



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

**FACULTAD DE QUIMICA**

**TESIS DONADA POR  
D. G. B. - UNAM**

**Fabricación de Refractarios  
Silico-Aluminosos  
Acidos en México**

**Trabajo Monográfico**

**GOMEZ OROZCO MARIO CANDIDO**

**INGENIERO QUIMICO METALURGICO**

---

**1983.**



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.

# INDICE

## PROLOGO

## I INTRODUCCION

- 1.1 Materiales refractarios.
- 1.2 Importancia de los refractarios.
- 1.3 Historia de los refractarios.
- 1.4 Refractarios en México.

## II NATURALEZA DE LOS REFRACTARIOS

### 2.1 Clasificación General.

- a.- Ladrillos de arcilla.
- b.- Ladrillos de calidad superior y alta.
- c.- Ladrillos de alta alúmina.

### 2.2 Ladrillos aislantes.

#### a.- Clasificación

#### b.- Grupos

### 2.3 Ladrillos de sílice.

#### a.- Clasificación

### 2.4 Concretos refractarios.

#### a.- Clasificación

#### b.- Clases

### 2.5 Refractarios plásticos y apisonables a base de arcilla

y alta alúmina.

#### a.- Clasificación

#### b.- Clases

### 2.6 Refractarios de mulita.

#### a.- Clasificación

### 2.7 Refractarios de zircón.

#### a.- Clasificación

#### b.- Tipos

2.8 Ladrillos de cromo; cromo-magnesita; magnesita-cromo y magnesita.

a.- Clasificación

b.- Clases

2.9 Dolomita granular refractaria.

a.- Clasificación

b.- Clases

### III MATERIAS PRIMAS

3.1 Arcillas

a.- Clasificación de minerales arcillosos

b.- Estructura cristalina

3.2 CaoLín

3.3 Materiales de alto contenido de alúmina.

a.- Procesos generales para la obtención de alúmina.

b.- Secuencia de transición en la deshidratación de alúmina hidratada.

3.4 Minerales de tipo  $Al_2SiO_5$

3.5 Sílice

3.6 Sistema  $Al_2O_3-SiO_2$

3.7 Extracción de arcillas

3.8 Trituración y molienda de materias primas para re -  
fractarios.

3.9 Tamizado

3.10 Almacenamiento de materias primas.

3.11 Mecanismos de segregación.

a.- Separación de finos

b.- mecanismo de ángulo de reposo

c.-Fricción superficial en los canales

d.- Efecto de fluidización

e.- Efecto dinámico

f.- Efecto cohesivo

g.- Efecto de la trayectoria

#### IV FABRICACION

##### 4.1 Métodos de moldeo.

a.- Trabajabilidad de arcillas

b.- Masa plástica

c.- Proceso de moldeo

d.- Barbotina

e.- Moldes

##### 4.2 Proceso de extrusión y corte por alambre.

##### 4.3 Proceso de prensado en seco.

a.- Granulometría de la chamota

b.- Tipo de empaque

c.- Forma de la partícula

##### 4.4 Secado.

a.- Proceso durante el secado

b.- Contracción

c.- Conductividad de la humedad

- d.- Dilatación elástica
- e.- Curva de secado óptima
- f.- Importancia de las magnitudes físicas del secado relacionadas con el material
- g.- Comparación de tiempos entre el secado en tres etapas y el secado con calentamiento simultaneo
- h.- Distintas formas de representación de la curva de secado óptima
- i.- Representación técnica de la curva óptima de secado en función del material
- j.- Curva de secado óptima en la representación según los criterios de la técnica de los métodos operacionales
- k.- Influencia de la circulación en la curva óptima de secado

#### 4.5 Cocción

- a.- Sistema de control
- b.- Transmisión de calor
- c.- Hornos túnel

### V CONTROL

#### 5.1 Propiedades físicas en frío

#### 5.2 Resistencia de los ladrillos

- a.- Resistencia a la compresión
- b.- Módulo de ruptura

#### 5.3 Abrasión

#### 5.4 Propiedades químicas

#### 5.5 Comportamiento de los ladrillos bajo carga en altas temperaturas.

#### 5.6 Tensiones y cambios en las dimensiones debido al calentamiento.

#### 5.7 Cambios permanentes en el ladrillo refractario.

#### 5.8 Disgregación térmica.

#### 5.9 Punto de fusión.

#### 5.10 Transmisión de calor en refractarios.

### VI CONCLUSIONES.

### VII BIBLIOGRAFIA.

## PROLOGO

Para ladrillos refractarios, se hace una pasta de caolín con agua, de la cual se forman ladrillos, previo moldeo y cocción.

Estos ladrillos que conservan la blancura del caolín y se vuelven muy duros, se llaman "Ladrillos de Arcilla". Posteriormente se pulverizan en un molino y se tamizan, hasta un tamaño de partícula como de arenilla fina. Se mezcla luego con caolín sin coser y con cuarzo arenoso, se comprimen en moldes de tamaño y forma requerido y se cuece de la misma manera que anteriormente. Estos ladrillos son muy blancos y duros, y cuando se fracturan muestran su composición de ladrillo pulverizado y caolín.

Este es un informe preciso de la producción de ladrillos en los primeros tiempos, por parte de Norton y Feston. C. B. Adams geólogo del estado de Vermont, en U.S.A. en su informe anual (1845, en la página 52).

## I INTRODUCCION

### 1.1 Materiales refractarios.

Los materiales refractarios son generalmente clasificados por varios o más de los siguientes criterios.

