
NOTAS TECNICAS

CALIDAD DE LOS REFRACTARIOS

SON NUMEROSOS los procesos industriales en que la acertada elección de los refractarios se traduce en una significativamente mayor rentabilidad. Su participación activa en el proceso hace que los refractarios sean sometidos a una gran cantidad de sollicitaciones que producen finalmente su deterioro. Esto obliga a su reemplazo con las consiguientes pérdidas por la paralización del proceso productivo y el costo debido a la remoción.

Pero esta adecuada elección no es un problema de fácil solución: La necesidad de satisfacer el conjunto de requerimientos, el gran número de variedades de refractario que existen y la influencia del precio de los diferentes refractarios hacen el problema complejo. También condicionan la elección y adquisición de un refractario, la posibilidad de encontrar en el mercado interno las variedades que se desean y el mayor precio que significa tener que recurrir a productos importados.

Muchas de las características de los ladrillos refractarios son comunes a más de una variedad de ellos. Con pequeñas diferencias de grado, muchos satisfacen las sollicitaciones medias que se les exigen. Ciertas variedades poseen características que son ventajosas para determinados usos pero que no tienen importancia o incluso son perjudiciales para el trabajo en condiciones diferentes. En estas circunstancias es casi imposible plantear una escala única de calidad, en la que estén incluidos todos y cada uno de los refractarios. Sólo el estudio detenido y acucioso del proceso para el cual se requiere el refractario, el conocimiento de las sollicitaciones que para el ladrillo significa dicho proceso, el conocimiento y justa evaluación de cada una de las características de cada variedad disponible y, sobre todo, la experiencia, podrán dar una pauta para la correcta elección del material refractario.

El gran número de cualidades que es posible distinguir en los ladrillos refractarios, pueden ser diferenciadas en cuatro grupos¹, que se enumeran a continuación, indicando entre paréntesis algunos de los ensayos que permiten cuantificarlas.

- a) Grado de refractariedad (cono pirométrico equivalente y resistencia bajo carga en caliente).
- b) Resistencia mecánica (resistencia en frío y desintegración por choque térmico).
- c) Estructura interna (variación de dimensiones por calentamiento, porosidad y densidad).
- d) Comportamiento químico (composición química y resistencia al ataque químico a temperaturas elevadas).

Las normas establecidas por los diferentes países para los materiales refractarios (AFNOR, ASTM, DIN, UNE, etc.), difieren entre sí en la manera de realizar el estudio, en los métodos de ensayo y en la cuantificación de los resultados. En nuestro país, no hay todavía establecidas normas INDITECNOR para refractarios, siendo las de más frecuente uso las ASTM³. Razón por la que en este trabajo son éstas las normas que se siguen y comentan.

DETERMINANTES DE LA CALIDAD DE LOS REFRACTARIOS

Influencia de la fabricación en la calidad.

En términos generales es posible resumir el proceso productivo de ladrillos refractarios en seis fases: selección de la materia prima, adición de otros elementos, trituración, humedecimiento, compactación, secado y cocción.

Las características del producto dependen por una parte del tipo de materia prima requerida y por otra dependen, cualitativa y cuantitativamente, de todas y cada una de las diferentes etapas de su elaboración. Así, una materia prima a base solamente de arcillas refractarias es el punto de partida para la obtención de una gran variedad de ladrillos refractarios de arcilla: la calidad de la arcilla empleada, la trituración y la obtención de la adecuada granulometría, la intensidad de la compactación y el tiempo y temperatura de cocción, permiten el desarrollo de propiedades que hacen aptos a estos refractarios de arcilla para soportar, en mayor o menor grado, sollicitaciones térmicas, mecánicas y químicas.

Seleccionada la materia prima fundamental y otros elementos que serán agregados, es necesario realizar una trituración hasta lograr el grado de finura que se desea. Se ha encontrado que es posible desarrollar o incrementar un gran número de propiedades físicas del producto si se controla la distribución granulométrica del triturado: Todas aquellas características que estén en directa relación con la estructura interna del ladrillo (deformación lineal remanente después de ser sometidos a un calentamiento, absorción de agua, porosidad, densidad, etc.), tienen una dependencia estrecha con la constitución granulométrica del material. Así mismo, aquellos ladrillos que vayan a estar someti-

dos a severas sollicitaciones mecánicas (presión, abrasión, etc.) requieren una resistencia mecánica y densidad elevadas, las que sólo se alcanzan con una apropiada distribución granulométrica interna.

Al material con la granulometría correcta se le agrega una pequeña y bien controlada cantidad de agua (el grado de humedecimiento de la pasta depende de la variedad de ladrillo de que se trate). La pasta húmeda, y con el grado de trabajabilidad requerido, se compacta dentro de un molde por prensas mecánicas de gran presión, que además de compacidad dan al ladrillo las dimensiones deseadas.

De la intensidad de la compactación dependen una parte importante de las características físicas del producto; hoy se realiza este proceso en prensas de cada vez mayor potencia y cuando además se emplea vacío en la compactación se logra una efectividad aun mayor.

Finalmente, el ladrillo crudo y ya prensado es secado lentamente para poder someterlo al proceso de cocción. La velocidad de calentamiento, la temperatura de cocción y la atmósfera en la cual se realiza, son también factores determinantes de gran parte de las propiedades físicas que tendrá finalmente el producto. Esta última etapa es decisiva en la calidad.

Arcillas.

Algunas consideraciones sobre las diversas fases del proceso productivo de los refractarios nos permitirán una mejor comprensión de los factores determinantes de su calidad.

En este trabajo nos referimos solamente a los refractarios de arcilla y de sílice, por ser los de mayor consumo y estar su producción más desarrollada en nuestro país.

Las arcillas son materiales a base de silicatos de aluminio hidratados, que en general se caracterizan por su plasticidad. En el proceso de cocción de la arcilla se produce una disminución de su peso y volumen. La pérdida de peso se debe principalmente a la liberación del agua de absorción y de combinación química. La retracción volumétrica se debe a la liberación de agua y a las modificaciones de la estructura interna del material por efecto de la cocción y toma valores similares a los que se muestran en el ejemplo de la Fig. 1.

Otra característica de la arcilla calcinada es que su resistencia mecánica aumenta con la cocción cuando se alcanzan temperaturas tan elevadas como para permitir la pérdida total de agua, la formación de una masa vítrea y la cristalización de sus componentes. De tal manera que la temperatura de cocción determina la capacidad de un refractario para soportar sollicitaciones mecánicas.

La porosidad del refractario de arcilla está también relacionada con la temperatura de cocción, si bien en forma inversa que la retracción volumétrica.

