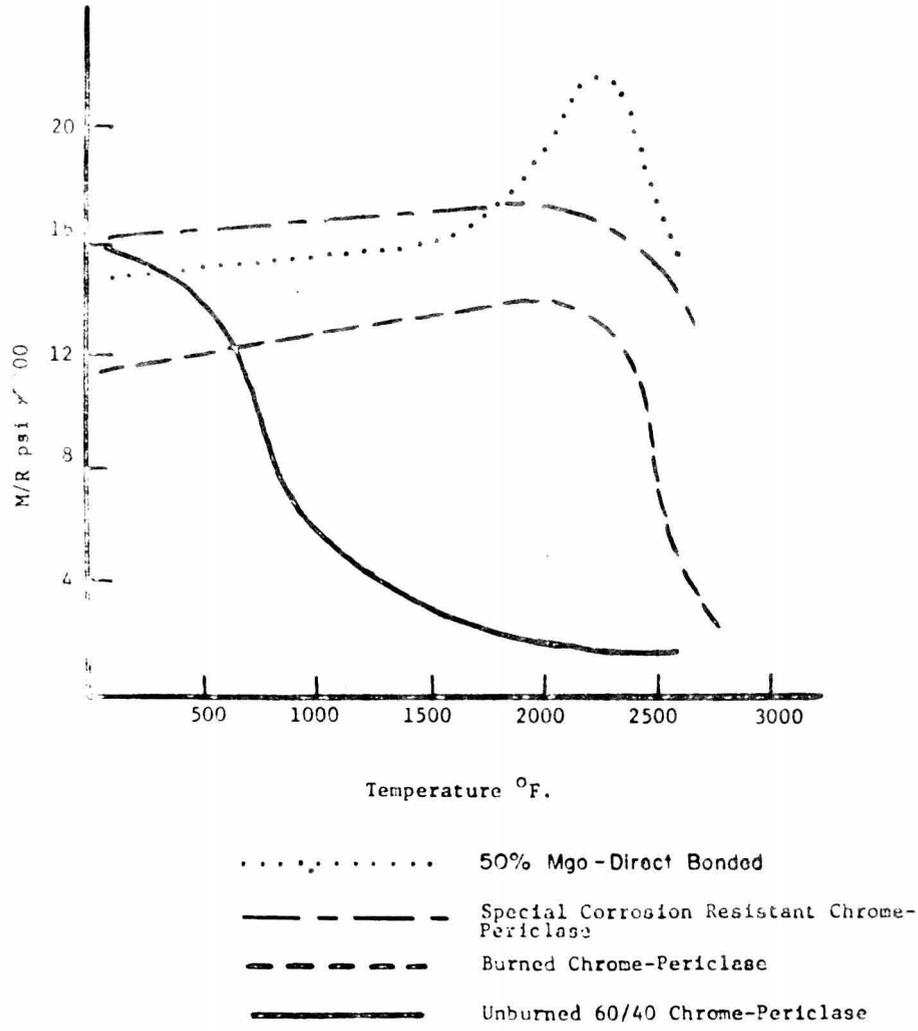
HOT STRENGTH VS.
BURNING TEMPERATURE
IN PERICLASE-CHROME
PRODUCTS

HOT STRENGTH OF VARIOUS BASIC BRICK

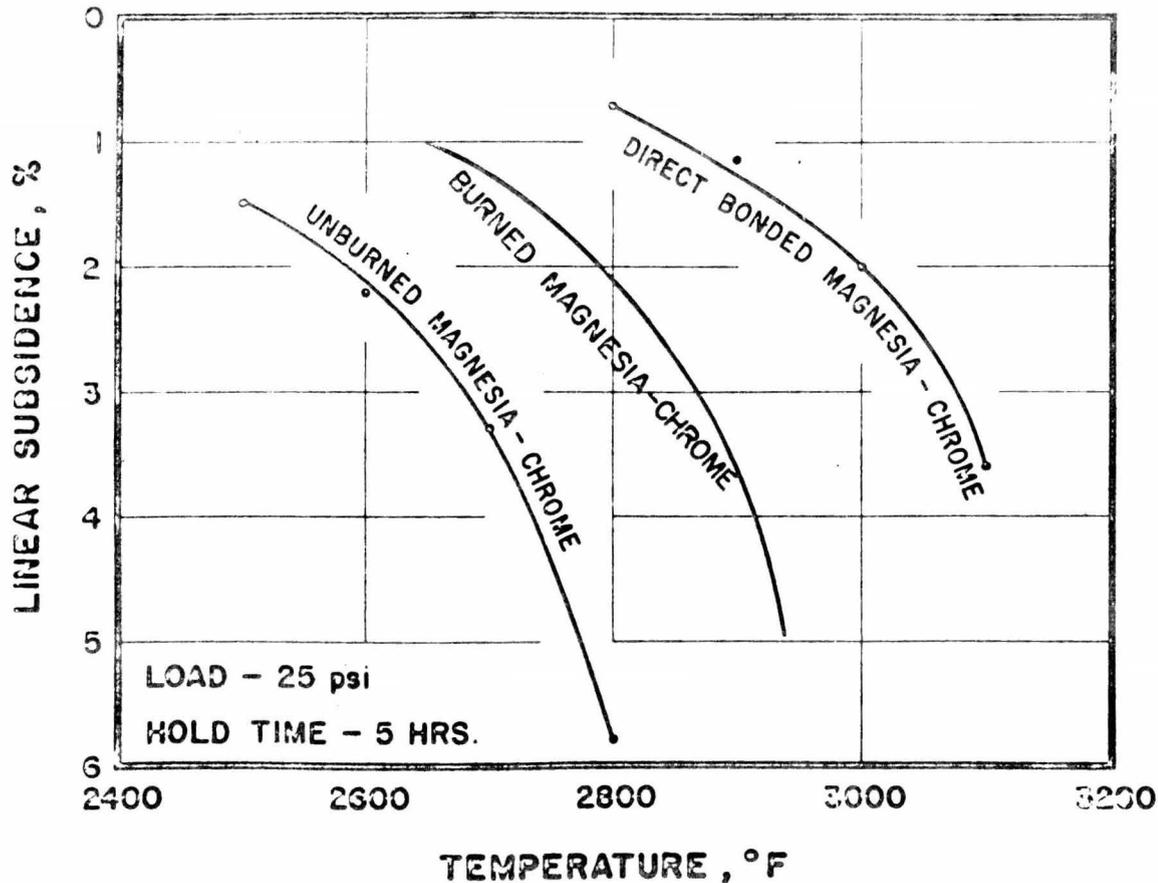


- Conventional Periclase
- — — — — 60% + MgO Direct-Bonded
- - - - - Unburned Periclase-Chrome
- Burned Periclase Chrome -
Conventional