- 1).- La habilidad de conservar su estado físico y químico cuando son expuestos a temperaturas elevadas superiores a 1500°C.
- 2).- La resistencia al choque térmico ( capaz de resistir calentamientos y enfriamientos rápidos).
- 3).- Resistencia a la abrasión.
- 4).- Bajo coeficiente de expansión.
- 5).- Soportar estructuras pesadas en altas temperaturas.
- 6).- Impenetrable ataque químico por sólidos, líquidos y gases calientes.
- 7).- Baja conductividad eléctrica.
- 8).- Termodinámicamente estable en altas temperaturas y en diferentes atmósferas.

Un material no necesariamente debe llenar todos los criterios debido a que no esta bien definida la línea de temperatura de refractarios separado de los no refractarios.

Desde el punto de vista comercial y dependiendo del uso a que se le destine el material refractario debe ser fácil de conseguir.

El término refractividad se relaciona solamente con la alta temperatura de fusión de las sustancias y se presenta solamente en siete tipos de sustancias; óxidos, carburos, nitratos, fluoruros, siliciuros, sulfuros y algunos elementos químicos.

Aunque cerca de 24 óxidos tienen puntos de fusión por encima de  $1725^{\circ}\text{C}$ , no todos pueden ser utilizados como materiales refractarios debido a diversas razones, como son: escasez y costo elevado, tendencia a la hidratación, radioactividad, inestabilidad, etc., por esa razón el total de materiales refractarios se reduce y está basado solamente en los óxidos ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y  $\text{ZrO}_2$  y en sus compuestos más refractarios.

El carbón se utiliza en grandes cantidades en una aplicación muy especial bajo condiciones reductoras o neutras.

Los materiales refractarios utilizados en gran escala se dividen en dos grupos principales: ácidos y básicos. Como su nombre lo indica, son utilizados y resisten las condiciones de su medio ambiente ácido y básico respectivamente.

Refractarios ácidos; sílice, silico-aluminoso, alta-alúmina ( $> 46\% \text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Refractarios básicos ; magnesita, magnesita-cromo o

cromo-magnesita, dolomita.

## 1.2 Importancia de los refractarios.

El campo de los materiales refractarios está creciendo continuamente dentro de la industria como aeronáutica, fuerza electroquímica, electrónica, nuclear, petróleo, acero y procesos metálicos. Esto es una consideración razonable ya que la tecnología moderna se debe mucho a la existencia de estas.

La fabricación de refractarios sílico-aluminosos (ácidos) requiere de un control adecuado desde su materia prima, procesamiento de manufactura, secado, cocción y selección con el fin de obtener garantía y calidad.

En la actualidad las diferentes calidades de materiales refractarios han sido clasificados por la D.G.N. (Dirección General de Normas), la cual uniformiza la calidad señalando algunas técnicas de ensayo. Es decir, si por ejemplo, señalamos la diferencia entre un ladrillo refractario de mayor o menor "densidad volumétrica" ignorando otros aspectos como "la baja refractabilidad", lo que causaría al consumidor un peligro potencial en determinadas aplicaciones. Es por eso que la D.G.N. señala que materiales refractarios deben reunir algunas propiedades, basadas en las técnicas de ensayo, como las sig.: Porosidad aparente, gravedad específica verdadera, re-

fractabilidad, etc., algunas de estas características son aplicables, por ladrillos, formas especiales en materiales refractarios.

### 1.3 Historia de los refractarios.

Existen pocos datos sobre los inicios de los materiales refractarios. Sólo se tienen algunas referencias de investigación. Un estudio casi arqueológico en los lugares de emplazamiento de los antiguos hornos de fundición y plantas, el cual daría seguramente muestras de los antiguos refractarios utilizados.

Sin duda, la primitiva industria del hierro que tuvo la necesidad de utilizar un refractario que suponemos debió haber sido roca de sílice, la que en algunos lugares se le llamó piedra para hornos.

La piedra se utilizó para construcción de fundiciones y forja según se sabe por documentos antiguos de la piedra pómez, se utilizó en las paredes de hornos de refractarios para cocción.

Muchas de las fundiciones de vidrio utilizaron probablemente crisoles de piedra y después de arcilla.

Debido al prematuro desarrollo de la manufactura del hierro y el vidrio se necesitaron los ladrillos refractarios. Los primeros ladrillos debieron ser los de arcilla, compuestos principalmente de caolín y cuarzo arenoso, como

se cita en el prólogo. Su materia prima la obtenían en la región. Conociendo la pureza del material daba confianza a su calidad, debido a que soportaba más tiempo a altas temperaturas.

Refractarios con alto contenido de alúmina.—La bauxita contiene principalmente el mineral de aluminio. Es usualmente una piedra rocosa, compuesta principalmente del óxido de aluminio hidratado, incluyendo gibbsita, diasporo y boemita. Impurezas principalmente en la forma de mineral arcilloso, cuarzo, óxidos de fierro invariablemente presentes. La bauxita fué descubierta en 1821 cerca de Les Baux en el sur de Francia y existe en todos los continentes exepcto en la Antartica. Las grandes reservas están en Guinea, Australia, Brasil, Jamaica, Cameron y la India.

Las reservas mundiales de bauxita son enormes, aproximadamente de 23 billones de toneladas métricas.

Los principales depositos de bauxita en los Estados Unidos se estiman en 2.5% de las reservas mundiales estan en Alabama, Arkansas y Georgia. El primer yacimiento descubierto en Estados Unidos, se encontro en Georgia en 1888. Los yacimientos de Arkansas se descubrieron en 1891.