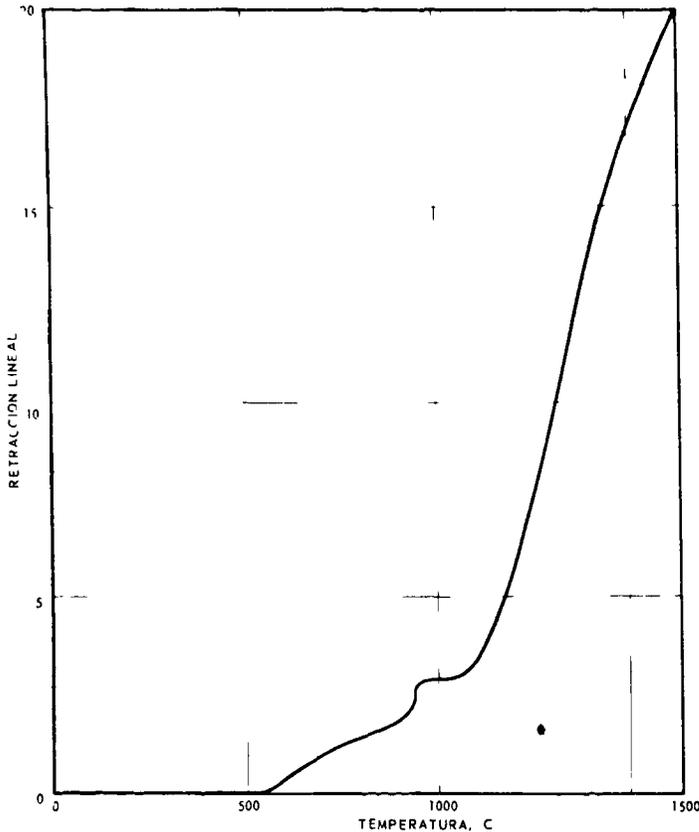


Fig. 1. Retracción de una arcilla en función de la temperatura de cocción. (Norton²).

Esto puede verse en la Fig. 2, que se refiere al caso de un refractario de arcilla representativo. Es siempre deseable reducir a un mínimo la retracción y existen para tal efecto variados procedimientos. La porosidad es también de gran importancia: Una baja porosidad dará una mejor resistencia al ataque de escorias e incrementará la conductividad térmica, mientras que una alta porosidad será necesaria en los ladrillos de aislación.

La retracción y porosidad pueden controlarse en el moldeo y en la cocción: Una mayor presión de compactación produce una menor retracción y porosidad. También una mayor temperatura de cocción da una menor porosidad.

El método de compactación en caliente, aun cuando no es un procedimiento usual y sólo se aplica a la obtención de refractarios especiales y de alta calidad, es un ejemplo que ilustra el comportamiento en relación a estas propiedades:

Si un material pulverizado se calienta a una temperatura algo inferior a la de ablandamiento, tiende a sinterizar y aproximarse gradualmente a una masa no porosa. Si se hace esto bajo presión, la sinterización se acelera y se logra la masa compacta, antes y a una menor temperatura. Con esto, se pueden producir refractarios de baja porosidad, que por el método convencional son de difícil obtención. Hay incluso una menor retracción en la cocción y se pueden

lograr productos de dimensiones más precisas. Es un proceso rápido para el que no se necesita una granulometría muy ajustada, ni el empleo de aglomerantes.

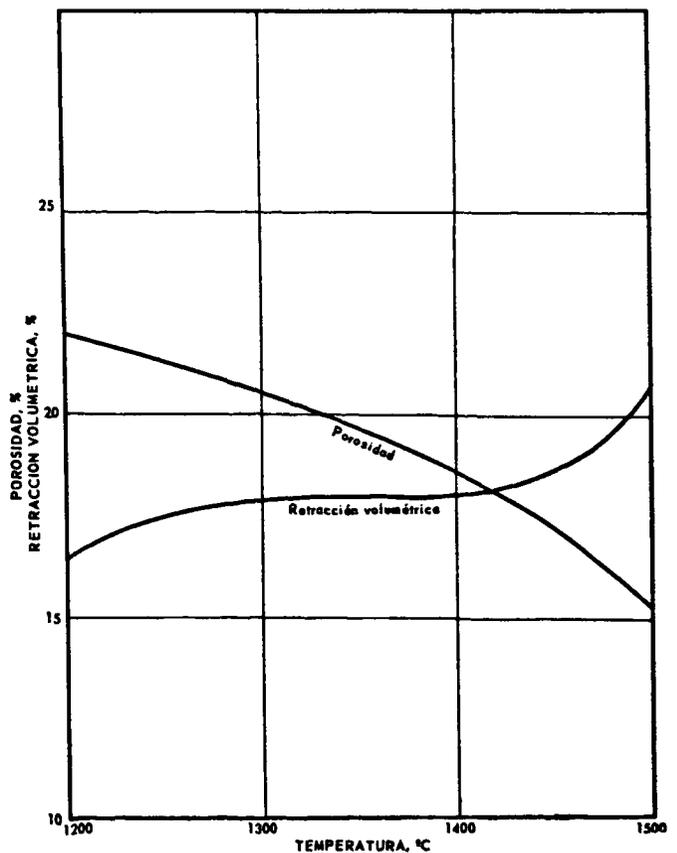
Sílice.

Los refractarios de sílice provienen principalmente de minerales de cuarzo. El cuarzo, por calentamiento, puede transformarse en otras variedades de sílice - tridimita y cristobalita - las cuales, incluido el cuarzo, tienen además variedades que se forman a alta y a baja temperatura. Esta transformación del cuarzo a tridimita o cristobalita, que son estables a altas temperaturas, puede facilitarse por el empleo de cal, fluoruros, óxido de titanio, etc. El cuarzo tiene una densidad mayor que la tridimita y la cristobalita y, por lo tanto, el proceso de conversión en la cocción va acompañado también de una variación de volumen.

Comportamiento con el calor.

Debe tenerse en cuenta también que gran parte del proceso de cocción de refractarios se realiza sin una fase líquida presente, es decir, las reacciones se realizan entre sólidos, y tienen lugar aparentemente debido a la pérdida de cohesión atómica que permite la difusión de los átomos dentro de la estructura².

Fig. 2. Retracción volumétrica y porosidad de un refractario de arcilla en función de la temperatura de cocción. (J. Am Ceram. Soc.²).