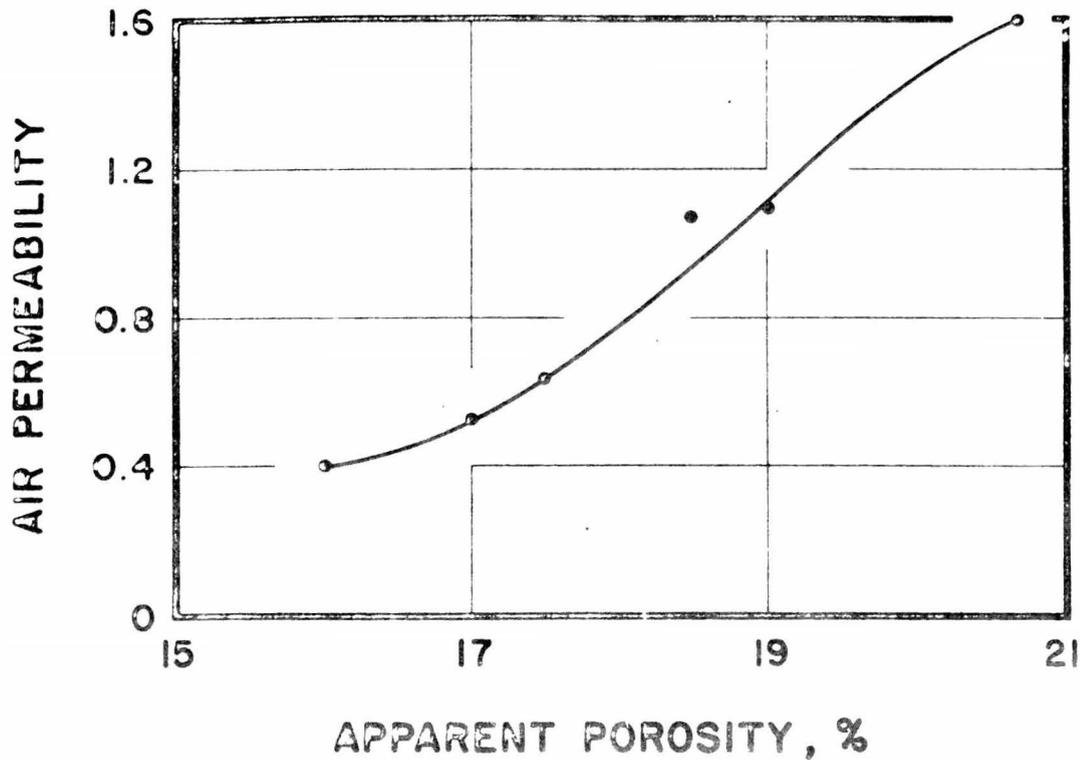
HOT STRENGTH OF VARIOUS BASIC BRICK

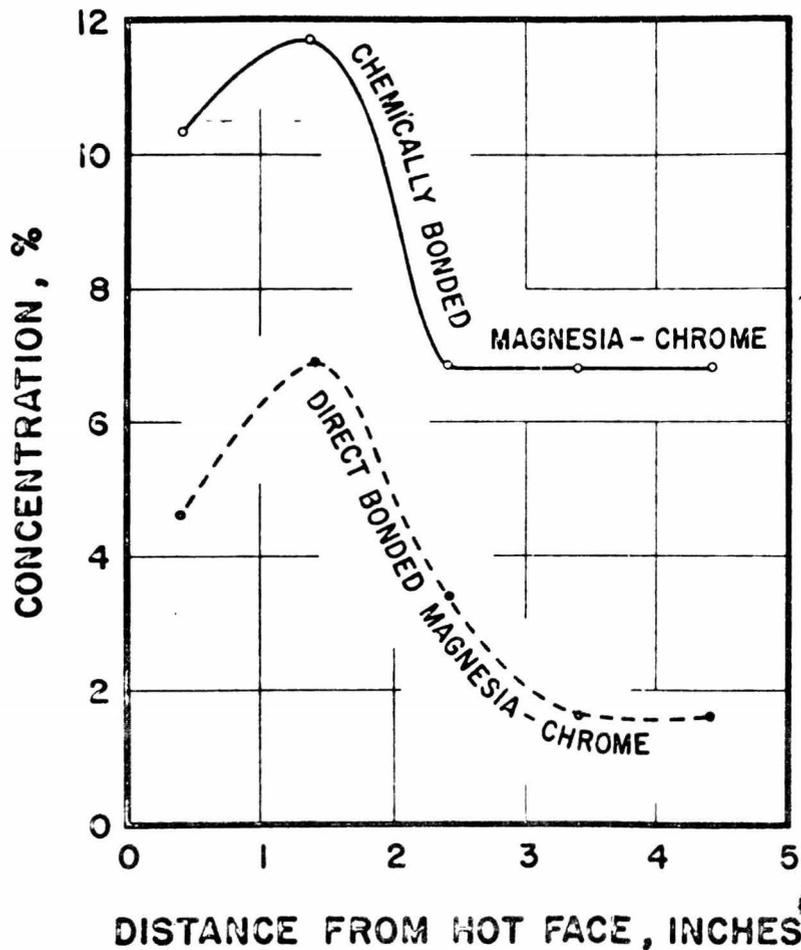


LOAD TEST OF BASIC ROOF BRICK AT VARIOUS TEMPERATURES



APPARENT POROSITY VS PERMEABILITY DIRECT BONDED PERICLASE-CHROME BRICK

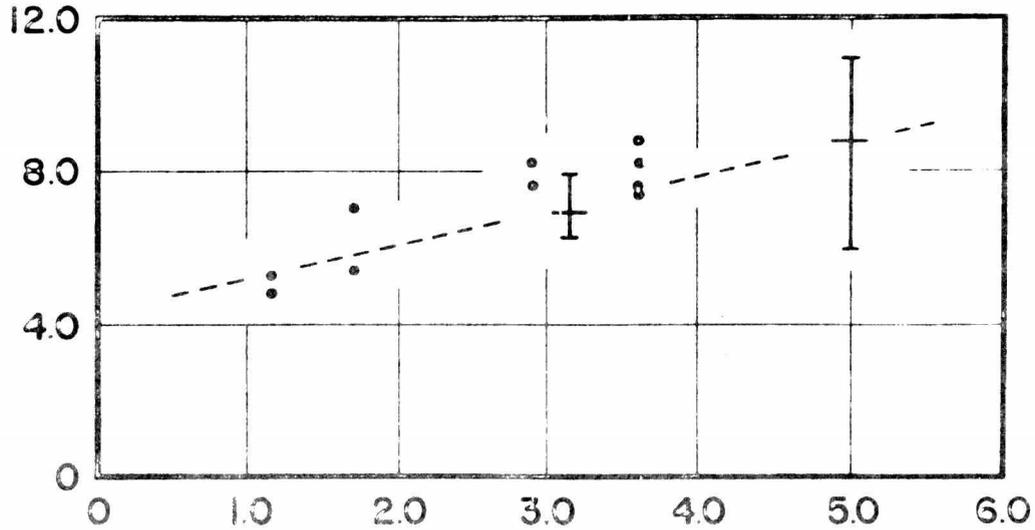




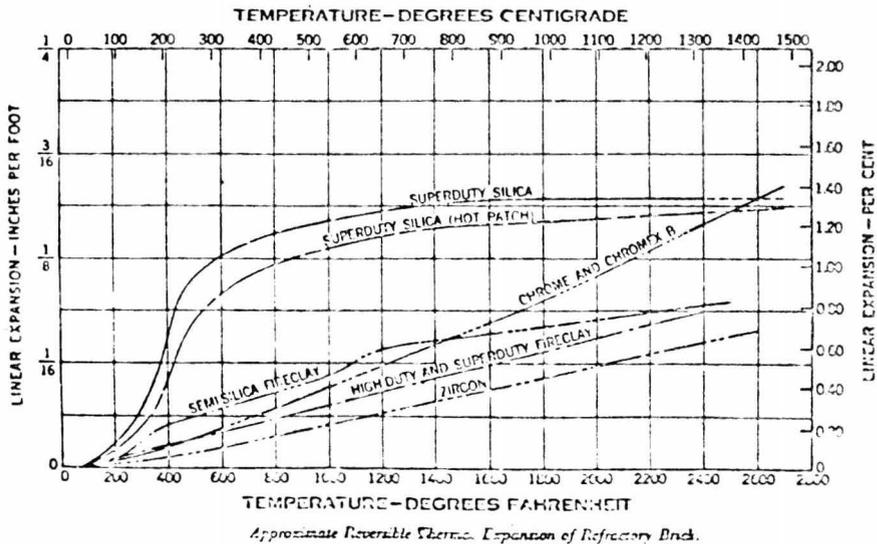
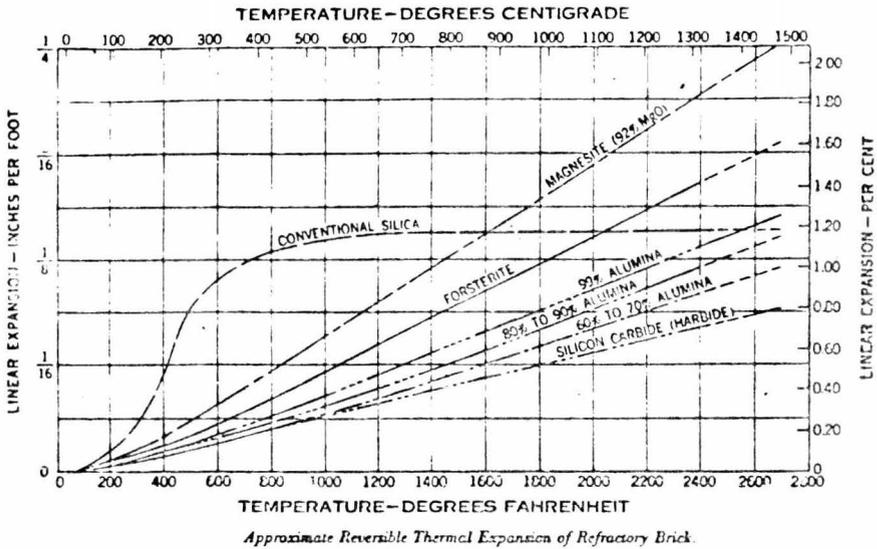
DISTRIBUTION
OF LIME PLUS
SILICA IN SLAGGED
PERICLASE-CHROME
BRICK

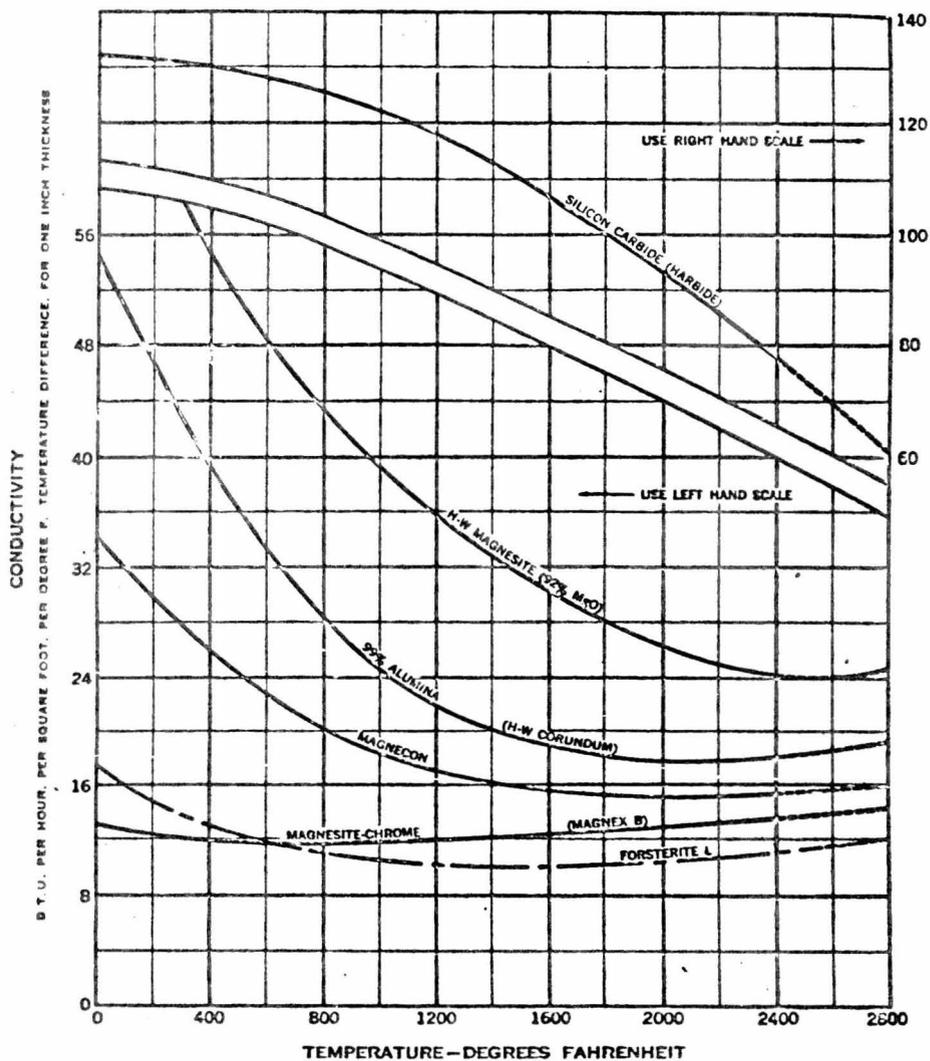
SILICA CONTENT OF
PERICLASE-CHROME BRICK
BEFORE AND AFTER USE

SILICA IN DENSIFIED ZONE, %



ORIGINAL SILICA IN UNUSED BRICK, %





Approximate Thermal Conductivities of Various Refractory Brick.



UNION

CAPITULO 5

TIPOS DE REFRACTARIOS DISPONIBLES

TIPOS DE REFRACTARIOS DISPONIBLES EN LA ACTUALIDAD

TIPO DE LADRILLO	C L A S E
Arcilla	Calidad superior, Alta calidad, Calidad intermedia, Baja calidad, Semi-sflica, Acidos resistentes.
Alta Alúmina	50, 60, 70, 80, 85 y 90% de Al_2O_3 ; Mulita, Corundum (99 - % Al_2O_3).
Sflice	Calidad superior, regular; resistentes al choque térmico en ambas clases.
Básicos	Magnesita, Alta pureza, (93%MgO y más alta, como la periclasa); Magnesita, regular (87-93% MgO); cromo, cromo-magnesita, magnesita-cromo forstenta, magnesita unidas con alquitrán y Magnesita-dolomita unidos con alquitrán.
Aislantes	870, 1090, 1260, 1540, 1650 y 1815°C; aislantes de sflice, aislantes de magnesita; ladrillos especiales para usos específicos.
Otros	Carburo de silicio, carbón, grafito, circón, óxido de circonio, — electrofundidos de varias composiciones.
Concretos	Arcilla, Alta alúmina, cromo, cromo-magnesita, magnesita, carburo de silicio.
Concretos Aislantes	Arcilla, sflica, agregados ligeros.
Plásticos	Arcilla, arcilla-grafito, alta alúmina, alta alúmina-grafito, mulita y cromo.
Aplisables	Arcilla, alta alúmina, magnesita-cromo, carburo de silicio, circón, sflica, forsterita.
Mezclas para aplicar con pistola neumática	Arcilla, alta alúmina, sflica, cromo, magnesita
Materiales granulados	Arcilla calcinada, cuarcitas, alta alúmina, magnesita calcinada a muerte, dolomita calcinada a muerte, agregados ligeros, cromita.
Morteros	Se fabrican de casi todos los materiales base.

LADRILLOS DE CALIDAD SUPERIOR

Contienen de 40 a 44% de alúmina y son los más refractarios entre los ladrillos de arcilla. Los ladrillos de calidad superior tienen un cono pirométrico equivalente de 33 mínimo, que corresponde a una temperatura de ablandamiento de 1745°C.

La mayoría de los ladrillos de calidad superior se hacen por el método de prensado en seco. Algunas piezas hechas por el método de apisonado con martillo neumático tienen propiedades semejantes a las prensadas en seco, principalmente en lo que se refiere a su resistencia a la disgregación y otras propiedades físicas.

Algunos ladrillos de calidad superior quemados a temperatura normal, tienen una resistencia extraordinaria a la disgregación, otros son más densos y más resistentes a la escoria, gases, abrasión y carga.

Algunos de los ladrillos de calidad superior se queman a temperaturas de 70 a 150°C, arriba de la temperatura normal de quemado. Este alto quemado aumenta su resistencia mecánica y su estabilidad de volumen y aumenta su resistencia a la abrasión. El alto quemado hace también que las partículas de óxido de hierro presentes se cambien por reacción y se combinen con la sílice y alúmina y se pierda su propiedad de catalizador y ocasione el rompimiento del monóxido de carbono en dióxido de carbono y carbón. Por consecuencia, los ladrillos de calidad superior alto quemado se hacen prácticamente inmunes a la desintegración por depósitos de carbón en atmósferas ricas en monóxido de carbono.

LADRILLOS DE ALTA CALIDAD

Tienen un cono pirométrico equivalente, no menor de 31 1/2, que corresponde a una temperatura de ablandamiento de 1700°C. Los ladrillos de alta calidad, así como los de calidad superior, están hechos de tal manera, que soporten condiciones generales; también en muchas ocasiones son especialmente buenos para soportar la disgregación; y otras que son más resistentes a las escorias, a la abrasión o a la presión mecánica.

Los ladrillos de alta calidad, se usan en cantidades mayores en un rango más amplio de aplicaciones, que cualquier otro tipo de refractario. Se pueden emplear con economía en lugares donde la temperatura es ligeramente menor de aquellos en que se requiere ladrillo de calidad superior. Así también en hornos donde la temperatura es moderada por economía, se pueden usar ladrillos de alta calidad. Por ejemplo, debido a su mayor resistencia al choque térmico, los ladrillos de alta calidad se pueden usar por economía en lugar de ladrillo de baja calidad, para aquellos revestimientos de hornos que trabajan a temperaturas moderadas, pero que trabajan intermitentemente. También se pueden emplear donde hay bajas temperaturas, pero que también hay humos corrosivos. Mas aun el costo de colocado o sentado y los fletes son los mismos que para aquellos

ladrillos de más baja refractibilidad,

LADRILLOS DE CALIDAD INTERMEDIA

Tienen un cono pirométrico equivalente a menos de 29, que corresponde a una temperatura de ablandamiento de 1660°C. Los ladrillos de calidad intermedia se usan en lugares donde se requiere un servicio de condiciones moderadas. Dentro de las temperaturas de servicio de estos ladrillos, algunos soportan mejor la abrasión que muchos de los de alta calidad.

Para los ladrillos de baja calidad, se requiere que el cono pirométrico equivalente no menor de 15, que corresponde a la temperatura de ablandamiento de 1430°C. Las principales aplicaciones para un ladrillo de baja calidad, son para hacer los revestimientos posteriores atrás de los ladrillos de mejor calidad. Sin embargo, los ladrillos de baja calidad también se usan donde existen temperaturas moderadas.

LADRILLOS SEMI-SILICA

Son ladrillos que tienen un contenido de SiO_2 entre 72 y 80%, y con un bajo contenido en óxidos alcalinos, así como de otras impurezas, los cuales se clasifican como ladrillos semi-silica. Tienen una excelente estabilidad de volumen a temperaturas relativamente altas, poco encogimiento y gran resistencia a la deformación bajo carga. Dentro de sus límites de temperatura de servicio, tienen una gran resistencia a la vitrificación, a la disgregación estructural y a la penetración por escorias y humos alcalinos. Cuando están en servicio, forman una capa superficial que retarda la penetración y corrosión por fundentes y reduce la desintegración estructural.

LADRILLOS ACIDO RESISTENTES

La mayoría se fabrican de arcillas que queman densamente y que tienen una refractibilidad moderada. Se emplean en los revestimientos de tanques de ácido, torres y en otro equipo químico, así como también en pisos de planta de ácidos.

Las principales propiedades de estos ladrillos son: alta densidad y alta resistencia a la acción destructiva de ácidos (líquidos y gases). El ladrillo tiene que ser no absorbente y resistente a la penetración de ácidos y otros agentes químicos destructores. Algunos ladrillos ácido resistentes se emplean también como refractarios, debido a su alta resistencia a la abrasión de temperaturas.

LADRILLOS DE ALTA ALUMINA

Los refractarios sílico-aluminosos que contienen más de 45% de alúmina, se conocen como refractarios de "Alta Alúmina". Varias clases de refractarios de alta alúmina se fabrican, entre los cuales tenemos

los que tienen contenidos de aproximadamente 50, 60, 70, 80 y 90 de alúmina. También hay ladrillos especiales de alta alúmina con contenidos de alúmina intermedios; además los ladrillos de mulita (60 a 78% de alúmina; y de corundum (99 - % de alúmina). Para los ladrillos de 50 a 90% de alúmina hay una tolerancia en el contenido de alúmina de más o menos 5%. La mayoría de los ladrillos de alta alúmina se hacen por método de prensado en seco.

Los diferentes tipos o clases de refractarios de alta alúmina ofrecen ventajas de ir cubriendo gradualmente refractibilidades superiores, cubriendo así, un rango de temperaturas de ablandamiento de aproximadamente 200°C. Son refractarios de uso variado, que se les puede emplear hasta una temperatura de servicio de aproximadamente 1892°C.

Los ladrillos de alta alúmina son muy resistentes al ataque químico de varias escorias y gases, y en general, tienen mayor resistencia a la presión que los ladrillos de arcilla. Algunas calidades tienen bastante resistencia al choque térmico.

Los refractarios de mulita, como su nombre lo indica, son fabricados a base de mineral de mulita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) de forma cristalina. Este mineral en forma pura tiene un contenido de alúmina de 71.8%. Los refractarios de mulita se hacían inicialmente de silimanita o de cianita; ahora generalmente se hacen con mulita sintética.