Los depósitos sedimentarios de caolín en la costera de

Georgia constituyen probablemente la mayor reserva del mundo en cuanto a arcilla de mayor pureza . La utilidad de caolín para refractarios se conocía ya desde 1837, en Bennington, pero el caolín del sur es de mayor pureza y posee un punto de vitrificación mas alto, así como una gran contracción de cocción. Estas propiedades han impedido su uso, sin embargo, es posible darle uso.

Se ha dado tanta importancia a los ladrillos de los primeros tiempos por que se tiene un completo conocimiento de su producción y por que fueron los primeros en utilizarse con gran éxito los de caolín puro y refractario, aunque con gran contracción por el método de doble cocción. En su tiempo fueron realmente ladrillos de alta calidad, aún cuando hayan sido mencionados pocas veces en la historia de los refractarios.

Se cree que los primeros ladrillos de sílice fueron fabricados en 1842 por W.W. Young, en Gales del sur, a partir de las rocas de las canteras de Dinas. Más tarde, él mismo, fabricó ladrillos a partir de ganister. Probablemente los primeros ladrillos de sílice fabricados en Estados Unidos, fueron fabricados por J.P. Alexander de Akron, Ohio, en 1866, pero en 1859 ya se habían registrado una patente de Thomas James para un ladrillo de sílice aglomerado con cal, y es probable que lo hubiese pro

ducido incluso antes que Alexander. Naturalmente, los ladrillos de sílice aglomerados con cal yá se habían fabricado en Inglaterra con anterioridad. J.R. Thomas fabricó ladrillos de sílice para la industria de acero de Niles, Ohio, en 1872. Utilizó granos de cuarzo y un aglomerado procedente de Sharon llamando a estos ladrillos de sílice " sílice Dinas ", ya que eran similares a los ladrillos europeos de este nombre. El moderno ladrillo de sílice hecho de ganister, aglomerado con cal se ha desarrollado recientemente.

Refractarios aislantes.- Uno de los aspectos más importantes en el desarrollo de los refractarios ha sido el aislamiento del flujo calorífico o sea el ladrillo aislante. Los pioneros de este producto fueron Babcock & Wilcox Co., a mitad de los años veinte. En los últimos diez años, el límite de su utilización se ha ampliado por encima de los 1650° C.

Refractarios de cromo.- La cromita empezó a ser utilizada por los productores de acero en 1896, sobre todo en forma de ladrillo, principalmente en la región de transición entre las zonas de paso de ácida a básica. Sin embargo, muy pocas compañías han producido ladrillos de cromo.

Refractarios de magnesita.- En 1860, se sugirió en Europa la posibilidad de utilizar magnesita como revestimiento de hornos en acería, pero no alcanzó un empleo regular hasta 1880, cuando se descubrió que la magnesita austriaca podía sinterizarse perfectamente para recubrir de modo uniforme el fondo de los hornos. Se empezó a importar magnesita de Estiria en 1885, y fué utilizada por la Otis Steel Co., en la primera planta de obtención de acero, con hornos de solera habierta en Estados Unidos. Sin embargo no tuvo éxito comercial. En 1888, la magnesita fué utilizada sucesivamente por Carnagie, Philipps y Co., en Homestead. Durante éste tiempo, el uso de la magnesita aumentó rápidamente a causa de las diferentes ventajas que ofrecía el proceso básico frente al proceso ácido.

En el año de 1898, se importaron 16 000 toneladas de magnesita calcinada de origen austriaco. Al principio, los ladrillos se importaban, pero posteriormente algunas compañías iniciaron su producción.

La producción de magnesita a partir de salmueras, aguas madres y agua del mar se desarrolló rápidamente durante los años de 1940, pero se sabe actualmente que ya existía una planta de extracción de magnesita del agua de mar en el sur de Francia, en 1890.

El primer productor comercial en los Estados Unidos fué la Marine Magnesium Products Co., en San Francisco. Ahora existe una docena de plantas de producción de óxido de magnesio para la industria de los refractarios.

Los ladrillos de óxido de magnesio aglomerados con óxidos de magnesio-crómicos y de óxido de magnesio aglomerados con alquitran de han producido durante mucho tiempo, pero el ladrillo básico directamente aglomerado con una pequeña cantidad de fase vítrea, empezó a utilizarse con posterioridad, en los años 50'.

Cementos y Hormigones refractarios.- Se han desarrollado paulatinamente para formar estructuras monolíticas. Carl A. Reley, se acreditó el desarrollar la técnica de proyección a pistola del yeso en 1911. Esta técnica comenzó a usarse para refractarios a partir de 1920.

Refractarios electrofundidos.- La alúmina se ha fundido para la fabricación de abrasivos desde principios de siglo. A partir de los años veintes, el Doctor Fulder, de la factoria de Corning Glass, empezó a fabricar refractarios para vidrio de fusión y moldeo.

Los refractarios sílico-aluminosos fueron los primeros en producirse, pero a mitad de los años 30' se les aunó los de zirconio. Ellos exponen en la patente americana 2 271 366 a T.E. Field en 1942. A finales de los años

50' los bloques básicos electrofundidos estaban ya disponibles para la industria del acero.

Fibras refractarias.- Se han utilizado fibras de minerales de vidrio durante mucho tiempo como aislantes, pero una mayor exigencia en los límites de sus aplicaciones estimuló la investigación iniciada para conseguir vidrios sílico-aluminosos más refractarios. La patente americana 2 467 889 de Harter, Norton y Christie, parece ser la primera comunicación sobre este método, actualmente está en boga el producir lana de vidrio a partir de caolín fundido.