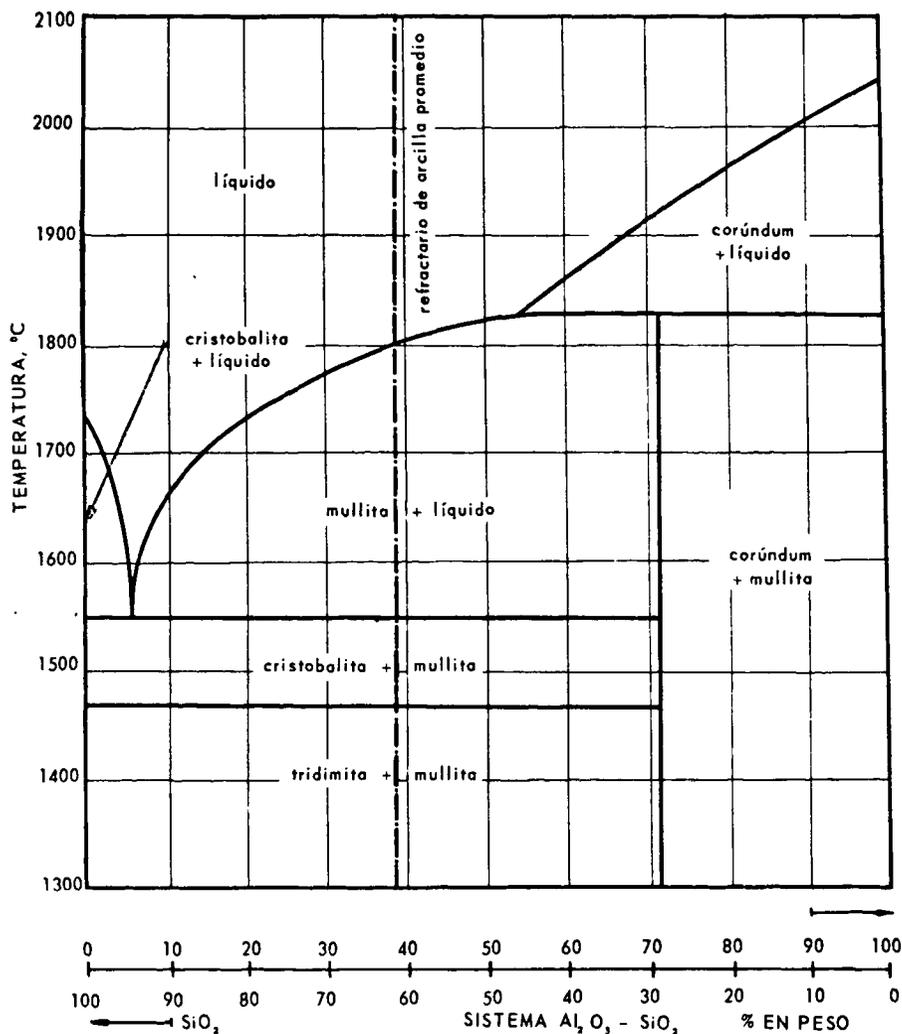


Fig. 3. Sistema $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, según Sosman²⁰.

El diagrama de fase de la Fig. 3, muestra en su curva superior la temperatura de fusión para cada proporción sílice-alúmina. De acuerdo a ese diagrama, el ladrillo refractario de arcilla promedio funde a 1.800°C; pero la presencia en él del eutéctico vítreo que funde a 1.550°C, es la causa de que este ladrillo experimente un ablandamiento antes de la fusión y no sea capaz de soportar cargas a temperaturas sobre 1.550°C. En el diagrama pueden verse los campos de formación de la tridimita y cristobalita, antes mencionadas. Se aprecia también que la refractariedad de los ladrillos de alto contenido de alúmina crece con dicho contenido, hasta llegar a los refractarios de corúndum. Los refractarios de mullita son de un empleo sólo ocasional en la industria.

En la Tabla I se puede ver que los ladrillos refractarios de arcilla contienen óxido de hierro, lo que debe tenerse en cuenta al interpretar la Fig. 3, ya que este óxido y la sílice forman un eutéctico que baja el punto de fusión in-

TABLA I
COMPOSICION TIPICA DE LADRILLOS REFRACTARIOS*, %.

Refractarios		Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Arcilla	Super duty	52	42	1,5	0,3	0,3	0,9	0,2	2,0
	High duty	55	39	2,0	0,3	0,3	0,9	0,2	1,6
	Low duty	62	29	6,0	0,5	1,0	0,05	0,05	1,6
Alta alúmina	50	41,8	51,8	1,8	0,1	0,5	1,3		2,7
	60	35,9	61,2	0,5	0,4	0,1	0,5		1,4
	70	22,7	70,8	1,8	0,1	0,3	0,9		3,7
	80	15,7	80,5	1,8	0,2	0,3	1,0		2,2
	Silice	96,4	0,75	0,5	2,0	0,08	- -		0,06

*Adaptada de "Industrial Furnaces"¹⁷, y modificada de acuerdo a las características de los productos nacionales.

dicado por el diagrama. Los refractarios de arcilla inferiores contienen también otros materiales que bajan aún más el punto de fusión, lo cual los incapacita para trabajos a altas temperaturas. Los ladrillos de más alta calidad (super duty y high duty) son fabricados a partir de arcillas con bajos contenidos de óxido de hierro y de otros fundentes.

Como casi todos los materiales, los refractarios se dilatan con la temperatura. El coeficiente de dilatación difiere sensiblemente de una variedad a otra, y para una misma variedad de refractario este coeficiente no es constante con la temperatura. En la Fig. 4, se representan algunas curvas de dilatación de refractarios. Es notable la acentuada dilatación que experimentan los refractarios de sílice a bajas temperaturas.

El conocimiento de las características de dilatación nos permite comprender mejor el mecanismo que produce una de las más frecuentes fallas de los refractarios: la fractura y desintegración por tensiones internas originadas en los cambios de volumen.

Un brusco cambio de la temperatura de un horno (trabajo discontinuo, p.ej.) o una excesiva refrigeración externa (p. ej. con agua), producirá dentro de la pared refractaria un pronunciado gradiente de temperatura que ocasionará dilataciones diferentes y, por tanto, tensiones internas que provocarán la fractura y desintegración del refractario. Por esto, y debido a la gran dilatación que experimenta el ladrillo de sílice en el intervalo hasta 650°C, este tipo de refractario no es indicado para trabajo discontinuo.

Los ladrillos de arcilla de alta calidad soportan bien estos cambios de temperatura, ya que su dilatación es moderada.

Por otra parte, los refractarios que tienen una alta conductividad térmica presentan una mejor resistencia a la desintegración por choque térmico. En ellos, las variaciones de temperatura en la superficie son rápidamente trans-

En la Tabla I se dan valores aproximados y representativos de la constitución química de algunos de estos refractarios. Esta Tabla no debe interpretarse como de requerimientos mínimos de alguna norma o como especificación para estos productos.

Ladrillos refractarios de arcilla.