El contenido de alúmina de los ladrillos de mulita está en el rango de 60-71%. Los ladrillos con adiciones de alúmina libre contienen entre 71 a 78% de alúmina. Los ladrillos de mulita se distinguen por su gran resistencia a la deformación bajo carga, estabilidad de volumen y a su resistencia a los fundentes a temperaturas elevadas. Tienen gran variedad de uso en los hornos de algunas plantas.

El nombre de "Corundum" se usa para designar aquellos refractarios que contienen 99% o más de alúmina y que generalmente están fabricados a base de mineral de corundum (alúmina cristalina). Los ladrillos de corundum tienen un punto de fusión de aproximadamente 2000°C.

TEMPERATURAS APROXIMADAS DE ABLANDAMIENTO DE LOS LADRILLOS DE ALTA ALUMINA

Clase	C.P.E. aproximado	Temperatura de ablandamiento aprox. en °C
50% Al_2O_3	35	1735
60% Al_2O_3	36 a 37	1805 a 1820
70% Al_2O_3	37 a 38	1820 a 1850
80% Al_2O_3	39*	1865
90% Al_2O_3	40 a 41*	1885 a 1970
Mulita (72% Al_2O_3)	38*	1850
Corundum (99 + % Al_2O_3)	42*	1990

* Estimadas. Es impráctico determinar los C.P.E. de ladrillos de alta alúmina arriba de 50 a 60% de Al_2O_3 .

LADRILLOS DE SILICE

La materia prima usada para la manufactura de los refractarios de sílice se conoce como cuarcita, esta consiste principalmente de mineral de cuarzo.

La cuarcita que se usa para hacer los ladrillos de sílice, debe contener como mínimo 98% de sílice (SiO_2).

La materia prima se quiebra, muele y se criba al tamaño necesario y se liga para formar los ladrillos con cal u otros agentes.

Los ladrillos se forman principalmente por el método de prensado en seco. Muchas piezas especiales se hacen por medio de la prensa de impacto; y otras necesariamente por el método de apisonado con pistola neumática. Los ladrillos se meten a secadores para quitar la humedad y después se queman, ya sea en horno de túnel o periódicos. La temperatura de quemado debe ser lo suficientemente alta para transformar el cuarzo en otras formas de sílice (cristobalita o tridimita), que son estables a temperaturas elevadas.

Dos clases de ladrillos de sílice generalmente se fabrican en grandes cantidades:

- 1.- De calidad superior que contienen de 0.2 a 0.5% total de alúmina, óxido de titanio y óxidos alcalinos (óxido de sodio, potasio y litio);
- 2.- Sílice regular, que contiene más de 0.5%, o menos de 1.0% de alúmina, óxido de titanio y óxidos alcalinos.

Relativamente pequeñas cantidades de ladrillos de sílice que contengan de 1.4 a 2.5% de alúmina, óxido de titanio y óxidos alcalinos se fabrican. Estos se emplean en usos particulares.

La manufactura de ladrillos de calidad superior, está basada en el uso de piedra muy pura de sílice generalmente lavada, en la cual el contenido de alúmina, óxido de titanio y óxidos alcalinos no pase de 0.5%. De tal piedra, los ladrillos que se hacen pueden soportar una carga de 1.76 kilos por cm^2 a 1704°C . El punto de fusión de la sílice pura es de 1723°C .

Los ladrillos de sílice son susceptibles a la disgregación si se calientan o enfrían rápidamente abajo de 650°C . Sin embargo, a temperaturas arriba de la antes indicada, tienen una gran resistencia a la disgregación.

Como resultado de recientes investigaciones, hay ladrillos de sílice tanto de calidad superior como regular, que pueden ser calentados o enfriados con seguridad, 2 ó 3 veces más rápido que el ladrillo normal. Estos ladrillos se usan generalmente para el parchado en caliente. Los ladrillos de sílice se pueden usar en las bóvedas de hornos que trabajan a temperaturas elevadas por su alta refractibilidad, su gran resistencia al ataque de polvos y humos básicos, y su alta resistencia mecánica y rigidez cuando se sujetan a esfuerzos de -

compresión, como en el caso de arcos y por su resistencia a la disgregación arriba de 650°C . Otra propiedad importante es su peso relativamente bajo y su volumen permanente arriba de 1100°C . Por su estabilidad de volumen y por su alta resistencia, aunados a sus características de conductividad térmica, hacen que sea un producto muy empleado en hornos industriales.

LADRILLOS BASICOS

Los ladrillos básicos incluyen a los productos manufacturados a base de magnesita calcinada a muerte, cromita, olivina y dolomita. Los ladrillos básicos se clasifican como: de magnesita-cromo, cromo-magnesita, forsterita, de magnesita ligada con alquitrán y de magnesita-dolomita. En los ladrillos de magnesita-cromo y cromo-magnesita, el componente que predomina se antepone al otro en el nombre.

La magnesita quemada a muerte es el componente principal de muchos ladrillos básicos y consiste principalmente en óxido de magnesio (MgO), en la forma de periclasa mineral. Su nombre continuo no importando a que la magnesita quemada a muerte se produce ahora, en su mayor parte, quemando a muerte el hidrato de magnesio precipitando el agua de mar o de salmuera. También se produce calcinando a muerte mineral natural brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$).

Las diferentes clases de ladrillo refractario básico de que podemos disponer son las siguientes:

1.- Ladrillo de magnesita

- A) Ladrillo fabricado con magnesita de alta pureza, que contiene más de 93% de MgO y su componente principal es la periclasa mineral (magnesita cristalina).
- B) Ladrillo convencional de magnesita que contiene de 87 a 93% de MgO y que también su principal componente es la periclasa.
- C) Ladrillos de liga espinel y de liga con forsterita-magnesita. Estos contienen aproximadamente 90% de MgO .

2.- Ladrillos de cromo

3.- Ladrillos de magnesita-cromo

4.- Ladrillos de cromo-magnesita. Los ladrillos de cromo magnesita y magnesita-cromo se hacen en muchas modificaciones, que se han desarrollado para usos específicos. En algunas modificaciones la resistencia a temperaturas elevadas y a la estabilidad de volumen, se han llevado a un grupo máximo. En otras su alta resistencia a la disgregación, es su característica principal.

5.- Ladrillos de forsterita. - Estos son fabricados con material de olivino con magnesita agregada. Se pueden te-

ner varias modificaciones. Sus características principales son su estabilidad de volumen y su resistencia a temperaturas elevadas.

6.- Ladrillos de magnesita ligados con alquitrán y los ladrillos de magnesita-dolomita.- Estos se usan principalmente en los procesos de convertidores de oxígeno para aceración.

La mayoría de los ladrillos básicos se hacen por el método de prensado en seco, de materias primas previamente quebradas y cribadas, generalmente con la adición de pequeñas cantidades de agentes plastificantes o de liga. Los ladrillos básicos generalmente pueden fabricarse quemados o ligados químicamente. Ahora más o menos a mitad de los que se fabrican, se hacen ligados químicamente. En general, los ladrillos quemados son superiores en lo que se refiere a su alta resistencia a temperaturas elevadas y a su estabilidad de volumen, — mientras que los ligados químicamente, son excelentes en lo que se refiere a su resistencia al choque térmico. Recientemente se han desarrollado ladrillos químicamente unidos, que combinan las propiedades anteriores.

La mayoría de los ladrillos básicos pueden forrarse con caja de acero, o bien forrarse con una caja de acero y aparte tener un inserto del mismo acero en su interior. El descubrimiento que se hizo en 1914 al hacer unos ladrillos de granos de magnesita apisonados dentro de unos tubos y que al calentar estos dentro del horno se fundían y formaban una estructura monolítica, ha ocasionado que se hagan un sin número de variaciones de ladrillo, usando este principio de forrar los ladrillos con acero. Por ahora, los ladrillos forrados con acero son principalmente los llamados magnesita-cromo químicamente unidos; sin embargo, la mayoría de los ladrillos básicos se pueden forrar con caja de acero, si el servicio así lo requiere.

Generalmente las cajas de acero cubren 3 ó 4 de las caras longitudinales, dejando el descubierto los extremos del mismo.

Los ladrillos son insertos interiores, tanto químicamente unidos como quemados, también están recubiertos con acero en 3 ó 4 de sus caras longitudinales.

Cuando en servicio, las onllas de la caja de acero de ladrillos expuestos al fuego se oxida y el óxido de hierro resultante se combina con la magnesia del ladrillo, para formar la magnesio-ferrita. La masa monolítica formada tiene una alta resistencia a la disgregación ocasionada por los cambios bruscos de temperatura. La porción de la caja que no se afecta, le da consistencia al revestimiento. La alta conductividad del acero comparada a la del ladrillo tiende a disminuir el gradiente de temperatura a través de la estructura metálica de ladrillo.

Las características predominantes de los ladrillos básicos son las siguientes:

- 1.- Gran resistencia al ataque químico por escorias.
- 2.- Alto punto de fusión.
- 3.- Expansión térmica relativamente alta pero uniforme (dos a tres veces mayor que la de los ladrillos de arcilla).
- 4.- Peso alto que varía con la composición. El peso de un ladrillo básico en forma rectangular es de $9 \times 4\frac{1}{2} \times 2\frac{1}{2}$ pulgadas, varía de $4\frac{1}{2}$ a $5\frac{1}{2}$ Kg.
- 5.- Conductividad térmica de alta a moderada. Los ladrillos cuyas composiciones consisten principalmente de magnesita, tienen las conductividades más altas. La razón de transmisión de calor de los ladrillos se aumenta por el forrado con caja de acero.

LADRILLOS REFRACTARIOS AISLANTES

Los ladrillos refractarios aislantes son ladrillos de peso bajo porosos, que tienen una conductividad térmica mucho menor que los refractarios comunes y una capacidad de retención de calor superior a cualquier refractario de su composición similar. Se fabrican de materiales tales como la tierra diatomacea (ya sea cruda o calcinada), vermiculita, perlita, arcillas refractarias, arcillas de alta alúmina, alúmina calcinada, etc. Frecuentemente un material combustible se agrega a la mezcla y al quemarse ésta, el material combustible se quema, dejando una gran cantidad de poros en el ladrillo. En la fabricación de algunos materiales refractarios aislantes, agentes que se expanden se usan en unión de los combustibles y dan la porosidad necesaria.

La A.S.T.M. ha clasificado los ladrillos refractarios aislantes basándose en:

- A) Su comportamiento a la prueba de deformación bajo carga a temperaturas específicas.
- B) Su peso por volumen.

La A.S.T.M. clasifica a los ladrillos refractarios aislantes según la siguiente tabla:

Identificación de grupo	El cambio lineal no debe ser mayor de 2% cuando la temperatura es:	Peso por volumen máximo en G/cm ³
16	845°C	0.54
20	1065°C	0.64
23	1230°C	0.7
26	1400°C	0.83
28	1510°C	0.96
30	1620°C	1.06

El número de grupo de identificación multiplicado por 100 representa la temperatura máxima en °F a la que puede trabajar el ladrillo con sus caras expuestas. Por lo tanto, un ladrillo aislante del grupo 16, pue

de ser calentado hasta 1600°F (870°C), para que trabaje satisfactoriamente.

Los ladrillos aislantes se usan principalmente en la parte posterior de los ladrillos de altas refractibilidades y de altas conductividades térmicas. Varios ladrillos aislantes se pueden usar satisfactoriamente en los revestimientos internos de hornos, donde no hay abrasión mecánica o contacto con metales fundidos, escoria o gases corrosivos. Cuando los ladrillos aislantes se instalan en revestimientos interiores, el uso de ladrillos aislantes de bajo hierro, es muy deseable especialmente en los hornos que tienen atmósferas controladas.

Frecuentemente se ha definido que para el uso de ladrillos aislantes, en una aplicación particular se deben considerar los efectos de aislamiento, la temperatura y sus efectos en la resistencia estructural del revestimiento general.

Las principales ventajas en el uso del aislante en los hornos son:

- 1.- Economía en el combustible debido a la menor pérdida de calor y a la mayor capacidad de retención de calor de los ladrillos aislantes.
- 2.- Disminución del tamaño y peso del revestimiento del horno, debido al peso ligero de los ladrillos aislantes.
- 3.- Economía en espacio, debido a que unas paredes más delgadas pueden ser hechas con una eficiencia aislante mayor.
- 4.- Aumento de producción debido al menor tiempo de calentamiento.
- 5.- Mejor control de la operación debido a que las temperaturas se pueden controlar más ampliamente.

Concretos aislantes.- También existen un grupo de concretos aislantes que se venden ya preparados y que únicamente requieren la adición del agua, para ser vaciados en cualquier forma.

La selección de los mismos, generalmente se basa en su peso por volumen una vez vaciados, sus propiedades aislantes y la temperatura máxima a la cual se recomienda. Algunos concretos aislantes se pueden usar a temperaturas de 1700°C.

Morteros refractarios.- Los morteros refractarios para sentar ladrillos se pueden hacer de cualquier material refractario. El material base para fabricar estos morteros incluye: la arcilla refractaria, minerales de alta alúmina, sílice, dolomita y magnesita quemada a muerte.

Los morteros refractarios se pueden clasificar en dos grupos que son: los morteros de fraguado en caliente y los morteros fraguados en frío, dependiendo sobre si requieren calor o no, para desarrollar su liga.

Morteros de fraguado en caliente.- Los morteros de fraguado en caliente incluyen arcilla refractaria de

alta plasticidad y fino molido; mezclas de arcillas de alta refractibilidad crudas y arcillas calcinadas, materiales de alta alúmina, materiales de sílice, magnesita quemada a muerte, cromita y carburo de silicio. Generalmente a los mismos se les agrega una pequeña cantidad de agentes plastificantes. En consecuencia la temperatura de fraguado de los morteros de fraguado en caliente están entre el rango de los 1095 a 1370°C, dependiendo de su composición. Los morteros de fraguado en caliente, que no desarrollan una liga fuerte, se usan con gran ventaja en algunas construcciones de homos, debido a que su flexibilidad ayuda al ajuste ocasionado por las contracciones y expansiones que sufren los homos al calentamiento.

Morteros de fraguado al aire. - Los morteros de fraguado al aire consisten generalmente de arcilla finamente molida, materiales de alta alúmina, materiales de sílice, magnesita, cromita, forsterita o circón con agentes químicos que dan el fraguado al aire.