#### 1.4 Refractarios en México.

A finales de la segunda guerra mundial se empezó a producir materiales refractarios con el auxilio de inversiones de compañías norteamericanas, tales como "la fábrica de ladrillos Industriales y Refractarios, Harbison Walker Flir, S.A." y "Compañía Mexicana de Refractarios A.P. Green S.A." actualmente llamada Refractarios Green S.A., posteriormente otras compañías se formaron como "Barro-Mex", "Compañía Industrial de Zacatecas S.A.", "Refractarios Mexicanos, S.A." etc., las cuales cumplen ampliamente con las especificaciones señaladas por la D.G.N. y satisfacen las necesidades crecientes de nuestro país.

## II NATURALEZA DE LOS REFRACTARIOS

### 2.1 Clasificación General.

De acuerdo a la hecha por A.S.T.M. (American Society for Testing and Material) y D.G.N. (Dirección General de Normas).

Clasificación estandar de ladrillos refractarios de arcilla y alta alúmina.- Esta clasificación sobre la fabricación de ladrillos refractarios de arcilla y de alta alúmina tiene el propósito de citar los diferentes tipos de estos materiales de acuerdo a sus propiedades normales y características, importantes para su uso.

a.- Ladrillos de arcilla se dividen en cinco clases

- 1.- Calidad Superior
- 2.- Calidad alta
- 3.- Calidad semi-sílica
- 4.- Calidad media
- 5.- Calidad baja

b.- Ladrillos de calidad superior y alta están divididos en tres tipos cada uno: Regular, resistente a cambios de temperatura y resistente a escorias.

c.- Ladrillos de alta alúmina están divididos en siete clases

- 1.- Clase 1 con 50% de alúmina
- 2.- Clase 2 con 60% de alúmina

- 3.- Clase 3 con 70% de alúmina
- 4.- Clase 4 con 80% de alúmina
- 5.- Clase 5 con 85% de alúmina
- 6.- Clase 6 con 90% de alúmina
- 7.- Clase 7 con 99% de alúmina

Las propiedades que satisfacen estas clases se muestran en la tabla 1.

## 2.2 Ladrillos aislantes

a.- Esta clasificación pertenece al tipo de materiales que aislan el calor, y el propósito es citar el tipo de grupo de el producto de acuerdo a el probable uso en servicio.

b.- Los grupos de ladrillos aislantes refractarios están de acuerdo a su densidad volumétrica en g/cc. y la temperatura de prueba del cambio lineal permanente, la cual no debe ser mayor de 2% de la prueba.

Grupo	Temp.de prueba cambio lineal	Densidad vol. g/cc.
16	845	0.54
20	1065	0.64
23	1230	0.77
26	1400	0.86
28	1510	0.96
30	1620	1.09
32	1730	1.52
33	1790	1.52

Tabla 1 Clasificación de ladrillos de arcilla y alta-alúmina Refractarios en clases y tipos

Clase	Tipo	Cono piramétrico Equivalente, min.	Pérdida máx. por disgregación térmica %	Deformación bajo carga, % máx.	contracción por resquebrajamiento, % máx.	Módulo de ruptura, min. 2 Kg/cm <sup>2</sup>	otros requerimientos de prueba.
LADRILLOS DE ARCILLA Calidad superior	Regular	33	8 en 1650 C	...	1.0 en 1600 C	42.2	...
	Resistente a la disgregación	33	4 en 1650 C	...	1.0 en 1600 C	42.2	...
	Resistente a la escoria	33	...	...	...	70.4	densidad mín. 2.24 g/cc.
Calidad alta	Regular	31.5	...	...	...	...	...
	Resistente a la disgregación	31.5	10 en 1600 C	...	...	35.2	...
	Resistente a la escoria	31.5	...	...	...	34.5	densidad mín. 2.19 g/cc. e máx. 15% de porosidad.
Semi-silice		...	...	1.5 en 1350 C	...	31.1	con. mín de sílica 72%
Calidad media		29	...	...	...	35.2	...
Calidad baja		15	...	...	...	42.2	...
LADRILLOS DE ALTA ALUMINA							
60	Alúmina	34	...	...	...	...	50 ± 2.5 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
60	"	35	...	...	...	...	60 ± 2.5 % " "
70	"	36	...	...	...	...	70 ± 2.5 % " "
80	"	37	...	...	...	...	80 ± 2.5 % " "
85	"	...	...	...	...	...	85 ± 2.0 % " "
90	"	...	...	...	...	...	90 ± 2.0 % " "
98	"	...	...	...	...	...	98 ± 2.0 % " "

### 2.3 Ladrillos de sílice

a.- Esta clasificación esta limitada a ladrillos de sílice de acuerdo a las siguientes limitaciones:

Alúmina ( $Al_2O_3$ ) no mayor de 1.5%.

Titanio ( $TiO_2$ ) no mayor de 0.2%.

Oxido de fierro ( $Fe_2O_3$ ) no mayor de 2.5%.

Oxido de calcio ( $CaO$ ) no mayor de 4.0%.

Módulo de ruptura no menor de 35 Kg/cm<sup>2</sup>.

El ladrillo de sílice está clasificado en base a la cantidad de impurezas para el uso de un factor de fundentes el cual es igual al porcentaje de alúmina más dos veces el porcentaje de el total de álcalis.

b.- Tipos

Tipo A para ladrillos con un factor de fundentes de 0.5 o menos.

Tipo B para todos los demas ladrillos de sílice.

### 2.4 Concretos refractarios

a.- Esta clasificación pertenece a concretos refractarios que cuando son tratados con agua desarrollan una resistencia estructural por fraguado hidráulico.