Debido a la gran variedad de trabajos en que pueden ser empleados y a los altos niveles de calidad que logran alcanzar a precio relativamente bajo, los ladrillos refractarios de arcilla son los que ocupan el más alto porcentaje del total del consumo.

ASTM establece cinco clases de refractarios de arcilla. Cada clase queda definida por su refractariedad (CPE) y para las clases super duty y high duty se distinguen tres tipos. Los tipos de cada una de estas clases, aun cuando presentan el mismo grado de refractariedad, están definidos según pueda ser

TABLA II

CLASIFICACION Y EXIGENCIAS PARA LOS REFRACTARIOS DE ARCILLA SEGUN ASTM^{*}

Clase	Tipo	CPE	Pérdida por	Deformación	Cambio lineal	Resistencia a		Otros requere-
			desint. cho-	bajo carga	remanente por	la flexión,	requerimientos	
			que térmico,	en caliente,	calentamiento,	mín.	psi	kg/cm ² *
			máx., %	máx., %	máx., %			
Super duty	Resist. desint. choque térmico	33	4	---	1	600	42,2	---
	Resist. sollicitaciones mecánicas	33	---	---	---	1000	70,4	Densidad, mín. 2,24 g/cm ³ .
	Uso en general	33	8	---	1	600	42,2	---
High duty	Resist. desint. choque térmico	31½	10	---	---	500	35,3	---
	Resist. sollicitaciones mecánicas	31½	---	---	---	1200	84,4	Densidad, mín. 2,19 g/cm ³ ; Porosidad, máx. 15%
	Uso en general	31½	---	---	---	---	---	---
Semi-silice		---	---	1,5	---	300	21,1	Cont. sílice, mín. 72%
Medium duty		29	---	---	---	500	35,3	---
Low duty		15	---	---	---	600	42,2	---

* Valores calculados a partir de los dados en psi y lb/ft³ por ASTM.

empleados en trabajos que impliquen una sollicitación normal, de bruscos cambios de temperatura, o de fuerte acción de escorias u otros agentes agresivos.

La clasificación y exigencias que hace ASTM para los refractarios de arcilla⁴ se da en la Tabla II. Esta clasificación proporciona una lista de refractariedad decreciente, pero, sólo se la puede considerar como una aproximación en cuanto a clasificación según calidad en general.

Las temperaturas correspondientes a cada grado de refractariedad (CPE) se dan en la Tabla III.

TABLA III
TEMPERATURAS EQUIVALENTES DE LOS CONOS PATRONES*

Cono nº	Temp. °C	Cono nº	Temp. °C
12	1337	31	1683
13	1349	31½	1699
14	1398	32	1717
15	1430	32½	1724
16	1491	33	1743
17	1512	34	1763
18	1522	35	1785
19	1541	36	1804
20	1564	37	1820
23	1605	38	1835
26	1621	39	1865
27	1640	40	1885
28	1646	41	1970
29	1659	42	2015
30	1665	--	--

* ASTM⁵.

Los procedimientos de ensayos de desintegración por choque térmico, resistencia bajo carga en caliente, deformación lineal remanente, etc., se describirán más adelante.

Super duty

Es la clase de refractario de arcilla de más alta calidad. Son fabricados de arcilla con bajos contenidos de óxido de hierro y de otros fundentes. Son indicados para soportar muy severas condiciones de trabajo.

ASTM exige que no tenga una refractariedad inferior a un CPE de 33. Se distinguen los tres tipos indicados:

- El tipo que presenta una gran resistencia a la desintegración por bruscos cambios de temperatura.
- El segundo tipo, más denso que los otros dos, presenta una elevada resistencia a las sollicitaciones mecánicas. Es el tipo que soporta mejor el desgaste, y la acción agresiva de escorias, gases y otros agentes. Posee una gran resistencia bajo carga en caliente y experimenta sólo

pequeñas deformaciones en esas condiciones.

- c) El tercer tipo es apto para trabajo continuo a elevadas temperaturas o para cualquier trabajo que no implique grandes cambios de temperatura o sollicitaciones mecánicas intensas.

Algunos super duty, si son sometidos a una cocción de 70 a 150°C por sobre lo usual para este tipo de refractario, adquieren una gran resistencia mecánica y estabilidad de volumen a altas temperaturas. Presentan también una elevada resistencia a la corrosión y a la desintegración por deposición de carbón en una atmósfera de monóxido de carbono, conforme a lo indicado anteriormente respecto a la influencia de la temperatura de cocción sobre las propiedades finales del refractario.

Aun cuando no es exigencia de la norma, es usual encontrar un contenido de alúmina de 40 a 44% en los diferentes tipos de super duty. Ver Tabla I.

High duty

Es un refractario también de alta calidad. Ofrece las más amplias posibilidades de empleo. Si no se llega a sollicitaciones extremas, para las cuales el super duty sería el indicado, el high duty presenta excelentes características de trabajo. Por esto y por su bajo precio es consumido en una proporción mayor que todos los otros refractarios pesados juntos.

Ofrece gran estabilidad de volumen a altas temperaturas y experimenta sólo pequeñas deformaciones en el trabajo bajo carga en caliente. Soporta bien los bruscos cambios de temperatura y su alta densidad le permite soportar bien el desgaste por abrasión y el ataque de gases o agentes agresivos.

Posee una alta refractariedad y ASTM le exige un CPE mínimo de 31½, que es la característica principal de esta clase de refractario de arcilla.

Además de las características generales que se han dado para la clase high duty, es posible desarrollar otras, mediante algunas modificaciones en el proceso de fabricación. Igual que en los super duty, es posible distinguir los tres tipos: resistentes a la desintegración por choque térmico, resistentes a las sollicitaciones mecánicas, o para uso en general.

Los high duty, por su mayor resistencia a la desintegración por choque térmico son preferidos a los medium y low duty para un trabajo a temperaturas moderadas, pero sometidos a continuos y bruscos cambios de temperatura.

Semi - sílice.

Son refractarios a los que no se les puede exigir una muy alta refractariedad; ésta, aun cuando no es exigencia de norma, suele ser la que les corresponde por el lugar que ocupa en la clasificación: entre high duty y medium duty.

Presentan una buena estabilidad de volumen a altas temperaturas y experimentan sólo pequeñas deformaciones en el trabajo bajo carga en caliente.

Tienen sólo una resistencia regular a las sollicitaciones mecánicas severas (poseen una baja resistencia a la flexión).

No son aptos para un trabajo en el que estén sometido a continuos y bruscos cambios de temperatura. Sin embargo, para un trabajo dentro de las temperaturas admisibles para esta variedad, muestran una elevada resistencia a la vitrificación y a la desintegración por cambios en la estructura del material. En servicio se desarrolla una capa vítrea superficial que retarda la penetración y corrosión y reduce la desintegración estructural. Resiste bien la penetración de humos alcalinos y escorias.