Algunos de ellos se preparan en forma plástica listos para su uso, otros secos que se preparan por la adición de agua y mezclándolos completamente, cuando estos morteros se secan se endurecen y desarrollan una fuerte liga al aire. Cuando se queman, la fuerza de la unión inicial química disminuye, pero a la vez, se desarrolla una liga cerámica al aumentar la temperatura.

Materiales monolíticos para revestimientos. - Dentro de los materiales refractarios usados para formar revestimientos monolíticos, se encuentran los plásticos, apisonables, concretos y los materiales granulados. Donde estos materiales se pueden aplicar, ahorran tiempo de instalación, evitan juntas y ayudan en las reparaciones.

Refractarios plásticos. - Como su nombre lo indica, los refractarios plásticos son materiales que se preparan a una consistencia plástica. Generalmente se fabrican a base de arcillas calcinadas o minerales de alta alúmina con arcillas plásticas y se preparan a tal consistencia, de que no sea necesaria ninguna preparación posterior para su uso. Las calidades que se fabrican comercialmente se comparan con los ladrillos de alta calidad y calidad superior. Algunas clases de alta alúmina y de cromo, también se pueden comparar a la de los ladrillos de alta alúmina y cromo, respectivamente. También hay plásticos preparados a base de arcilla y grafito y de alta alúmina y grafito. La mayoría de los plásticos refractarios se preparan de sus formas de fraguado al aire y de fraguado en caliente.

Para usar estos materiales, generalmente se apisonan en el lugar paulatinamente, para formar así el revestimiento completo del homo o la forma especial que se quiera. Son muy útiles para ser usados en las reparaciones de emergencia.

Los materiales plásticos tienen un sin número de aplicaciones en los hornos industriales.

Materiales apisonables.- Los materiales apisonables de varias composiciones, generalmente se preparan en forma plástica o en forma seca, que con pequeñas adiciones de agua, están listos para ser empleados. Los materiales ya preparados no necesitan ninguna adición de agua y tal como se preparan pueden ser empleados.

Los materiales usuales con que se preparan los apisonables incluyen magnesita quemada a muerte, la cromita, la forsterita, minerales de alta alúmina, arcilla refractaria, etc.

Los materiales monolíticos, una vez instalados desarrollan una liga al secarse y algunos es necesario secarlos y calentados, para que tomen una liga permanente. Esto quiere decir que también los hay en fraguado al aire y de fraguado en caliente.

Concretos refractarios.- Los concretos refractarios, generalmente se fabrican con materiales refractarios previamente molidos y cribados, que se mezclan con agentes químicos para obtener una fuerte liga que se lleva a cabo a temperatura ambiente.

Cuando estos se calientan, la liga inicial desaparece y a la vez se forma una fuerte liga cerámica, a medida que la temperatura se aumente. Generalmente los concretos refractarios se envasan en forma seca y al mezclarse con la cantidad necesaria de agua están listos para su uso. Estos materiales forman revestimientos monolíticos libres de juntas.

Los concretos refractarios se clasifican en primer lugar, por su composición, que puede ser a base de arcilla refractaria, materiales de alta alúmina, materiales aislantes, cromita, magnesita, cromo-magnesita o carburo de silicio. La clasificación posterior está basada por su límite de temperatura, que puede variar de 1093°C a 1538°C para los concretos a base de arcillas refractarias; de 1538 a 1760°C para los concretos de alta alúmina; y de 1538 a 1765°C para los concretos aislantes. También hay unos concretos refractarios que se usan hasta un límite de temperatura de 816°C.

La fuerza desarrollada por los concretos refractarios, una vez fraguados, es comparable con la de los ladrillos refractarios quemados, tienen además un despreciable encogimiento de servicio y en general, bajo coeficiente de expansión térmica, así como además, son muy resistentes a la disgregación y a la abrasión.

Los concretos refractarios no interactúan de forma muy similar a la del concreto ordinario. Se pueden instalar ya sea vaciado directamente, vibrado o aplicados por medio de pistolas neumáticas para formar los revestimientos de los hornos.

Una gran ventaja de los mismos, es poder formar piezas especiales que se necesitan de emergencia - con costos y tiempo relativamente bajos.

Los concretos refractarios como hemos dicho anteriormente, también pueden ser aplicados por medio de pistolas neumáticas, pudiendo así hacer instalaciones relativamente grandes en poco tiempo y generalmente no necesitan ninguna modificación en su constitución para poder ser aplicados con pistola neumática.

CAPITULO 6

DESIGNACION DE EQUIPO EN QUE SE EMPLEAN

DESIGNACION DE EQUIPOS EN QUE SE EMPLEAN REFRACTARIOS

Las condiciones ambientales que se presentan en el equipo, sirven para saber qué tipo de refractario le debe ser instalado. Si la construcción debe ser monolítica o de ladrillo, depende del diseño y función del equipo. Cada pieza del equipo tendrá sus requerimientos de diseño particular, tal como forma y dimensiones, que influirán en la técnica de la construcción.

Todas las composiciones refractarias están limitadas, así como el tamaño y forma dentro de la cual pueden ser preformados moderadamente. En algunos casos, puede ser ventajoso depender de la construcción monolítica, usando concretos o mezclas apisonadas, a pesar de que las propiedades de pueden ser tan buenas como las de un ladrillo cocido. En algunas aplicaciones, puede ser más económico aplicar refractarios con una pistola neumática, que bien con ladrillos de formas convencionales. Los forrados monolíticos también tienen ventaja de estar libre de conexiones, lo que elimina la penetración entre ladrillos de reactantes químicos.

Además de la resistencia a la destructividad de las condiciones de operación, los refractarios deben ejecutar otras funciones. Algunas veces, un refractario forrado puede también contener un material, desviar una corriente, almacenar o dar aumento de calor, o simplemente ocupar espacio.

Es importante saber si el material contenido es un sólido, líquido o gas.

Para los gases, especialmente aquellos que corroen un amazón de acero, se requieren refractarios que tengan muy baja permeabilidad. Los líquidos, dependen de la viscosidad, normalmente requieren de una baja porosidad refractaria. Cuando los contenidos son sólidos, la fuerza y resistencia a la abrasión son importantes.

Las formas especiales de refractarios, son diseñadas con tubos verticales que tengan una superficie alta del área. Estas formas son incorporadas dentro de una torre de empaque para igualar la presión del gas, reducir la velocidad del gas, dirigir el flujo, y asegurar la mezcla máxima y distribución de líquidos y gases. En equipo como cambiadores de calor, tal como regeneradores, los ladrillos refractarios son arreglados en un estilo de tablero para permitir el paso libre de los gases. Tal equipo, que emplea un gran volumen de ladrillos, es calentado por gases calientes. Cuando el ciclo es reversible, los ladrillos se liberan del calor con gases fríos o aire que entra en el horno.

A causa de que las propiedades de los refractarios cambian con la temperatura, las condiciones de calor son importantes.

El flujo de calor a través de un cuerpo es a menudo el factor más importante en el diseño o selección de un material de construcción. La mayoría de los refractarios tienen claramente (medianamente) bajo calor o

valores térmicos de conductividad.

Algunas veces los refractarios deben proteger solamente el equipo de las condiciones de operación. - Otros procesos requieren conservación de calor, o un flujo específico de calor que controlará la temperatura en una cámara de reacción. La alta conductividad de algunos refractarios es empleada para transferir calor, como en el calor indirecto de boilers y hornos (apagados, embozados, tapados, etc.).

UTILIZACION DEL LADRILLO REFRACTARIO

Refractarios para la industria del hierro y del acero

Alto Homo. - Principio de la operación. - El alto homo es la unidad primaria para reducir el mineral de hierro a hierro. La carga, que es una mezcla de mineral de hierro, piedra, caliza y coque, recibe por inyección una corriente de aire precalentado en cantidad adecuada para general calor y formar así el monóxido de carbono, que reduce el mineral a hierro fundido y escoria. La composición del hierro depende mucho del tipo de mineral utilizado, pero es posible un control de la descomposición final en el mismo alto homo, excepto en los contenidos de Mn y P que no pueden variar mucho.

En la Fig. 27 se muestra el corte transversal de un moderno alto homo. Toma la forma de un cañón de chimenea vertical de 15 a 30 m de altura, con un diámetro de hogar de 5,4 a 8,1 m.

El refractario está completamente rodeado por una carcasa de acero. ✓

La carga se introduce por la parte superior del homo con un montacargas de cangilones, a través de la doble campana del tragante, y gradualmente va pasando hacia abajo a lo largo del homo, mientras van teniendo lugar las reacciones, formándose el hierro y la escoria, que se recogen en los crisoles del fondo. Periódicamente, el hierro y la escoria se sangran a través de vertederos separados.

Es necesario señalar que los refractarios de las partes más calientes del homo, y a veces en las zonas más bajas de las paredes interiores, son enfriados fuertemente con agua, por medio de piezas metálicas de fundición, huecas, que se extienden regularmente por las paredes, alrededor de la zona de combustión, y una camisa de agua se extiende hacia abajo, alrededor del fondo. El enfriamiento por agua ha hecho posible la utilización de paredes más delgadas de lo que se pensaba.

El gas que se encuentra en la cima del alto homo, predominante CO y N₂, se lava y se quema parcialmente en hornos cerámicos, que consisten en cilindros de acero verticales, revestidos con ladrillos, de los

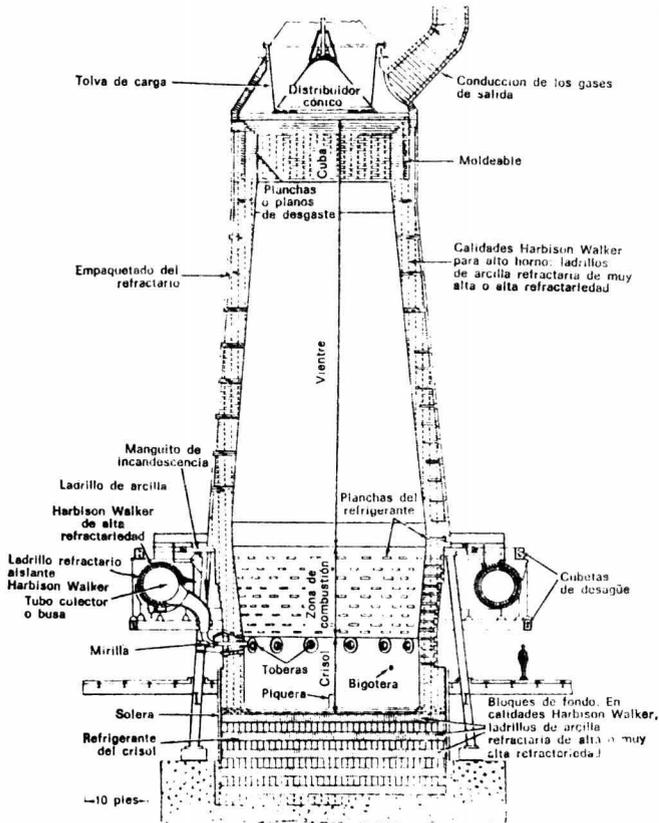


FIG. 27.. Sección transversal de un alto horno típico. (Harbison-Walker Refractories Co.)

cuales una gran parte son ladrillos de recuperación. Estos ladrillos se calientan primero debido a la combustión de los gases que provienen del alto horno, cosa que ocurre en la parte inferior, y luego se hace pasar aire a través de ellos en dirección opuesta para ir luego a las toberas, produciendo así una temperatura media de calentamiento previo de 500 a 1000°C. Tan pronto como la temperatura de los homillos cerámicos alcanza un cierto valor mínimo, el flujo se interrumpe y se conduce a otro horno que ha sido calentado previamente, con lo cual el ciclo puede repetirse en continuo. Normalmente se utilizan tres hornos cerámicos funcionando conjuntamente con el alto horno.

El alto horno y sus hornos cerámicos son grandes consumidores de material refractario, ya que para la construcción de una moderna unidad, entran aproximadamente un millón de ladrillos.

Tipos de refractarios utilizados.- Prácticamente todos los refractarios utilizados en el alto horno y en los hornos de recuperación consisten en ladrillos de arcilla refractaria. En el hogar y en la zona de combustión se utilizan ladrillos de arcilla muy dura, que generalmente han sido moldeados al vacío, prensados en seco o comprimidos neumáticamente, y cocidos a alta temperatura, para dar una estructura densa y una baja contracción al recalentado, que serán resistentes a la escoria y a la presión, bajo las severas condiciones que existen en esta zona del horno. Es aconsejable un ajuste preciso de tamaños en los sillares o bloques que entran en la construcción. El fondo del hogar tiene de 2.7 a 3.6 metros de espesor y se construye normalmente de bloques mayores que los ladrillos standards de 9 pulgadas, a fin de reducir el mínimo de juntas. A pesar de esta construcción, sin embargo, los ladrillos del fondo van siendo desgastados por fricción, o bien los trozos arrancados sobrenadan en la masa, durante una larga campaña, siendo sustituidos por hierro, que se solidifica y forma salamandra.

El uso de bloques de carbón en el hogar del alto horno hasta la pared central de las toberas se ha convertido en práctica común. Para dar estabilidad se utilizan bloques cuidadosamente calibrados. El enfriamiento por aire, que circula por debajo de los fondos, prolonga la vida de los bloques de carbón y permite utilizar fondos de paredes más delgadas. Algunos revestimientos de carbón se han utilizado hasta una distancia de 6 metros de la cuba inferior. Con un enfriamiento adecuado se ha visto que este tipo de construcción es económico.

Los ladrillos que se encuentran en el cañón de chimenea del horno, no necesitan tener tanta refractariedad como los de la parte inferior, porque la temperatura desciende aproximadamente a 400°C en la salida. Sin embargo, los ladrillos deben ser duros y resistentes a la abrasión de la carga móvil; y deben ser estables

bajo la presencia del CO.

La naturaleza de un alto horno es tal, que pueden hacerse muy pocas, por no decir ninguna, reparaciones en la estructura durante el período de funcionamiento en continuo, con lo cual la duración de la zona más débil determina la duración total del conjunto de la estructura. Normalmente, el horno debe pararse debido a corrosiones y desgastes de la pared, en alguna parte de la chimenea, a causa de erosiones y abrasión por parte de la escoria. Cuando la pared se vuelve tan delgada, que no es posible reducir la temperatura en la parte exterior de la cubierta, incluso con un enfriamiento adicional, es imposible que el horno continúe funcionando. El horno moderno que está enfriado completamente por agua, da una excelente duración y normalmente los ciclos de funcionamiento acostumbran de 3 a 5 años.