Existen dos tipos de concretos; densos y aislantes.

b.- Los concretos refractarios densos son una mezcla íntima de diferentes tipos de agregados; aluminosos, sílico-aluminosos y otros, más un cemento de fragua

do hidráulico, lo cual con adición de agua y curado respectivo adquiere resistencia estructural por el fraguado hidráulico. Existen siete clases con dos tipos cada uno, los de resistencia normal (RN) y los de alta resistencia (AR). tabla 2

Los concretos refractarios aislantes son clasificados en base a la densidad volumétrica de ladrillos moldeados y secados, después quemados a la temperatura de prueba. tabla 3

## 2.5 Refractarios plásticos y apisonables de arcilla y alta alúmina.

a.- Esta clasificación pertenece a refractarios plásticos y apisonables de arcilla y alta alúmina, los cuales pueden ser amasados, apisonados y colocados para formar estructuras monolíticas. tabla 4

Los materiales plásticos y apisonables son aquellos que tienen un índice de trabajabilidad mayor de 15% según la norma A.S.T.M. C-181 y las mezclas apisonables son las que tienen un índice menor a éste determinado por el mismo método.

b.- Los refractarios plásticos y apisonables de arcilla están divididos en dos clases diferentes:

- 1.- Clase 1 superior
- 2.- Clase 2 alto

## CONCRETOS REFRACTARIOS

## CLASES DE CONCRETOS REFRACTARIOS SILICO-ALUMINOSOS

PRUEBA  
REQUERIDA

---

CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D	CLASE E	CLASE F	CLASE G
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

---

Contracción li-  
neal permanente  
no mayor de 1.5%  
quemado por 5 -  
Hrs. de permanen-  
cia a

1095°C

1260°C

1370°C

1480°C

1595°C

1705°C

1760°C

TABLA 3

## CONCRETOS REFRACTARIOS AISLANTES

## CLASES DE CONCRETOS REFRACTARIOS AISLANTES

## PRUEBA REQUERIDA

	CLASE N	CLASE O	CLASE P	CLASE Q	CLASE V
Contracción lineal permanente no mayor de -- 1.5% cuando es quemado por 5 Hrs. de permanencia a °C.	925	1040	1150	1260	1760
Densidad volumétrica máxima después de secado a (105-110 °C) g/cc	0.88	1.04	1.2	1.52	1.68

TABLA 4

**CLASIFICACION ESTANDAR DE REFRACTARIOS  
PLASTICOS Y APISONABLES DE ARCILLA Y  
ALTA ALUMINA**

<u>Clase</u>	<u>Cono Pirométrico equivalente mínimo</u>	<u>Contenido de Alúmina</u>
Alto	31	no requiere
Superior	32 1/2	no requiere
60% alúmina	35	57.6 a 62.5
70% alúmina	36	67.6 a 72.5
80% alúmina	37	77.6 a 82.5
85% alúmina	no requiere	82.6 a 87.5
90% alúmina	no requiere	87.6 a 92.5
95% alúmina	no requiere	92.6 a 97.5
100% alúmina	no requiere	97.5

Los refractarios plásticos y apisonables de alta alúmina están divididos en siete clases:

- 1.- Clase 1 de 60% de alúmina
- 2.- Clase 2 de 70% de alúmina
- 3.- Clase 3 de 80% de alúmina
- 4.- Clase 4 de 85% de alúmina
- 5.- Clase 5 de 90% de alúmina
- 6.- Clase 6 de 95% de alúmina
- 7.- Clase 7 de 99% de alúmina

## 2.6 Refractarios de mulita.

a.- Esta clasificación sobre estos productos refractarios consisten predominantemente en la existencia de mulita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), cristales formados por conversiones de materiales apropiados, empleando alto fundido o proceso de sinterización.

Esta clasificación es en base a su análisis químico y físico, dentro de un rango de 56 a 79% de alúmina, un máximo de impurezas de 5%, y una deformación de 5% como máximo.

Las impurezas señaladas deben ser los óxidos presentes fuera de los óxidos de aluminio y óxidos de sílice.

## 2.7 Refractarios de zircón.

a.- Esta clasificación sobre ladrillos refractarios y

formas especiales en los que predomina el  $(ZrO_2-SiO_2)$  y conteniendo un análisis químico no menor de 60% de óxido de zirconio ( $ZrO_2$ ) y no menor de 30% de sílice ( $SiO_2$ ).

b.- Tipos

Tipo A regular, teniendo una densidad volumétrica no menor que 3.84 g/cc.

Tipo B denso, teniendo una densidad volumétrica de 3.84 g/cc. o más.

2.8 Ladrillos de cromo, cromo-magnesita, magnesita-cromo y magnesita.

a.- Esta clasificación pertenece a la fabricación de los ladrillos refractarios definidos como ladrillos de cromo, ladrillos de cromo-magnesita, magnesita-cromo y ladrillos de magnesita. (No incluye los productos hechos de óxido de magnesio electrofundido u otros productos hechos por fusión. El propósito de esta clasificación es señalar la diferencia en su contenido de óxido de magnesio, excepto para ladrillos de cromo.)

b.- Ladrillos de cromo-magnesita y magnesita-cromo

Clase	MgO%	
	nominal	mínimo
30	30	25
40	40	35
50	50	45
60	60	55
70	70	65
80	80	75

Ladrillos de magnesita

Clase	MgO%	
	nominal	mínimo
90	90	86
95	95	91
98	98	96

2.9 Dolomita granular refractaria.

a.- La clasificación sobre refractarios granular básica de dolomita refractaria cruda y calcinada, o dolomita calcinada en horno rotatorio.

b.- Para el propósito de esta clasificación de refractario de dolomita granular se divide en tres clases;

1.- Clase 1 dolomita refractaria cruda.