Lo principal para definir al semi-sílice es el análisis químico y el ensayo de control de comportamiento bajo carga en caliente.

Medium duty.

Son sólo aptos para un trabajo no muy severo. Su empleo puede resultar económico para un trabajo continuo, sin estar sometidos a grandes sollicitaciones mecánicas ni bruscos cambios de temperatura.

Dentro de las temperaturas de trabajo permitidas por esta variedad, presenta buenas características de estabilidad de volumen y de deformación por efecto de cargas.

Low duty.

Son los ladrillos refractarios de arcilla de más baja calidad. Se emplean sólo para trabajo a temperaturas moderadas y sin sollicitaciones severas. Su empleo más difundido es como base o refuerzo para ladrillos de alta refractariedad.

Ladrillos refractarios de alta alúmina.

Están entre los mejores refractarios que se conocen, tienen una muy alta refractariedad. Como se vió en la Fig. 3, la refractariedad sube con el incremento del contenido de alúmina. Su alta calidad y precio son factores opuestos que hacen que se justifique su empleo, sólo en casos calificados y extremos.

Son ladrillos aptos para variados propósitos y pueden ser empleados para trabajos hasta temperaturas cercanas a los 1.650°C. Tienen una gran resistencia al ataque químico de un gran número de gases y escorias. Son de una gran densidad, creciente de acuerdo al contenido de alúmina. Esta alta densidad les proporciona una buena resistencia a las sollicitaciones mecánicas y algunos de ellos soportan bien los bruscos cambios de temperatura, según la clase y la fabricación.

De acuerdo a su contenido de alúmina se pueden distinguir varias clases: En Chile se dispone de las clases con 50, 60, 70 y 80% de alúmina. La clasificación de ASTM⁴ se basa en este contenido y el correspondiente grado mí-

nimo de refractariedad.

Experimentan deformaciones bajo carga en caliente pero usualmente ésta no es muy alta. La estabilidad de volumen a altas temperaturas de las clases 60 y 70, no es muy buena.

En la Tabla IV se da la clasificación de ASTM y sus exigencias mínimas.

TABLA IV
CLASIFICACION DE LADRILLOS REFRACTARIOS DE
ALTA ALUMINA SEGUN ASTM⁴

Clase	CPE	Cont. Alúmina ± 2.5%
50	34	50
60	35	60
70	36	70
80	37	80

Ladrillos refractarios de sílice.

Aunque su refractariedad depende fundamentalmente de la composición (factor de fundentes), en general es menor que la de los refractarios de alta alúmina y del orden de la de los de arcilla de más alta refractariedad.

Como se dijo antes, estos refractarios presentan algunas peculiaridades de comportamiento que limitan su empleo. La más importante de ellas es su elevado coeficiente de dilatación a bajas temperaturas que provoca tensiones internas destructoras si se someten a un trabajo discontinuo. Sin embargo, para un trabajo continuo a temperaturas por encima de los 650°C, sí presentan una alta resistencia a la desintegración.

Tienen una densidad relativamente baja y una alta constancia de volumen a temperaturas elevadas. Poseen buenas características de resistencia mecánica y conductividad térmica.

Son fabricados a partir de minerales de cuarzo con un alto contenido de sílice, no inferior al 98%, que les confiere su alto grado de refractariedad, ver Fig. 3.

La temperatura de cocción debe ser suficientemente alta como para conver-

TABLA V
REQUISITOS PARA LOS LADRILLOS REFRACTARIOS
DE SILICE SEGUN ASTM⁵

	Cont. máx. %	Mín. kg/cm ²
Alúmina (Al ₂ O ₃)	1,5	
Oxido de titanio (TiO ₂)	0,2	
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	1,0	
Cal (CaO)	4,0	
Resistencia a la flexión		35

tir el cuarzo en tridimita y cristobalita, que son estables a altas temperatura.

Según la clasificación de ASTM⁵, deben cumplir las exigencias de la Tabla V.

Además, según esta norma, los ladrillos refractarios que satisfacen estas exigencias son clasificados según el factor de fundentes. Se define el factor de fundentes como el valor total que da al sumar al porcentaje de alúmina el doble del porcentaje de álcalis (sodio y potasio principalmente). Según esta manera de clasificar, se distinguen dos tipos:

Tipo A: Factor de fundentes no superior a 0.5.

Tipo B: Factor de fundentes superior a 0.5.

La razón de considerar la alúmina y álcalis como impurezas y de cuantificarlas según el factor de fundentes, se puede encontrar si se considera nuevamente la Fig. 3. El eutéctico y otros fundentes (Tabla I) producen una baja del punto de fusión y de la temperatura de ablandamiento del refractario.

Comercialmente se producen dos tipos: Super duty, con un factor de fundentes inferior a 0.5; convencional, factor de fundentes superior a 0.5 e inferior a 1.0.

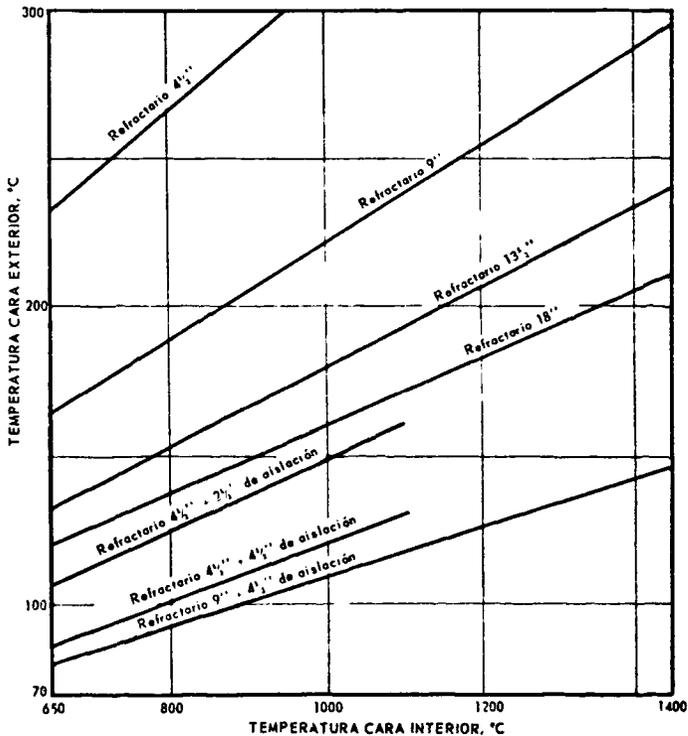


Fig. 6. Temperatura de la cara exterior de un horno en función de la temperatura de la cara interior. Varios espesores de pared de refractarios de arcilla, con y sin aislamiento (G20). (Industrial Furnaces¹⁷).