En la Fig. 28 se muestran las líneas de desgaste en un alto horno al final de una campaña. La primera zona de desgaste está en la parte superior por debajo de las chapas de la cadena de suministro de la carga y es debida principalmente a la abrasión. La segunda zona está por encima del manguito de incandescencia y está producida por los efectos desintegradores del monóxido de carbono, álcalis, así como por la erosión de la escoria.

Los hornos cerámicos se indican en la Fig. 29. Los gases purificados que vienen de la cima del alto horno entran por el fondo a la cámara de combustión, inciden en la cúpula del horno y pasan luego al área de recuperación. Las dos terceras partes inferiores de la estructura, incluyendo los ladrillos recuperadores, están hechas de un ladrillo denso, de alto rendimiento, con un contenido de Al_2O_3 del 42%. Para la temperatura normal de inyección, que es de $750^{\circ}C$, la cúpula y los ladrillos recuperadores de la parte superior deben funcionar a temperaturas alrededor de $1200^{\circ}C$. Para la producción de ferromanganeso se utilizan temperaturas de inyección de $1000^{\circ}C$.

Hornos Siemens Martin. - Es un horno de tipo reverbero con la llama moviéndose por encima de una capa de metal relativamente poco gruesa.

Las reacciones que tienen lugar en este horno son principalmente una oxidación del carbón, eliminación de fósforo en el proceso básico y una disminución en el contenido de silicio, manganeso y azufre. En el proceso ácido (escoria silicea), es imposible eliminar el fósforo; según esto, solamente pueden utilizarse materiales con bajo contenido de fósforo.

El tipo de combustible gobernará el diseño de las conducciones y aberturas en el horno, y tiene una gran influencia en la vida de los refractarios.

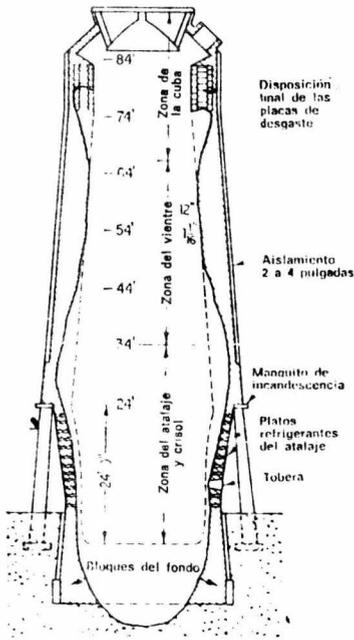


FIG. 28 Vista de las líneas de desgaste que sufre un alto horno a lo largo de su funcionamiento. (Cortesía de W. R. McLain. Bull. Am. Ceram. Soc.)

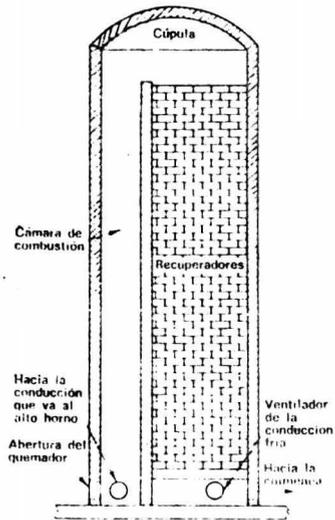


FIG. 29 Horno recuperador asociado a un alto horno.

El gas de gasógeno da una llama larga y tiende a calentar las paredes extremas y tomas de gas que están lateralmente colocadas, mientras que el gas de coke tiene una llama caliente que tiende a calentar el techo cerca del extremo del homo donde se encuentra el quemador. Todos los homos de hogar abierto son de tipo regenerativo, en los que los gases de salida calientan cámaras en las que hay ladrillos recuperadores. Después de un período de tiempo, el flujo cambia de sentido y el aire y gas que entran se precalientan al pasar a través de estas cámaras calientes y se combinan luego en las aberturas para formar la llama de combustión. Ni el gas natural, ni el gas que se produce de los homos de coke pueden precalentarse debido a su tendencia a explotar.

La mayor parte de los homos son de tipo estacionario, pero tienen una ligera inclinación en el eje horizontal para facilitar el vertido y completar la pared trasera. La inclinación hace un poco más simple las operaciones dentro del homo, pero el costo inicial es mucho mayor y hay algunas dificultades en hacer rígidas - las conexiones de aire y gas. El hogar del homo está construido con planchas de acero, con una capa de ladrillos aislantes, ladrillos de cromita o magnesita, o bien una mezcla comprimida, siendo el fondo de magnesita desmenuzada, que se repara constantemente durante la campaña para mantener su grosor normal. Las paredes frontal y trasera del homo se hacen generalmente a base de ladrillo de sílice, con ladrillos de magnesita calcinada en las partes inferiores, aunque recientemente se han utilizado con éxito los ladrillos de magnesita aglomerados químicamente y el ladrillo de magnesita forrado de metal. Normalmente se introduce una capa de ladrillos de cromita entre los ladrillos de sílice y magnesita.

Las paredes extremas y toda la parte de arriba son de ladrillo de sílice, cromita o magnesita; pero también se han ensayado con buenos resultados los ladrillos forrados de metal. Las aberturas se construyen normalmente de ladrillos de sílice, pero se utilizan también ladrillos de cromita y magnesita para soportar la escoria y la acción cortante de los gases polvorientes que circulan a gran velocidad.

Las puertas de los homos tienen normalmente los marcos enfriados por agua, que protege así el aparejo del desgaste mecánico de la máquina de cargar y da suficiente enfriamiento como para evitar el deterioro de la pared frontal que es una zona difícil de reparar.

El techo del homo Siemens Martin (de hogar abierto), es una de las zonas más importantes de la estructura, debido a que la vida del homo como un todo está más o menos determinada por la vida del techo. Generalmente, los refractarios utilizados en el arco curvo del techo, son ladrillos de sílice de 13.5 ó 13 pulg. de grosor. Ya que la temperatura requerida para mantener el acero con bajo contenido de carbón, en condiciones

buenas de vertido, es de aproximadamente 1585°C y la temperatura a la que el ladrillo de sílice que está en contacto con óxido de hierro empieza a ablandecer, es de aproximadamente 1650°C, se ve claramente que sólo se dispone de un pequeño intervalo de operación y por esta razón, debe mantenerse un cuidadoso control de temperatura.

El techo del horno, que originalmente era de ladrillo de sílice, se ha mejorado utilizando primero ladrillos de alto contenido en sílice (con bajo contenido de alúmina, TiO_2 y álcalis) y, segundo, utilizando ladrillos básicos. Estos últimos, cuando son aglomerados directamente y se conjugan con la construcción del techo, con el perfil controlado, son de larga duración a temperaturas de trabajo considerablemente más altas que las que eran posibles con el techo de sílice.

Las tomas laterales de gas de las cámaras de recuperación se revisitan normalmente con ladrillos de sílice, ya que constituyen ellos mismos la parte superior de las cámaras. Los recuperadores consisten normalmente en bloques de arcilla refractaria calcinadas a muerte, con tamaños tales como de 9,6,3 ó bien 10,5 x 4,5 x 4,5 pulgadas. Sin embargo, a menudo las zonas de arriba se hacen de sílice, debido a las condiciones de temperatura más alta.

Refractarios en cucharas para transportar los metales calientes y mezcladores de metales calientes. - El hierro que procede del alto horno se transfiere a menudo por medio de vagonetas o cucharas transportables. Estos recipientes deben estar dotados de una carcasa rígida y de medios de vertido. El revestimiento utilizado para estos casos es normalmente de 9 a 13,5 pulgadas de arcilla refractaria de alta calidad, con un revestimiento de seguridad de 4,5 pulgadas que recubre perfectamente la carcasa.

Es práctica común el almacenar el hierro fundido en recipientes grandes, llamados mezcladores de metal, con capacidades aproximadas de 1500 ton. La temperatura del metal puede variar desde 1250 a 1600°C, con lo que deben utilizarse para el revestimiento ladrillos de rendimiento muy alto.

Ollas de colada. - Las ollas de colada se utilizan para recibir el acero fundido del horno. En la olla el acero puede recibir algún tratamiento, tal como la adición de algunos desoxidantes o elementos de aleación, después de lo cual se llenan unos moldes en forma de lingote a través de una boquilla y un obturador que hay en el fondo de la olla. Los refractarios utilizados para revestir la olla presentan un verdadero problema, ya que deben cumplir las siguientes condiciones:

- 1.- Buena resistencia a los choques térmicos debidos a los repentinos calentamientos, que tienen lugar cuando se vierte el acero fundido en la olla.

- 2.- Buena resistencia a la capa de escoria que permanece en la parte superior del acero.
 - 3.- Resistencia a la abrasión del acero fundido.
 - 4.- Imposibilidad de que las partículas del refractario se mezclen con el acero fundido y formen inclusiones.
 - 5.- Baja conductividad térmica para evitar la formación de agujas.
 - 6.- Juntas ajustadas para evitar la adherencia de las agujas, en el fondo y partes laterales de la olla.
- Generalmente el ladrillo que se utiliza en el revestimiento es silico-aluminoso.

Boquillas, obturadores y manguitos. - La boquilla que se utiliza para verter el acero de las ollas, es una parte muy importante del mismo (Fig. 30). Un buen obturador y boquilla deben dar un flujo neto de acero sin salpicaduras y a una velocidad sustancialmente constante durante toda la operación de vertido, deben ser capaces de cortar la corriente que va a los moldes de lingotes sin goteo, y debe ser posible abrir la boquilla para llenar el primer lingote sin que se atasque.

Para obtener una velocidad uniforme desde el caldero, debe utilizarse para la boquilla un material que se desgaste lentamente y que aumente su diámetro durante la operación de vertido. Se ha encontrado que las boquillas de arcilla refractaria tienen esta propiedad de dar una velocidad de flujo relativamente uniforme desde el principio al final del vertido.

Por otro lado, una boquilla de magnesita es tan resistente a la erosión que mantiene sustancialmente el diámetro constante, con lo cual la velocidad de flujo disminuye.

A fin de obtener un ajuste hermético entre la boquilla y el obturador, normalmente es conveniente que uno de ellos sea ligeramente plástico, pero no los dos, porque entonces sería muy probable que se atascara. - Por esta razón, o bien la boquilla o bien el obturador deben hacerse de un tipo de arcilla más refractaria que el otro; o en muchos casos, el obturador se hace de grafito y arcilla, cuya mezcla es más rígida a la temperatura de vertido que la arcilla sola.

El vástago de acero unido al obturador debe atravesar la masa fundida de acero que está dentro de la olla y por lo tanto, debe protegerse con manguitos refractarios. Están constituidos de arcilla refractaria, y es particularmente importante que resistan la rotura bajo un repentino gradiente de temperatura. Es importante también que las juntas en los manguitos estén herméticamente cerradas, de tal modo que el acero fundido no pueda forzar su separación.

Agujeros de piqueta. - La piqueta de un horno Siemens Martin debe estar constituida por un material

lo suficientemente fuerte, como para soportar la presión del acero fundido sin romperse y, al mismo tiempo, lo suficientemente blando como para hacerlo salir a golpes con la barra. Es práctica general utilizar una mezcla de dolomita cruda y calcinada para esta finalidad, aunque a veces se han utilizado cementos a base de cromita.

Convertidores Bessemer y Thomas. - El convertidor Bessemer es un recipiente revestido de refractario que tiene forma de pera y se apoya sobre muñones, que permiten inclinarlos desde una posición horizontal a la vertical. El fondo está constituido por un refractario que contiene gran número de agujeros, por los que puede inyectarse aire a una presión considerable (Fig. 31). Durante el funcionamiento, el convertidor al mismo tiempo que yace horizontalmente, o sea se apoya sobre su cara lateral, se carga con hierro fundido, que viene del mezclador o alto horno. Posteriormente, se balancea hasta la posición vertical después de que se empieza a inyectar el aire, forzando así una corriente de aire hacia arriba a través del metal, oxidando el carbón y el silicio para disminuir su composición, hasta la adecuada. Se han llevado a cabo experimentos en el sentido de utilizar aire enriquecido con oxígeno, lo que puede alterar profundamente las condiciones de trabajo, respecto al refractario. La mayoría de convertidores antiguos estaban revestidos con refractario ácido, con ladrillos de sílice. Los fondos de los convertidores están normalmente hechos de arcilla refractaria y puede ser frecuentemente reemplazada, ya que la duración media es de 10 a 30 ciclos. Sin embargo, las paredes del convertidor pueden dar una duración de 200 a 300 ciclos antes de que sean necesarias reparaciones generales.

Hoy en día, los convertidores poseen revestimientos básicos y pueden manejar minerales con alto contenido en fósforo.

El convertidor Thomas normalmente tiene el revestimiento básico de magnesita.

Convertidor de oxígeno. - La mayor ventaja estriba en una mayor producción para un mismo tamaño de recipiente (Fig. 32), con una abertura de llenado y vertido en la parte superior. Los muñones permiten el vertido del recipiente. Después de haber introducido el hierro fundido y la chatarra, puede colocarse por la parte superior un tubo inyector de oxígeno enfriado con agua. El revestimiento es de sílice para tratar hierros de bajo contenido de fósforo, pero pronto se adoptó a otros hierros, utilizando un revestimiento básico.

En 1956 apareció el procedimiento Kaldor. Este proceso utiliza un recipiente que se hace girar alrededor de su eje para facilitar el contacto del metal y la escoria con las paredes calientes; este eje puede, a su vez, inclinarse para el vertido (Fig. 33). Este convertidor es térmicamente eficaz, es capaz de fundir hasta el 50% de la chatarra, y da acero de buena calidad, pero el desgaste de los ladrillos básicos es muy severo.

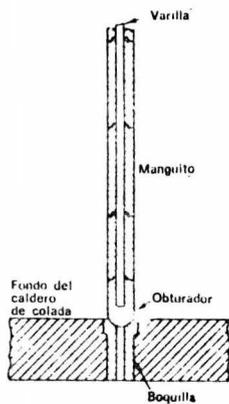
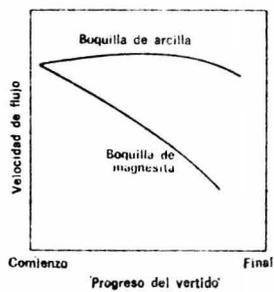


FIG. 20 Conjunto boquilla y obturador.