2.- Clase 2 dolomita refractaria calcinada.

3.- Clase 3 dolomita calcinada en horno rotatorio.

tabla 5.

## CLASIFICACION ESTANDAR DE DOLOMITA GRANULAR REFRACTARIA

Clase	MgO contenido mínimo %	Pérdida por ignición má ximo %	Impurezas máximas %			
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sulfuros
1	16	- -	1.75	1.50	- -	0.08
2	33	2.0	2.0	2.50	- -	0.16
3	32	2.0	2.25	2.50	4-10	- -

### III MATERIAS PRIMAS

#### 3.1 Arcillas.

Se ha denominado en general este término a materiales de origen sedimentario y otros, también implica que un material con tamaño de grano fino desarrolla plasticidad cuando es mezclado con agua en cantidad limitada. La plasticidad es una medición de la propiedad del material mezclado o conformado, bajo la aplicación de la presión, con la deformación de la forma dada cuando aplicamos dicha presión.

Un análisis químico de arcillas muestra esencialmente alúmina, sílice y agua, frecuentemente con cantidades apreciables de fierro, álcalis y tierras alcalinas.

##### a.- Clasificación de minerales arcillosos

La clasificación de minerales arcillosos es formada en base de datos definidos cuidadosamente en función de su estructura y composición de varios minerales.

##### I. Amorfos

grupo alófono

##### II. Cristalino

A. Tipo doble capa (capa estructural compuesta de uniones de una capa de sílice tetraédrica y una capa de alúmina octaédrica).

I.- Equidimensional

## Grupo caolinita

caolinita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$
dicrita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$
nacrita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$
analcita	$\text{Al}_{2-n}(\text{Si}_{2+n}\text{O}_5)(\text{OH})_4$
endelita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

## 2.- Alargado

Grupo haloisita  $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$

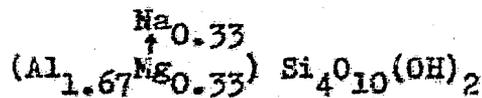
- B. Tipo triple capa (capa estructural compuesta de dos capas de sílice tetraédrica y una central bioctaedral o trioctaedral).

## 1.- Red de expansión

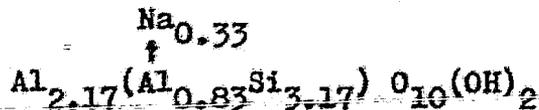
## a.- Equidimensional

Grupo montmorillonita

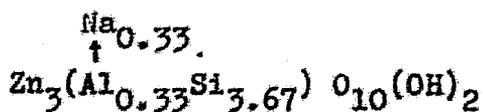
montmorillonita



beidellita



sauconita

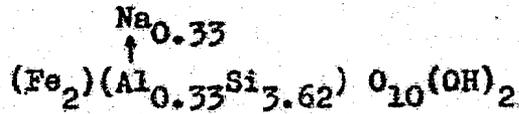


vermiculita

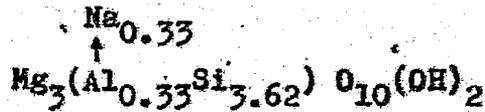
## b.- Alargado

Grupo montmorillonita

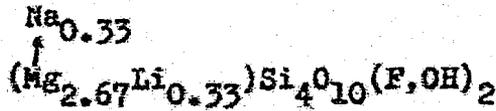
nontronita



saponita



hectorita



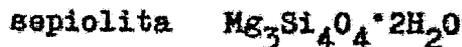
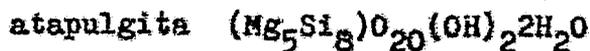
## 2.- Red no expansiva

Grupo illita

- C. Tipo regular de capas mezcladas (apilamiento ordenado de capas alternadas de diferentes tipos).

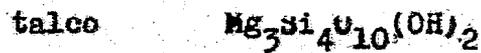
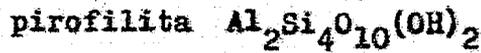
Grupo clorita

- D. Tipo de estructura en cadena (cadenas como horblenda de sílice tetraédrica encadenada por grupos octaédricos de oxígeno e hidroxilos conteniendo átomos de Al y Mg).



poligarcita

E. Existen minerales que no se consideran normalmente como minerales de arcilla, pero cuando se encuentran agregados se comportan como en los procesos cerámicos.



b.- Estructura cristalina

La estructura cristalina de los minerales arcillosos se ha determinado por investigaciones basadas en la generalización de Pauling para las estructuras de micas y capas relacionadas con los minerales. Existen dos tipos de estructuras unitarias involucradas en los retículos atómicos para los minerales de arcilla. El primero consiste de dos cubiertas de oxígeno o iones hidróxido empaquetados en el cual el aluminio, fierro o magnesio son puestos en en coordinación octaedral, así que están equidistantes de seis oxígenos o iones hidróxido. figura 2

Cuando el aluminio esta presente, solo dos tercias partes está en posición completa para balancear la estructura. Con lo cual tenemos la estructura de gibbsita  $Al_2(OH)_6$ . Cuando se encuentra presente átomos de magnesio completando la estructura obtenemos brucita  $Mg_3(OH)_6$ .