Ladrillos refractarios aislantes térmicos.

Los ladrillos de aislación térmica son refractarios livianos y porosos que poseen una mucho menor conductividad térmica que los refractarios pesados.

Su empleo presenta en general grandes ventajas, como: economía de combustible, menor tamaño y peso del horno, aumento de producción, mayor seguridad de operación, etc.

Su conductividad térmica, comparada con la de los refractarios pesados, se da en la Fig. 5, y la efectividad de la aislación que proporciona este material se puede apreciar en las Figs. 6 y 7.

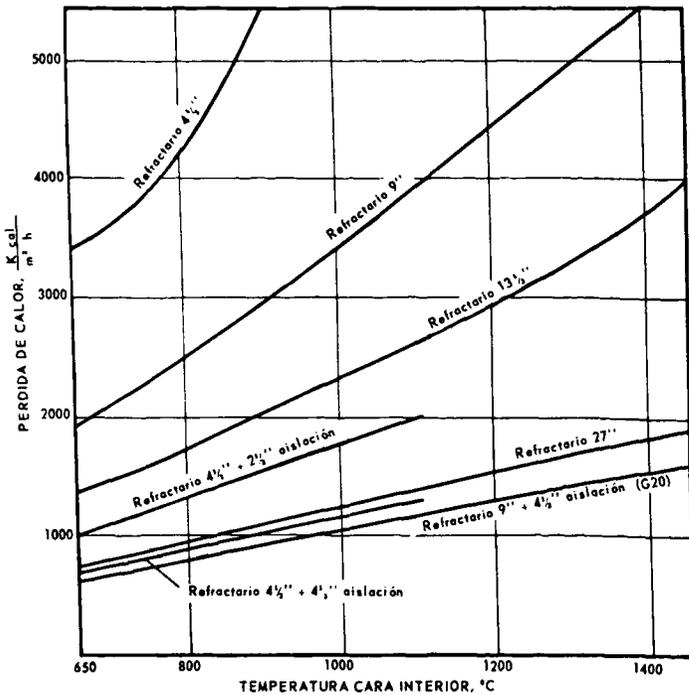


Fig. 7. Pérdida de calor por la pared de un horno en función de la temperatura de la cara interior. Varios espesores de pared de refractarios de arcilla, con y sin aislación (G20). En la práctica las pérdidas pueden ser hasta un 30% superiores a estos valores. (Industrial Furnaces¹⁷).

La conductividad está relacionada con la densidad del material, por lo que la medida de esta última suele ser un medio de control indirecto de aquella.

Se fabrican con diatomáceas vermiculita, perlita, arcillas refractarias, arcillas de alta alúmina, alúmina calcinada u otras materias. En Chile es frecuente obtenerlos con arcilla, diatomáceas y un elemento combustible (aserrín) que se mezcla con la pasta cruda para dar mayor porosidad al eliminarse durante la calcinación; también se emplea en la actualidad perlita expandida.

La porosidad puede también ser variada por la compactación.

ASTM⁶ clasifica los ladrillos aislantes según su deformación lineal remanente y su densidad, Tabla VI.

Estas dos propiedades nos indican en parte las características de la estructura interna del material, la que a su vez es determinante de la calidad del

ladrillo como aislante térmico.

TABLA VI
CLASIFICACION DE LADRILLOS REFRACTARIOS AISLANTES
SEGUN ASTM⁶.

Grupo*	Cambio lineal remanente, no mayor de 2% a, °C	Densidad, lb/ft ³	Densidad, gr/cm ³ **
16	845	34	0.544
20	1.065	40	0.641
23	1.230	48	0.769
26	1.400	54	0.865
28	1.510	60	0.961

*El número del grupo multiplicado por 100 representa, en °F, la temperatura máxima a la que el ladrillo puede ser puesto en servicio.

**Valores calculados a partir de los dados en lb/ft³ por ASTM.

En la Fig. 8 están representadas las curvas de conductividad térmica para los diferentes grupos de ladrillos aislantes.

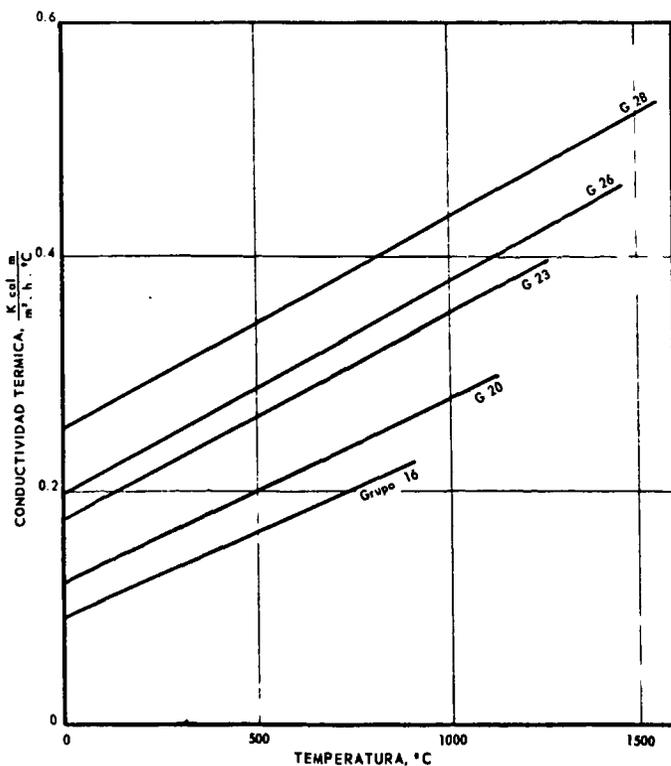


Fig. 8. Conductividad térmica media de ladrillos refractarios aislantes en función de la temperatura. (Industrial Furnaces¹⁷).

En la Tabla VII se dan algunos valores usuales de las características principales de los ladrillos aislantes.

TABLA VII
VALORES TÍPICOS DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LADRILLOS REFRACTARIOS

Grupo	Temp. máx. de trabajo		Densidad		Punto fusión °C	Resist. a la flexión en frío kg/cm ²
	°F	°C	lb/ft ³	gr/cm ³		
16	1600	871	25-34	0.40-0.54	1480	3.5 - 5.0
20	2000	1093	30-40	0.48-0.64	1500	6.5 - 8.0
23	2300	1260	35-45	0.56-0.72	1500	8.0 - 12.0
26	2600	1427	45-54	0.72-0.86	1650	11.0 - 14.0
28	2800	1538	50-60	0.80-0.96	1750	14.0 - 18.0

CONSIDERACIONES GENERALES

Para construir un horno, la elección del elemento refractario debe estar basada en tres factores fundamentales: el conjunto de sollicitaciones a que puede estar sometido dicho elemento como parte integral del horno, las propiedades que ofrecen las diferentes variedades de refractarios y el precio de cada variedad.