Flujo del acero a través de las boquillas.

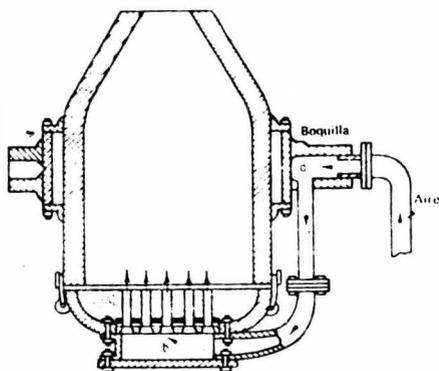


FIG. 21 Convertidor Bessemer (de «Iron and Steels», por H. M. Bolyston).

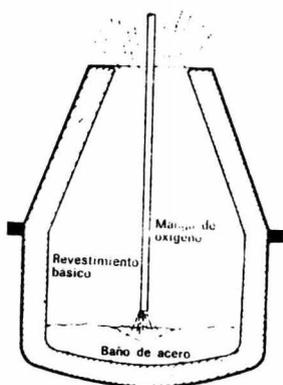


FIG. 32. Convertidor I.D.

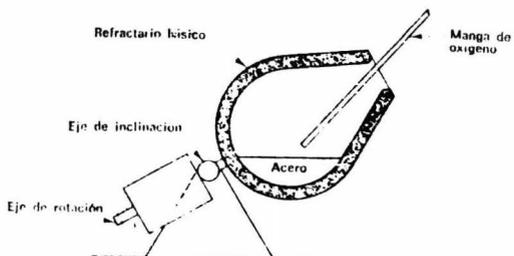


FIG. 33. Convertidor Kaldo en posición de soplado de oxígeno.

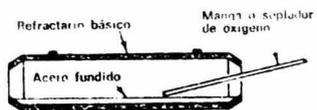


FIG. 34. Convertidor rotatorio de oxígeno.

Un tercer tipo de convertidor es el llamado rotativo (Fig. 34). En este caso el recipiente se extiende a lo largo de un eje horizontal, y se hace girar mientras se inyecta oxígeno por uno o dos conductos.

En los convertidores de oxígeno se han ensayado gran cantidad de tipos diferentes de refractarios básicos, tales como el ladrillo calcinado con un 98% de magnesita, el ladrillo de magnesita impregnado con alquitrán, y el de dolomita aglomerado con alquitrán. El último de ellos, debido a su bajo costo y buena duración, se utiliza en la actualidad.

Se ha observado que cada revestimiento tiene una duración de 400 ciclos, con una producción aproximada de 50 000 toneladas.

El desgaste del revestimiento no es uniforme, con lo que se recomienda más económico, es utilizar refractarios más resistentes aunque más caros, en los puntos de peligro, sobre todo en la abertura de la boca como magnesita aglomerada con alquitrán.

Homos de arco eléctrico. - Los homos de este tipo, se utilizan para fundir hierro y acero por medio del calor de un arco formado por la capa de escoria y los terminales de los electrodos, normalmente en número de tres, que pueden levantarse y bajarse para acomodarse a la altura del metal y a la pérdida de longitud del electrodo. Su construcción consiste en una carcasa cilíndrica revestida de refractario, con un techo de cúpula y una puerta de carga lateral. Están montados sobre muñones y se vierten por inclinación.

El fondo está construido con un piso de ladrillo refractario junto a la carcasa, un piso de ladrillo de magnesita y luego un fondo liso de dolomita o magnesita (Fig. 35).

Las paredes laterales normalmente están forradas con metal, con ladrillos de magnesita no calcinados, con ladrillo de magnesita calcinados colocados en los lugares donde el desgaste es máximo (como en la conducción de escoria, las zonas antagónicas a los electrodos, y antagónicas a la conducción de acero). El techo ha sido siempre de ladrillo denso de sílice, que ha dado buen resultado.

Actualmente, con el aumento de precio de este producto, se buscan materiales más baratos, y en este sentido, gira hacia el uso de ladrillos de alto contenido de alúmina.

Homos de fusión por inducción. - Este tipo de homo funde el metal induciendo corrientes de alta frecuencia en la carga, por medio de una bobina que rodea al crisol. Este homo se diferencia de todos los demás en que el calor se genera directamente en el mismo metal y el crisol no está sometido a ningún otro tipo de calefacción. Esta clase de fusión tiene ciertas ventajas particularmente para aleaciones de acero, en las que tiene lugar, una agitación perfectamente uniforme, y el análisis del acero resultante puede ser controlado

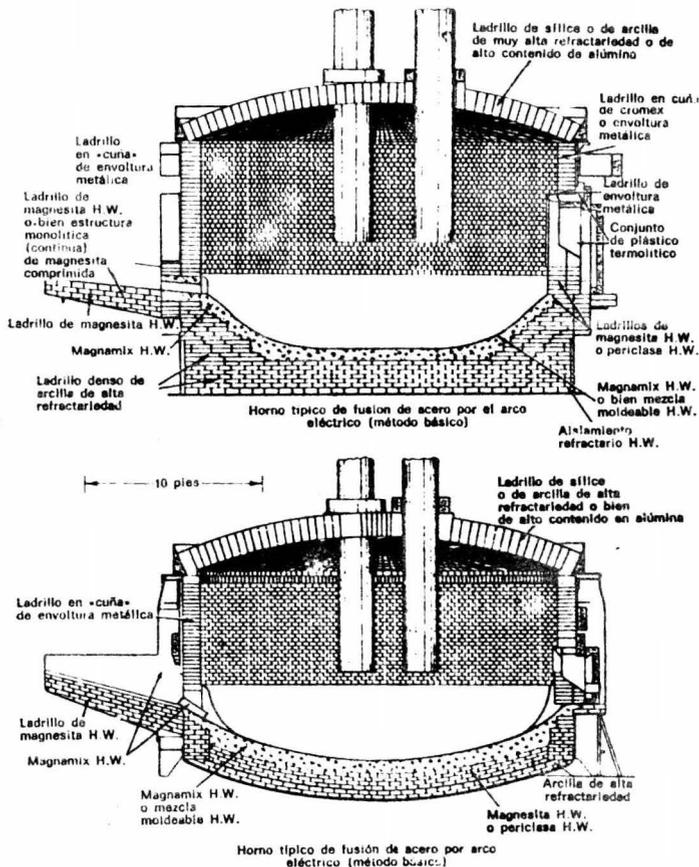


FIG. 35. Horno de acero al arco eléctrico. (Harbison-Walker Refractories Co.)

con exactitud (Fig. 36).

La corriente de alta frecuencia circula por la bobina que está enfriada por agua, en el interior de la cual hay un manguito hecho de mica o fratasado sobre una mezcla con sillimanita, para protección de la bobina. En el lado interior de la misma se encuentra una delgada capa de refractario para formar la cámara de fusión. Para tener el máximo rendimiento, este refractario debe ser delgado y además no debe romperse durante la operación. El método preferido para colocar este refractario es aprearlo a mano en la parte interior del núcleo que está hecho de un cilindro de acero forjado o de asbesto. El núcleo puede retirarse o dejarse fundir, mientras que al mismo tiempo, la superficie del refractario se sinteriza junto con el grueso de la masa.

Un refractario satisfactorio para estas finalidades puede ser ganister conglomerado y aglomerado con un poco de arcilla o silicato sódico en los hornos ácidos.

Para hornos básicos se utiliza magnesita sinterizada eléctricamente o una combinación magnesia-alúmina, unida con un aglomerante orgánico a pesar de que los revestimientos se cocen normalmente sin ningún tipo de aglomerante, mediante la fusión con un manguito de hierro.

En casos excepcionales, se han ensayado también alúmina o circonita sinterizadas, con buenos resultados.

Hornos de cubilote. - El horno de cubilote es estrictamente un horno de fundición que utiliza como carga hierro colado en forma de lingotes, chapas y otras chatarras de hierro colado, y en algunos casos virutas de acero. La carga estará, pues, formada por capas alternativas de metal, coque y algo de piedra caliza como fundente. El horno de cubilote es muy similar al alto horno en su forma, que consiste en un cañón de chimenea hueco en que la carga entra a través de una puerta cerca de la cima y el hierro fundido se sangra periódicamente. Por la parte inferior de la chimenea entra aire para la combustión a través de las toberas, del mismo modo que en el caso del alto horno, y actualmente el aire precalentado se utiliza a menudo para las operaciones en el horno. A diferencia del alto horno, el horno de cubilote no se utiliza para operaciones en continuo, sino que se descarga cada tarde, se reparan los posibles desgastes y se empieza de nuevo el proceso al día siguiente.

En la Fig. 37 se muestra una sección transversal de un horno de cubilote. El cañón está completamente revestido, con piezas o bloques de arcilla refractaria moldeados para encajar bien con la curvatura del horno. El fondo del horno puede bajarse al final del proceso para que se enfríe más rápidamente y para mayor facilidad de las reparaciones.

Los refractarios utilizados en el horno de cubilote son de arcilla refractaria de alto rendimiento, he--

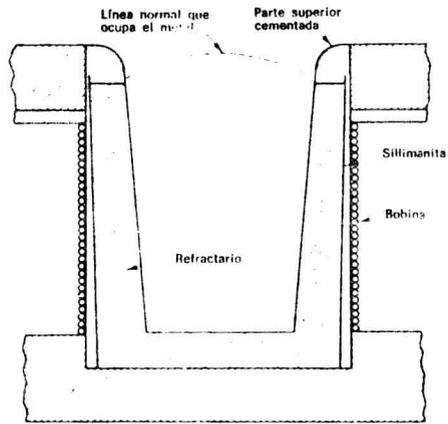


FIG. 26 Disposición general de un horno de inducción sin núcleo. (Cortesía de B. W. Magalis, Babcock & Wilcox Co.)

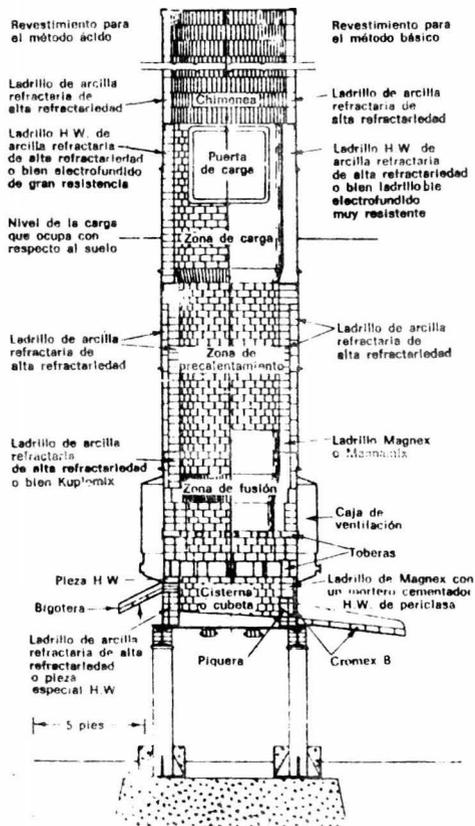


FIG. 27. Vista de un horno de **Columbian** típico para hierro colado. (Harbison-Walker Refractories Co.)

chos a base de material que tiene una estructura densa debido a una fuerte presión o bien por haber eliminado el aire. Se han mejorado considerablemente los refractarios utilizados en este tipo de horno, en el sentido de obtener estructuras más densas y uniformes. Una estructura tal es capaz de soportar las acciones de la abrasión y de la escoria, pero, por otro lado, debido a los cambios repentinos de temperatura, el bloque debe tener gran resistencia al desconchado. A pesar de que un revestimiento completo en el horno dura mucho tiempo, quizás un año o más, es necesario hacer reparaciones diarias de cierta magnitud en la porción de la chimenea alrededor de las toberas por medio de la adición de nuevos bloques o simplemente de un material plástico, que normalmente se hace de ganister triturado y arcilla refractaria plástica.

Los requisitos del refractario están entre los más severos encontrados en hornos de fundición. Aún bajo las condiciones más cuidadosamente controladas, los revestimientos requieren cierto parchado después de cada homada. La falla y erosión de revestimientos ocurre por muchas causas, incluyendo la abrasión de la carga, el ataque de la escoria, el esfuerzo mecánico, el calor excesivo y los cambios súbitos de temperatura.

Los ladrillos de arcilla que se usan se hacen con una estructura particularmente densa y uniforme, para resistir la abrasión y el ataque de la escoria. Poseen características de expansión térmica relativamente buenas y por lo tanto, son capaces de resistir el disgregamiento, especialmente importante cuando la insuflación de aire frío entra al cubilote al final de una homada (después de tirar el fondo). La erosión más severa en el revestimiento de los cubilotes tiene lugar en la zona de fusión. Aquí no solamente la temperatura es más elevada que en otras zonas del cubilote, sino que también el ataque químico es más severo. La oxidación del hierro tiene lugar en la zona de fusión y los óxidos tienden a reaccionar con el fundente (caliza) y con el revestimiento del cubilote. En esta zona tiene lugar una abrasión debida al roce de los materiales de carga y a la concentración del aire soplado, especialmente cuando el refractario está debilitado por la elevada temperatura. Igualmente el disgregamiento ocurre con mayor facilidad en y cerca de la zona de fusión cuando se tira el fondo (a causa de la súbita entrada de aire frío).

La mayoría de los cubilotes se revisten cuando menos con dos capas de ladrillo, siendo el espesor total del revestimiento de unos 12 a 22 cm. Una de las prácticas de mantenimiento más común en los cubilotes es dejar que la capa interior de ladrillo se erosione en la zona de fusión, hasta que necesite ser reemplazada; entonces se quita y reemplaza toda esa capa de ladrillo (en la región de la zona de fusión).

En cubilotes que trabajan durante 8 horas o más, generalmente se necesita tal reemplazo después de cada homada. Otra práctica normal de mantenimiento es usar una mezcla plástica, parchando a mano o con

pistola. Tales mezclas de apisonado se forman usualmente con una adición suficiente de arcilla de servicio ru_ do, para dar una buena plasticidad.

En el crisol del cubilote, las condiciones de servicio son mucho menos severas que en la zona de fu_ sión, y rara vez se necesitan reparaciones grandes. El crisol, el orificio de sangrado y el pico se forman con ladrillo de arcilla.