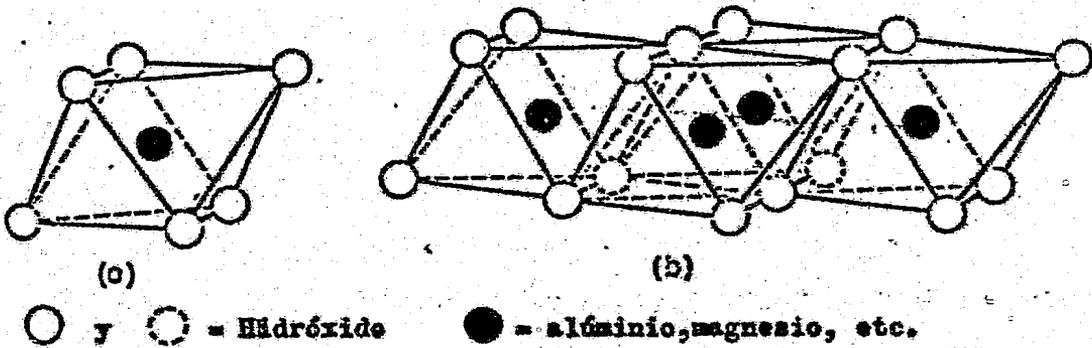


figura 2. El diagrama esquemático muestra a) La unidad, octaedro simple b) Estructuras octahedricas.

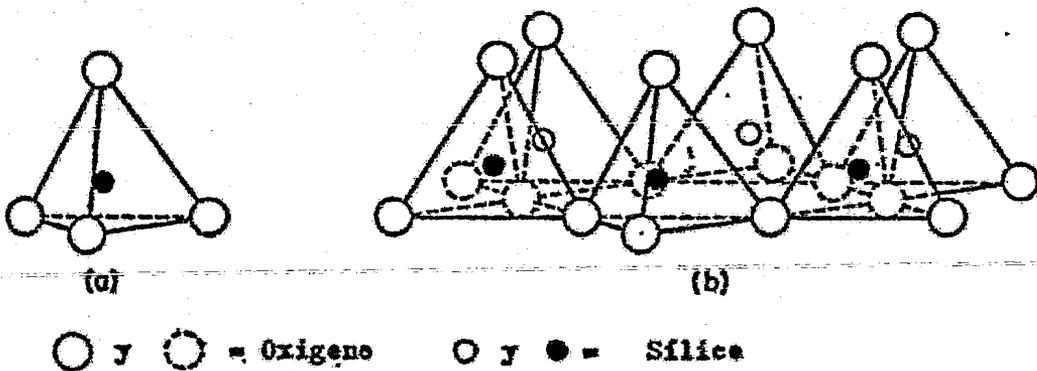


figura 3. El diagrama esquemático muestra. a) Sílice tetraedral b) arreglo hexagonal de Sílice tetraedral.

La distancia normal entre O-O es de 2.6 Å, pero la distancia en la estructura unitaria de OH-OH es de 2.94 Å, y el espacio útil para el ión de coordinación octaedral es de 0.61 Å aproximadamente. La densidad de unión es de 5.05 Å en una estructura de un mineral de arcilla.

El segundo tipo está construido de sílice tetraedral, en cada átomo de sílice cada tetraedro esta equidistante de cuatro oxígenos o iones hidróxido cuando se necesita balancear la estructura, arreglada en forma de tetraedros con un átomo de sílice en el centro. Los grupos tetraédricos están acomodados para formar una red hexagonal, los cuales se repiten infinitamente para formar una cubierta de composición  $\text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_4$  figura 3. Los tetraedros están acomodados de tal modo que los extremos tienen la misma dirección, y la base de los tetraedros esta en el mismo plano.

Las estructuras pueden ser consideradas como acomodados de átomos de oxígeno en el plano de los grupos tetraédricos; en un plano de átomos de sílice cada sílice en la cavidad de la unión de tres átomos de oxígeno, formando así una estructura hexagonal y un plano de átomos de ión hidróxido en cada ión hidróxido directamente sobre el sílice en la punta del tetraedro. La formación hexagonal abierta puede ser considerada compuesta de tres cuerdas de

átomos de oxígeno intersectados en un ángulo de  $120^\circ$ . La distancia O-O en la sílice tetraédrica es de  $2.55 \text{ \AA}$  y el espacio útil para el ión en coordinación es de  $0.55 \text{ \AA}$ . La densidad de la unidad es de  $4.93 \text{ \AA}$  en estructuras de arcillas. Cada una de esas unidades presenta una longitud de centro a centro de  $2.1 \text{ \AA}$ .

### 3.2 Caolín.

El nombre de caolín es una corrupción del significado chino "kauling", que quiere decir alta elevación, el nombre de un cerro cerca de Jaucha Fu, China, donde el material fue encontrado hace cientos de años.

Johnson y Blake en 1867, fueron los primeros en dar el nombre de caolinita al mineral de caolín.

La estructura de caolinita fué primeramente sugerida en general por Pauling. La estructura es compuesta de una sílice simple tetraédral y una cubierta octaédral de aluminio, figura 4 .

### 3.3 Materiales de alto contenido de alúmina.

Debido a las condiciones de trabajo de los materiales de arcilla que son cada vez más severas, se ha hecho de gran interés el uso de materias primas con alto contenido de alúmina, tales como; diasporo ( $\text{AlOOH}$ ), gibbsita ( $\text{Al(OH)}_3$ ) y materiales de tipo silimanita ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ).