Sollicitaciones.

De la gran cantidad de sollicitaciones que afectan la duración de los hornos indicamos las que generalmente son decisivas: temperatura de trabajo; variaciones de temperatura; efectos químicos de óxidos, compuestos sulfúricos y escorias; oxígeno y otros gases a altas temperaturas; vapor y agua; carga (peso); desgaste por movimiento de sólidos; vibraciones; fundaciones, y explosiones.

Propiedades y ensayos.

Como se dijo al comienzo, el conjunto de propiedades se pueden reunir en cuatro grupos: Grado de refractariedad, resistencia mecánica, estructura interna y comportamiento químico.

Para determinar estas propiedades se dispone del siguiente repertorio de ensayos usuales:

1. Deformación lineal remanente.

Un refractario, al ser sometido a calentamiento, experimenta variaciones en sus dimensiones, que permanecen incluso después de enfriado el ladrillo. Esta propiedad se determina mediante un ensayo en condiciones normalizadas.

Según ASTM⁷ se deben emplear probetas de $9 \times 4\frac{1}{2} \times 2\frac{1}{2}$ ''

El calentamiento se hace en un horno de atmósfera oxidante y sin que la llama golpee directamente a la probeta. La velocidad de calentamiento y la máxima temperatura están especificadas.

Se exige este ensayo para los super duty y los ladrillos aislantes térmicos.

2. Cono pirométrico equivalente.

Por este método se determinan las características de ablandamiento y fusión de los refractarios, antes enunciadas.

Se puede definir el punto de fusión como la temperatura a la cual el material se pone lo suficientemente fluido como para escurrir a una velocidad especificada. Experimentalmente, debido a dificultades de operación, no se realiza así, sino por comparación de su comportamiento y el de probetas patrón, por lo cual este método se denomina cono pirométrico equivalente (CPE).

Según ASTM⁸, con el material a ensayar finamente molido, se forman pirámides como las que se muestran en la Fig. 9, a las que se llama "conos",

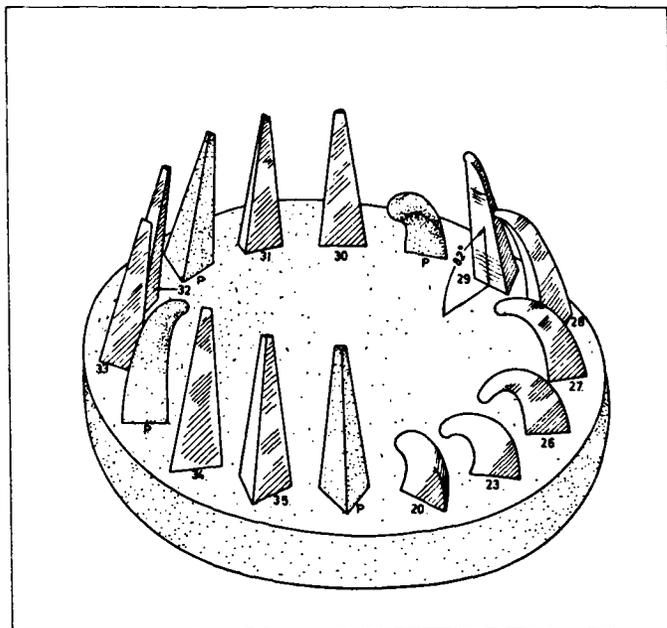


Fig. 9. Montaje de los conos y aspecto después del ensayo. Conos patrón (numerados) y de prueba (P). (ASTM⁸)

debido a que en un tiempo las probetas eran cónicas. Estas pirámides junto con otras (de una temperatura de ablandamiento conocida) se montan en una placa. Esta placa con sus conos se somete al calentamiento de prueba en un horno, de preferencia de atmósfera oxidante.

Debido a la inclinación hacia el centro de la placa (82°) que se le ha dado a todos los conos, caen para el interior, indicando su posición y estado, el ablandamiento a la temperatura del ensayo. Como resultado, se da el número del cono patrón que cae simultáneamente con el cono de prueba. En la Tabla III aparecen las temperaturas equivalentes a cada cono.

Este ensayo es exigencia para casi todos los refractarios pesados: de arcilla y alta alúmina.

3. Dimensiones y densidad⁹.

Son ensayos sencillos de realizar y se deben hacer en todo caso en que sea importante la exactitud de las dimensiones. Bastará con medir y pesar exactamente la unidad a ensayar.

La densidad es exigencia para los super duty que se desea sean resistentes a sollicitaciones mecánicas y de escorias. La densidad es también importante en la clasificación y control de los ladrillos aislantes térmicos.

4. Análisis químico¹⁰.

Es un ensayo largo y que sólo se justifica en casos especiales.

En la Tabla I se han dado valores que son usuales para la composición de los diferentes refractarios.

Se exige, a efecto de clasificación y control, para los ladrillos refractarios de alta alúmina, semi-sílice y sílice.

5. Resistencia a la compresión en frío¹¹.

Nos permite tener información de la capacidad del refractario para soportar sollicitaciones mecánicas. Se realiza en una prensa hidráulica o mecánica, comprimiendo la probeta hasta su ruptura. Se informará de la presión soportada.

6. Resistencia a la tracción por flexión¹¹.

Este ensayo se hace también en frío y da información sobre la resistencia mecánica del refractario. Se hace cargando el ladrillo en el centro, cuando está apoyado en sus extremos en condiciones normalizadas. Se puede emplear la misma prensa que para la compresión en frío.

Se exige esta prueba en el control de los ladrillos refractarios de arcilla y sílice.

7. Desintegración por choque térmico.

Como antecedente, indicaremos que se pueden distinguir tres tipos de fractura y desintegración: desintegración mecánica (fractura debida a impacto o presiones), desintegración estructural (fractura debida a tensiones surgidas por cambios no uniformes en la estructura interna del material), y desintegración térmica (fractura debida a tensiones internas, producto de variaciones volumétricas no uniformes del material por diferencias de temperatura).

El estudio de la respuesta del refractario ante estas dos últimas sollicitaciones se realiza en la prueba llamada de "desintegración por choque térmico". Con esta prueba se intentan reproducir las más severas condiciones de trabajo y es el procedimiento fundamental para determinar la resistencia del ladrillo refractario a los bruscos cambios de temperatura.