Refractarios básicos.- Hasta hace poco, la relativa sencillez y economía favorable de los revestimientos ácidos en los cubilotes, ha dado por resultado el uso casi exclusivo de este tipo de refractario para fundir hie_ rro. El desarrollo del hierro dúctil, ha traído consigo una demanda de hierro básico de bajo contenido de azu_ fre, el cual se produce en forma más segura por el proceso básico. Como se va teniendo más experiencia en el uso de revestimientos básicos en los cubilotes, su uso puede extenderse en algunos casos a la fusión de hie_ rro gris para su uso como tal. Por el proceso básico puede obtenerse un hierro más caliente, emplearse pedace_ ría de más alto contenido de azufre. Los costos de instalación inicial de un cubilote básico son, sin embargo, considerablemente mayores que en el cubilote ácido, y es importante estudiar plenamente la economía de la operación del cubilote básico antes de efectuar su conversión.

Los revestimientos para la zona de fusión de los cubilotes básicos son usualmente de ladrillo de magne_ sita-cromo aglomerados químicamente, o de ladrillos de magnesita de alta cocción. Estos ladrillos básicos se colocan desde el fondo del cubilote hasta unos 125 cm arriba de las toberas. El resto del cubilote se reviste exactamente igual que el cubilote ácido, incluyendo el fondo de arena apisonada. Al revestir los cubilotes con ladrillo básico deberá tenerse conocimiento de la alta expansión térmica de los ladrillos básicos, y de su alta conductividad térmica. Generalmente se colocan entre los ladrillos tiras de expansión hechas de cartón, para permitir en la zona de fusión la expansión térmica; la alta conductividad térmica de los ladrillos requiere que se emplee una capa exterior de ladrillo de arcilla cuando los revestimientos sean menores de unos 20 cm de _ espesor.

El ladrillo básico debe instalarse con morteros básicos, y los parches apisonados deben ser también bás_ cos (o neutros). Para el parchado de cubilotes básicos se emplean ampliamente mezclas plásticas de carbón, - tanto para apisonado como para colocación a pistola, ya que el carbón tiene relativamente una larga vida en la atmósfera reductora de la zona de fusión del cubilote. Recientemente se han usado como revestimiento para la zona de fusión bloques preformados de carbón, en lugar de los ladrillos de magnesita o de magnesita-cromo.

Una ventaja de tal revestimiento es que puede usarse tanto para la fusión ácida como básica; la compo_ sición de la escoria puede cambiarse realmente durante una operación de fusión, sin daño para el refractario.

CAPITULO 7

S E L E C C I O N

SELECCION DE REFRACTARIOS

El proceso eficiente de operación de cualquier equipo requiere que sus refractarios sean propiamente seleccionados e instalados. Todos los factores pertenecientes a la operación, servicio, diseño y construcción de equipo deben ser relacionados con las propiedades físicas y químicas de los diferentes refractarios. Aunque el costo inicial de materiales es importante, se pierde la producción y restaura los costos que pueden ser reducidos por selección de un refractario de propiedades superiores. Debido a que las condiciones de servicio varían en diferentes secciones del equipo, a menudo más de un tipo de refractarios deben ser instalados en él para que su uso sea balanceado.

Cuando se seleccionan refractarios, el primer paso es evaluar las condiciones del medio ambiente, para qué función deberá servir y qué tiempo durará el refractario. Aunque una buena guía para seleccionar refractarios cuando se reconstruye una unidad puede ser "cual fue usado antes", cambia en el proceso o proporción de la producción, modificaciones de diseño, o uso no balanceado, se requerirá buscar entre los materiales de nueva construcción. También el más reciente desarrollo de refractarios puede ofrecer funcionamiento superior. El próximo paso deberá ser evaluar los factores relacionados con el servicio y diseño y pesar su importancia comparativa a la destrucción del refractario.

Destrucción del refractario.- El ataque químico, entre los más destructivos para los refractarios, puede provenir de varias fuentes: el material que está siendo procesado, escorias formadas o usadas en la operación y productos de combustión tales como ceniza combustible, emanaciones o polvo de los gases del horno. El ataque químico algunas veces llamado "ataque de escoria", es una reacción directa en los refractarios que lo mismo disuelven que se combinan con ellos para formar nuevos compuestos.

Debido a que la combinación química de las escorias con refractarios es una reacción compleja, sólo las generalizaciones pueden hacerse alrededor de este tipo de destrucción. Algunos compuestos en la escoria o atmósfera de un horno actúan como flujos que reaccionan con la superficie refractaria o son absorbidos dentro del forro refractario. Puede haber un cambio en la estructura cristalina o textura del refractario, o la formación de un nuevo compuesto. Estas combinaciones o aleación, generalmente forma un compuesto que tiene un bajo punto de fusión y puede densificar la superficie del refractario. Si el punto de fusión es mucho más bajo que la temperatura de operación, será formado un líquido que subsecuentemente se escurrirá hacia afuera de la superficie del refractario. Cuando esto sucede, el nuevo material, por supuesto, será expuesto adicionalmente por reacciones futuras.

Debido a que la superficie densificada ocupará menos volumen que el material original, seguirán las cuarteaduras y las roturas. La reacción opuesta puede también ocurrir el compuesto puede expandirse a un volumen mayor, el cual caerá en pedazos o descascaramientos de la superficie y la subsecuente pérdida de la fase caliente.

También si el nuevo volumen del compuesto permanece inalterable, sus cualidades de expansión térmica pueden llegar a ser diferentes de aquellas del material original, y, como consecuencia, el esfuerzo con calentamiento y enfriamiento, puede causar cuarteaduras entre los materiales reactivos y los no reactivos. La erosión, una destrucción física en la que el grano es lavado continuamente, a menudo sigue cuando el enlace entre los granos se ha disuelto o ablandado por ataque químico.

Ciertas condiciones atmosféricas pueden también ser destructivas para los refractarios como en el caso de los refractarios carbonosos, que están sujetos a la oxidación. Algunos refractarios son dañados por monóxido de carbono entre 370 y 540°C. Algunas impurezas en un refractario, tales como óxido de hierro, actúan como catalizadores a la reacción $2CO \rightleftharpoons CO_2 + C$, que depositará carbón en vacío, que puede ser aumentando las tensiones suficientemente grandes para la ruptura de la estructura. El vapor del agua simple puede atacar al ladrillo, tal como cuando hidrata el vapor el MgO. Otros gases, tales como cloruros, fluoruros y sulfatos, pueden también destruir ciertos refractarios.

No sólo deben considerarse las temperaturas normales de operación, sino también en condiciones anormales que pudieran presentarse cuando la unidad esté fuera de control. Si propiamente acontece por pequeño disturbio en condiciones de operación, no dañara seriamente las condiciones del refractario.

La operación cíclica a menudo será más severa en los refractarios que la operación continua, no solamente debido a las temperaturas cíclicas, sino también debido a los cambios en condiciones químicas y atmosféricas. Debido a que algunos refractarios sufren un cambio gradual en su estructura cristalina, cuando se exponen al calor, las condiciones cíclicas pueden aumentar por fuerzas destructivas. Los cambios son por supuesto, más destructivos cuando son frecuentes. Cuando la temperatura cambia, el refractario lo mismo se expande o contrae, y aumenta las tensiones entre áreas a diferentes temperaturas. Cuando el ciclaje es rápido, las diferencias de temperaturas pueden ocasionar grandes tensiones, las suficientes para romper el enlace.

El impacto mecánico y el uso pueden en cualquiera de los dos no existir o ser la mayor causa de destrucción. El impacto puede sobrevenir de la carga del material en bruto o del movimiento del material sobre las superficies refractarias. Durante la adición a los esfuerzos mecánicos, los esfuerzos térmicos pueden apare

cer cuando el material frío es cargado dentro de un horno caliente.

El rozamiento de los sólidos en refractarios pueden causar la abrasión, tal como cuando el catalizador se mueva a través de la superficie. La extensión de la abrasión depende del peso o fuerza del material, así como de sus velocidades y temperatura. Los sólidos finos (menudos) suspendidos en hornos de gases o líquido, cuando invaden el refractario, pueden causar también abrasión. El modelo, densidad, concentración, ángulo de choque y velocidad de las partículas son factores que incluyen más en la proporción de la abrasión.

Los líquidos que se mueven a través de la superficie de un refractario pueden también causarle erosión.

El tipo y la clase de refractario más adecuado para ser usado para un caso particular, se determinara con un estudio cuidadoso de los siguientes factores:

D) Factores relacionados a la operación:

Clase de horno

Naturaleza del material que se va a procesar

Razón de operación

Continuidad de operación

Temperaturas de las diferentes partes del horno

Rapidez y rango de los cambios de temperatura

Fuente de calor

Clase de combustible

Cantidad de calor, liberado por unidad de volumen

Razón de la disipación de calor

Ataque químico por óxidos de metales, escorias, cenizas o cualquier otro agente destructivo

Ataque químico por polvos, humos o gases

Fluidez del material o escoria

Velocidad de los gases en contacto con los revestimientos

Abrasión resultante de la carga

Abrasión causada por los gases en movimiento

Impacto causado por la carga fría

Erosión por metales fundidos

Golpeteo de la flama en las paredes

Los efectos de llamas pulsantes, explosiones o de vibración

II) Factores relacionados al diseño del horno y construcción:

Tipo de horno

Volumen del horno

Diseño y dimensiones de las paredes y arcos

Cargas que deben soportar los materiales del revestimiento

Condiciones de calentamiento

De un solo lado

De más de un lado

Por abajo o por arriba

Aislamiento

Ventilación de las partes del horno

Enfriamiento de agua o por aire

Tipo de construcción

De ladrillos o monolítica

Método de sentado y soporte

Tipo de liga

Espesor de juntas

Naturaleza del mortero empleado

Juntas de expansión

Mecánica de las partes en movimiento

III) Factores relacionados a los refractarios:

A.- Propiedades de los ladrillos a temperatura atmosférica:

Uniformidad de medidas, acabado y alabeo

Habilidad de soportar el manejo normal

Peso por volumen, porosidad, permeabilidad

Composición química y mineral

Uniformidad de composición y textura

Tamaño del ladrillo

Diseño de piezas especiales

B.- Propiedades a temperaturas elevadas (cualquier refractario):

Refractibilidad

Temperatura de vitrificación

Expansión térmica reversible

Resistencia al choque térmico

Resistencia al ataque químico

Resistencia a los esfuerzos mecánicos y al impacto

Resistencia a la abrasión y erosión

Permeabilidad a gases y líquidos

Estabilidad de volumen, porosidad, permeabilidad, afectados por las condiciones del horno

Estabilidad de su constitución mineral

Resistencias a gases y humos

Conductividad térmica

Capacidad de calor

Resistividad eléctrica

Resistencia dieléctrica

C.- Factores económicos:

Costo del material en la obra

Costo de instalación

Piezas normales en contra de piezas especiales

Tiempo de servicio

Posibilidad de recuperación del refractario usado

De la gran cantidad de factores que influyen para una buena selección de refractarios, parece ser que de escoger un refractario adecuado sea una cosa difícil.

Algunas veces esto es cierto, sin embargo, existe generalmente una gran cantidad de datos pasados de experiencia de usos de refractarios en condiciones similares de operación. Aun los mejores refractarios seleccionados para una aplicación particular, generalmente dependen de pocos factores tan importantes, que por comparación a otros factores, estos resultan de muy poca importancia. Por ejemplo, en algunos casos, una alta refractibilidad puede ser el factor decisivo; en otros una alta refractibilidad junto con la alta resistencia al

choque térmico también lo puede ser, así como también hay otros como la resistencia, el descascaramiento o la desintegración por gases, pueden regir en la selección de estos refractarios.

CONCLUSIONES

El final, y algunas veces el paso más difícil en la selección de un refractario, es armonizar las exigencias del servicio con las propiedades (determinando las condiciones del servicio actual que pueden ser también difíciles). Por supuesto, los abastecedores de refractarios pueden ofrecer mucha ayuda en la selección e instalación.

Todos los factores pertenecientes a una nueva unidad o proceso, deben ser cuidadosamente evaluados, incluyendo la duración esperada, la utilidad del costo y método de construcción. Diseñar para nuevos equipos es más difícil y este puede ser el tiempo en el que la experiencia puede ser de mayor valor. Cuando se selecciona un refractario para reconstruir un equipo, un supervisor debería encontrar si los nuevos descubrimientos en materiales pueden ofrecer mejor servicio a más bajo precio.

Cuando el equipo se para por reparación, la condición de los refractarios debería ser completamente chequeada. Para reemplazar los refractarios en esas áreas, que se desgastan rápidamente con productos más caros o acorde a las necesidades, la duración total puede ser ampliada con un ligero desembolso.

Cuando un refractario falla, cada detalle concerniente que aparezca en los mismos debe ser notado, tanto como cualquier cambio en el proceso.

La utilización de refractarios en la técnica depende del equilibrio entre las propiedades y el comportamiento de los refractarios, de una parte, y las condiciones destructivas a las cuales probablemente han de enfrentarse, por otro lado. Esto se ilustra en la Fig. 38.

Incluso en hornos del mismo tipo e igual diseño, que trabajan más o menos con el mismo tipo de producto, no siempre es posible adelantar si resultara satisfactorio o no un cierto tipo de refractario. Esto se debe a las variables de la operación.

Algunas condiciones físicas son relativas a las propiedades de los refractarios en la Tabla IV se indican.



Fig. 36 Gráfica de la utilidad de los refractarios (18). (Los factores encerrados en recuadros de trazos representan condiciones en servicio, y los incluidos en recuadros de línea continua se refieren a propiedades de los refractarios.)

TABLA IV - CONDICIONES DE SERVICIO RELATIVAS A LAS PROPIEDADES DE LOS REFRACTARIOS

CONDICIONES DE SERVICIO	FACTORES DE CONTROL	PROPIEDADES RELATIVAS DE LOS REFRACTARIOS
Abrasión	Forma, densidad, concentración, ángulo de choque, velocidad de partícula	Resistencia, dureza y tipo de unión
Ataque químico	Composición y viscosidad del material en contacto o contenido, atmósfera y gases del horno	Composición química, penetración a la junta, permeabilidad, porosidad y contracción
Astillamiento térmico	Fluctuación de temperatura rápida y cambio de estructura	Resistencia, durabilidad química, expansión y conductividad térmica y elasticidad
Astillamiento mecánico	Impacto, presión desigual y carencia de expansión permitida	Resistencia mecánica y expansión térmica
Astillamiento estructural	Cambios estructurales o densificación del ataque de escoria	Durabilidad química, tipo de liga, expansión permitida y alto punto de fusión
Fusión	Ataque químico, sobreaislamiento, flama de choque y atmósfera	Alto punto de fusión, durabilidad química y flujo de calor
Resistencia	Condiciones de carga y gradiente térmico	Naturaleza de los constituyentes y liga química, alto punto de fusión y densidad a granel
Flujo de calor	Temperatura en la cara caliente, atmósfera y espesor del revestimiento	Conductividad térmica, porosidad, permeabilidad, densidad a granel y naturaleza de los constituyentes

<u>Abrasión de los refractarios</u>	El desgaste de las superficies de los refractarios en servicio, por la acción de los sólidos.
Absorción de agua	Contenido en peso de agua que puede ser absorbido por el refractario.
Alúmina	Oxido de aluminio (Al_2O_3), su punto de fusión $2050^{\circ}C$, en combinación con agua, la alúmina forma el mineral diasporo, bauxita y gibsita, en combinación con SiO_2 y H_2O , la alúmina forma caolinita y otros minerales arcillosos.
Anortof	Que no tiene forma estructural, ni cristalina.
Andalusita	Tiene la composición de $Al_2O_3-SiO_2$, correspondiendo el 62.9% de Al_2O_3 y el 37.1% de SiO_2 . Se descompone al calentarse, comenzando la descomposición a menos de $1350^{\circ}C$, para formar mulita y sílice libre.
Apatita	Mineral de $CaF_2.Ca_4(PO_4)_3$.
Apisonamiento al aire	Método para moldear ladrillo o revestimiento del horno, usando un apisonador neumático.
Arcilla	Agregado mineral natural, que consiste esencialmente de silicatos aluminosos hidratados.
Arcillas de diasporo	Roca que consiste esencialmente de diasporo ligado con arcilla pétreo. La arcilla de diasporo comercial de grado más puro usualmente contiene entre 70 y 80% de alúmina, después de la calcinación.
Arcilla refractaria	Agregado terroso o pedregoso que tiene los constituyentes esenciales de silicatos de aluminio hidratados con o sin sílice libre, de consistencia plástica si se pulveriza suficientemente y humedece al secarse posteriormente, se vuelve rígido. Debe ser de suficiente pureza y refractibilidad para uso en productos comerciales.
Astiliadura de refractarios	La pérdida de pequeños fragmentos de la cara del refractario, sea ésta por fisuras o rupturas con exposición de partes interiores de la masa original.
<u>Ball Clay</u>	Arcilla refractaria de liga muy plástica y grano muy fino, que tiene un gran rango de vitrificación.
Baddeleyita	Mineral de ZrO_2 .
Breunnerita	Un tipo de magnesita que contiene diferentes % de $FeCO_3$, en solución sólida.
Brucita	Hidróxido natural de magnesio ($Mg(OH)_2$) con 69% de MgO y 31% de H_2O .
<u>Coefficiente lineal de expansión</u>	La expansión por $^{\circ}C$ ó $^{\circ}F$, por unidad de longitud.
Cono pirométrico	Uno de una serie de piezas de forma piramidal, consistente de una mezcla de minerales y usados para medir el efecto de tiempo-temperatura. Un cono pirométrico estandar es una pirámide de tres lados y aproximadamente es de $2-5/8"$ de alto por $5/8"$ en la base ó $1-1/8"$ de alto por $3/8"$ de ancho en la base. Cada cono es de composición mineral definida, teniendo un número estampado en una cara; que cuando calentando en condiciones estandar se funde a una temperatura definida.
Cono pirométrico equivalente	El número del cono pirométrico estandar cuya punta tocaría simultáneamente la placa de soporte con un cono hecho del material que está siendo investigado, cuando se prueba de acuerdo con el método de prueba para el cono pirométrico equivalente (CPE) de los materiales refractarios.
Corundum	Mineral natural o sintético que teóricamente consiste de alúmina pura (Al_2O_3).
Cristobalita	Forma de mineral de sílice estable desde $1470^{\circ}C$ hasta su punto de fusión de $1723^{\circ}C$. La cristobalita es un constituyente importante del ladrillo de sílice.
Cromita	Mineral de $FeO.Cr_2O_3$, con 32% de FeO y 68% de Cr_2O_3 .
Cyanita	Mineral que tiene la fórmula teórica $Al_2O_3.SiO_2$, y la composición química de 62.9% de Al_2O_3 y 37.1% de SiO_2 . Su descomposición comienza a $1325^{\circ}C$ con la formación de mulita y sílice libre.

<u>Densidad a granel</u>	El peso por unidad de volumen del refractario.
<u>Diasporo</u>	Mineral que tiene la composición teórica $Al_2O_3 \cdot H_2O$, correspondiendo a un 85% de alúmina y un 15% de agua de combinación. Se descompone, cuando se calienta a altas temperaturas, formando corundum (Al_2O_3).
<u>Dolomita</u>	Mineral de carbonato de calcio que tiene la composición teórica $CaO \cdot MgO \cdot 2CO_2$ que corresponde a 30,4% de CaO, 21,9% de MgO y 47,7% de CO_2 .
<u>Escoria</u>	Sustancia que es formada por una de las varias maneras de acción química y fusión a temperaturas de hogares en operación.
<u>Escoria ácida</u>	Que contiene una cantidad considerable de sílice.
<u>Escorificado en refractarios</u>	Acción química destructiva entre refractarios y agentes externos a altas temperaturas, resultando en la formación de líquido.
<u>Erosión en los refractarios</u>	Desgaste mecánico de las superficies de los cuerpos de los refractarios en servicio por la acción de lavado de los líquidos, tales como metales o escorias fundidas.
<u>Estribo</u>	Porción estructural de un horno que resiste el peso del arco.
<u>Forsterita</u>	Mineral que tiene la composición $2MgO \cdot SiO_2$, correspondiendo 57,3% de MgO y 42,7% de SiO_2 .
<u>Fragado al aire</u>	Unión fuerte que se desarrolla, sin calor, por mezcla de refractarios.
<u>Ganister</u>	Roca densa de alto contenido de sílice (cuarcita) apropiada para la fabricación de ladrillo de sílice.
<u>Gibsita</u>	Mineral que tiene la composición de $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$, correspondiendo 65,4% de Al_2O_3 y 34,6% de H_2O .
<u>Gravedad específica a granel</u>	La gravedad específica en que entre abrir y cerrar los poros son incluidos en el volumen.
<u>Grog</u>	Un producto producido por el triturado, molido y calcinado de material refractario, esencialmente de composición de alúmina-sílice.
<u>Grout</u>	Una suspensión de mortero en agua, de tal consistencia que cuando es vertida en hilados horizontales en un trabajo de albañilería, ésta fluirá en las juntas verticales abiertas.
<u>Ladrillo</u>	Block moldeado de arcilla u otro material unido en una forma de masa estable.
<u>Ladrillo a prueba de ácidos</u>	El ladrillo que tiene baja porosidad y permeabilidad, alta resistencia al ataque químico o penetración, por la mayoría de los ácidos comerciales y algunos otros productos químicos corrosivos.
<u>Ladrillo envuelto en metal</u>	Ladrillo básico provisto de envoltura de acero delgado.
<u>Ladrillo de cromo</u>	Ladrillo refractario manufacturado sustancialmente o enteramente de mineral de cromo.
<u>Ladrillo de magnesita</u>	Ladrillo refractario manufacturado sustancialmente o enteramente de magnesita calcinada, que consiste principalmente de magnesita en forma cristalina (periclasa).
<u>Ladrillo de cromo-magnesita</u>	Ladrillo refractario que puede ser de liga química o cocido, manufacturado sustancialmente de una mezcla de mineral de cromo y magnesita calcinada, en el cual el cromo predomina en peso.
<u>Ladrillo de magnesita-cromo</u>	Ladrillo refractario que puede ser cocido o ligado químicamente, manufacturado sustancialmente de una mezcla de magnesita calcinada y cromo, en la que la magnesita predomina en peso.
<u>Ladrillo de sílice</u>	Un refractario sometido a tratamiento térmico que consiste esencialmente de sílice y usualmente de cuarcita ligada con alrededor de 1,8 a 3,5% de cal.
<u>Magnesita</u>	Mineral consistente de $MgCO_3$, y técnicamente contiene 47,8% de magnesita y 52,2% de dióxido de carbono.
<u>Magnesio-ferrita</u>	Mineral del grupo espinel, tiene la composición de $MgO \cdot Fe_2O_3$, que corresponde a 20,15% de MgO y 79,85% de Fe_2O_3 . Raramente se encuentra en la naturaleza. Usualmente es la que le da el color café al ladrillo de magnesita.

Mulita	Mineral que tiene la composición de $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, y teóricamente contiene 71,8% de Al_2O_3 y 28,2% de SiO_2 . Es un importante constituyente del ladrillo de arcilla refractaria y de alta alúmina.
Materiales refractarios calcinados	Materiales refractarios crudos que son quemados, usados antes, para eliminar constituyentes volátiles, y producen cambios de volumen.
Mezcla de apisonable	Un refractario molido que es mezclado con agua y varillado, donde se separan piezas o para formar recubrimientos monolíticos.
Morteros refractarios fraguados al aire	Mezcla fina de materiales refractarios susceptibles a colocarse en medio de los ladrillos refractarios, y produciéndose una unión fuerte cuando están secos.
<u>Periclasa</u>	Es el mineral o la forma cristalina del MgO .
Plásticos de arcilla refractaria	Arcilla refractaria que tiene suficiente plasticidad para ligar otros materiales que tienen poca o ninguna plasticidad.
Poros	Tal como se aplica a los refractarios, los pequeños vacíos entre las partículas de sólido. Los poros pueden ser abiertos si son permeables a los flujos, cerrados si son impermeables.
Porosidad aparente	La relación que existe entre el volumen de los poros abiertos del refractario con respecto al volumen exterior del mismo.
Porosidad en los refractarios	El cociente del volumen de los poros o vacíos del cuerpo al volumen total del mismo, usualmente expresado como porcentaje. La porosidad verdadera está basada en el volumen total de los vacíos.
<u>Quemado de refractarios</u>	El tratamiento térmico final en un horno al cual el ladrillo refractario está sujeto en el proceso de manufactura, con el propósito de desarrollar la liga cerámica y otras propiedades físicas y químicas necesarias.
<u>Refractarios</u>	Materiales no metálicos apropiados para su uso a altas temperaturas en construcción de hornos. Aunque su función primordial es resistir altas temperaturas, están llamados también a resistir otras influencias destructivas tales como abrasión, presión, ataque químico y cambios rápidos de temperatura.
Refractibilidad	En cerámica, la resistencia a la fusión, ablandamiento o deformación a altas temperaturas. Para la arcilla refractaria y algunos materiales de alto contenido de alúmina, el índice más común de refractibilidad es conocido como CPE.
Refractarios ácidos	Los refractarios tales como ladrillo de sílice, que contiene una proporción sustancial de sílice libre.
Refractarios básicos	Refractarios que consisten esencialmente de magnesita, cal, mineral de cromo, forsterita o mezcla de dos o más de estos.
Refractarios de alta alúmina	Los refractarios de alúmina son los que contienen 45% o más de alúmina. Los materiales usados en su producción incluyen diásporo, bauxita, gibsita, etc.
Refractarios fraguados con calor	Mezcla de refractarios molidos que requieren relativamente alta temperatura para el desarrollo de una liga adecuada, comúnmente llamada liga cerámica.
Refractarios fraguados hidráulicamente	Composición de refractarios molidos en que algunos de los componentes reaccionan químicamente con el agua, para formar una liga hidráulica fuerte.
Refractarios plásticos	Una liga de material refractario molido presentado en forma plástica, apropiados para ser varillados al ser colocados formando recubrimientos monolíticos.
Refractarios silico-aluminosos	Refractarios ácidos, incluyendo semi-sílica, arcilla refractaria, kaolín, arcilla refractaria de alúmina-diásporo y mulita.
Refractarios vaciados	Refractarios fraguados hidráulicamente, susceptibles por vaciado dentro de perfiles o muros.
<u>Sílice</u>	El SiO_2 . El cuarzo y la calcedenia son materiales comunes de sílice, la cuarcita y la arena están compuestas en gran proporción de sílice libre en la forma de cuarzo.
Silimanita	Mineral consistente de $Al_2O_3 \cdot SiO_2$, cuya composición es 62,9% de Al_2O_3 y 37,1% de SiO_2 . Alrededor de 1530°C se comienza a disociar en mulita y sílice libre.

Sinterización	Tratamiento térmico que las partículas adyacentes del material se cohesionan a una temperatura menor a la fusión completa.
Spinel	Un grupo de minerales que cristaliza en el sistema cúbico y que tiene la fórmula $RO \cdot R_2O_3$; en que RO puede ser uno o más de óxidos bivalentes MgO, FeO, MnO o ZnO y el R_2O_3 uno o más de los óxidos trivalentes Al_2O_3 , Cr_2O_3 , o Fe_2O_3 .
Tierras diatomáceas	Una forma hidratada de sílice que es suave, ligera en peso, y que consiste esencialmente de conchas microscópicas de organismos marinos.
Temperatura eutéctica	La temperatura más baja de fusión en una serie de mezclas de dos o más componentes.
Tridimita	Una forma mineral del silicio estable de 870°C a 1470°C. Es un importante constituyente del ladrillo de sílice.

BIBLIOGRAFIA

Araujo R. Ing.
Interpretación de las propiedades físicas y químicas de los
refractarios, 1972
Harbison Walker Flir de México, S.A.

Araujo R. Ing.
Refractarios Industriales, 1974
Harbison Walker Flir de México, S.A.

Burst J. F. y Spieckerman J.A.
A Guide to Selecting Modern Refractories
General Refractories, Co.
Chemical Engineering, 1967

Glosario
General Refractories, Co.
Philadelphia, P.A., U.S.A.

Instituto Mexicano del Hierro y del Acero, A.C.
Seminario sobre refractarios, 1975

Kirk-Othmer
Enciclopedia de la Tecnología Química
Volumen No. 13
U.T.E.H.A.

Norton F. H.
Refractories, 4a. edición
Editorial Mc Graw Hill

Sociedad Americana de Fundidores
Refractories Manual
5a. edición, 1963