El ensayo según ASTM¹², consiste en lo siguiente: Con aproximadamente unos 14 ladrillos, previamente pesados, y un aglomerante, se construye un panel. Este panel se somete primero a un proceso de precalentamiento en un horno especial, a una temperatura especificada (1.600 a 1.650°C) durante 24

horas.

Después del precalentamiento, se lleva el mismo panel a un conjunto de horno y enfriador de aire y agua, para someterlo a un número especificado de ciclos, de 20 minutos cada uno, los cuales consisten en un calentamiento y enfriamiento repentinos. El calentamiento se realiza a una temperatura de 1.400°C, durante 10 minutos.

Se pone fin al tratamiento térmico dejando enfriar naturalmente el panel. Una vez frío se desarma y se raspa de cada ladrillo la cáscara quemada que se haya formado por el tratamiento. Se pesan nuevamente y se especifica la pérdida de peso porcentual.

Por requerir este ensayo un equipo especial costoso, del que no es frecuente disponer, sugerimos la posibilidad de hacerlo según el método de las normas DIN¹⁶, que es más asequible. Según ellas, el ensayo se hace viendo el número de ciclos de calentamiento en horno y enfriamiento por inmersión en agua, que soporta la probeta hasta su desintegración.

8. Resistencia bajo carga en caliente¹³.

Con este ensayo se determinan la deformación de los ladrillos refractarios bajo carga y a elevada temperatura. Se especifica la deformación porcentual.

9. Porosidad¹⁴.

Es también una prueba que proporciona conocimiento de la estructura interna del material, es simple y fácil de realizar. Es de importancia hacer este ensayo en los casos en que se necesita un severo control del refractario: refractarios muy densos y muy exigidos por solicitaciones mecánicas y ladrillos aislantes térmicos.

Se calcula la porosidad aparente simplemente comparando el peso del refractario saturado de agua con el peso del mismo seco, y considerando su volumen. Se llama porosidad aparente, ya que no se consideran los poros sellados.

Se puede calcular también por el mismo método la absorción de agua del refractario.

10. Conductividad térmica.

La medida de la conductividad a altas temperaturas es un ensayo difícil y para realizarlo exactamente de acuerdo a normas ASTM¹⁵ se requiere un equipo complejo y costoso. Esencialmente consiste en medir el ascenso de temperatura que experimenta el agua de un calorímetro que recibe el calor que fluye a través de un panel de refractario. Este paso de calor se realiza a diferentes temperaturas para obtener las curvas correspondientes de temperatura - conductividad.

En lo que respecta a clasificación y control, no es exigencia de norma cumplir con una determinada conductividad, pero sí es necesario su conocimiento

para el correcto cálculo del horno. En los ladrillos de aislación térmica basta conocer la densidad y porosidad para tener una información aproximada de la conductividad: una baja densidad y elevada porosidad indican pequeña conductividad térmica.

Precios relativos.

El factor económico es, en general decisivo en la elección del refractario.

A continuación, como información complementaria, se da una relación de los precios en el mercado interno referidos todos al medium duty. Se debe tomar esta lista sólo como una guía y no como una tabla de calidades crecientes o decrecientes, y además, las frecuentes variaciones que experimentan los precios, hacen necesario considerarla sólo como una ayuda y no como un conjunto estático de datos.

Medium duty	100
High duty	114
Super duty	142
Sílice convencional	100
Sílice super duty	112
Alta alúmina 50	197
Alta alúmina 60	222
Alta alúmina 70	258
Alta alúmina 80	356

REFERENCIAS

1. LLAVONA, F. "La elección de los materiales refractarios". Revista del IDIEM, vol 4, nº 1, mayo 1965.
2. NORTON, F.H. "Refractories", Mc. Graw-Hill Book Company, Inc., 1949.
3. ASTM. American Society for Testing and Materials. 1916 Race St., Philadelphia, Pa. 19103. Las referencias del 4 al 15 han sido tomadas de la última edición: ASTM Standards 1964, Part 13.
4. ASTM C 27-60. "Classifications of Fireclay and High Alumina Refractory Brick".
5. ASTM C 416-60. "Classifications of Silica Refractory Brick".
6. ASTM C 155-57. "Classifications of Insulating Fire Brick".
7. ASTM C 113-61. "Methods of Test for Reheat Change of Refractory Brick".
ASTM C 210-61. "Methods of Test for Reheat Change of Insulating Fire Brick".
8. ASTM C 24-56. "Methods of Test for Pyrometric Cone Equivalent (PCE) of Refractory Materials".
9. ASTM C 134-41. "Methods of Test for Size and Density of Refractory Brick".
ASTM C 437-61. "Methods of Test for Size and Bulk Density of Insulating Fire Brick".
10. ASTM C 18-60. "Methods of Test for Chemical Analysis of Refractory Materials".
11. ASTM C 133-55. "Methods of Test for Crushing Strength and Modulus of Rupture, Cold, of Refractory Brick and Shapes".
ASTM C 93-54. "Methods of Test for Crushing Strength and Modulus of Rupture of Insulating

- Fire Brick at Room Temperature".
12. ASTM C 38-58. "Methods for Panel Spalling Test, Basic Procedure in, for Refractory Brick"
 - ASTM C 122-52. "Methods for Panel Spalling Test, for Super Duty Fireclay Brick".
 - ASTM C 107-52. "Methods for Panel Spalling Test, for High Duty Fireclay Brick".
 - ASTM C 439-61. "Methods of Test for Thermal Spalling of Silica Brick, Resistance to".
 13. ASTM C 16-62. "Methods of Test for Refractory Brick Under Load at High Temperatures".
 14. ASTM C 20-46. "Methods of Test for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick".
 15. ASTM C 201-47. "Methods of Test for Thermal Conductivity of Refractories".
 - ASTM C 202-47. "Methods of Test for Thermal Conductivity of Fireclay Refractories".
 - ASTM C 182-47. "Methods of Test for Thermal Conductivity of Insulating Fire Brick".
 16. DIN 1068, julio 1931. (Deutsche Normen). "Bestimmung des Widerstandes gegen schoffen Temperaturwechsel".
 17. TRINKS, W. and MAWHINNEY, M.H. "Industrial Furnaces", vol 1. 5a edición. John Wiley and Sons, Inc., Publishers.
 18. HAVARD, F.T. "Refractories and Furnaces", Mc Graw-Hill Book Company, Inc.,
 19. PEREVALOV, V.I. "Technology of Refractories", Metallurgizdat, Moscow, 1944.
 20. SOSMAN, R.B., Journal American Ceramic Society, 1933, pág 65.

Jorge BERTINI C.

Sección Investigación Química, IDIEM