El mineral nativo aluminoso, como corundo y arcillas, ha

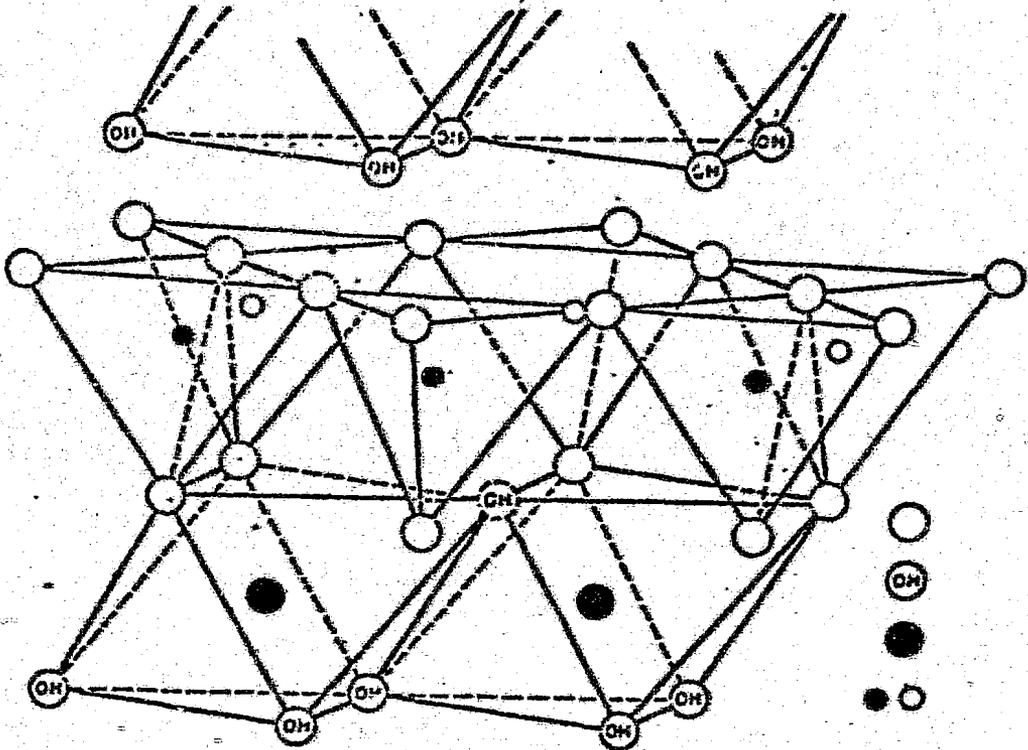


figura 4. El diagrama muestra la estructura de caolinita.

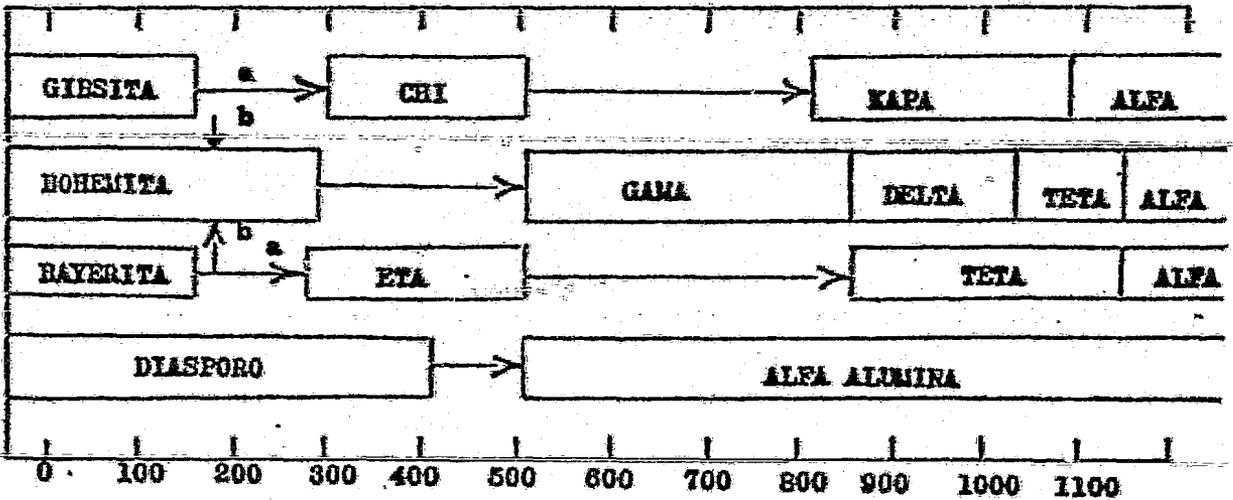


figura 5. Secuencia de deshidratación de alúmina hidratada en aire

sido asociado a los refractarios desde la antigüedad. Los minerales con alto contenido de alúmina son llamados "bauxita", tomando el nombre de el pueblo de la provincia de Francia-Les Baux, donde se descubrió el material.

La bauxita puede ser considerada como una alúmina hidratada impura. Para algunas aplicaciones, las impurezas son indeseables por lo que debe ser procesada para removerse.

La bauxita de Inglaterra (Demerara) y Dutch Guayana (Surinam), son particularmente adecuadas para uso cerámico porque son controlables los contenidos bajos de fierro y sílice, tabla 6.

a.- Procesos generales para la obtención de alúmina;

1.- Procesos alcalina húmedo

- A. autoclave bayer
- B. torre de filtración

2.- Proceso ácido húmedo

- C.  $H_2SO_4$
- D. HCl
- E.  $HNO_3$
- F.  $H_2SO_3$
- G. sales ácidas

TABLA 6

## BAUKITAS ( grado cerámico )

SURINAM						
	Secado químico	Abrasivo	Refractario	Abrasivo AAC	Refractario RAC	Refrac. RASC
$Al_2O_3$	61-62 %	87.5%	89.0%	87.75%	87.75%	88.0%
$Fe_2O_3$	1.3-1.7%	5.4%	1.6%	1.5%	1.5%	1.5%
$TiO_2$	2.7-3.2%	3.5%	3.3%	3.25%	3.25%	3.25%
$SiO_2$	2.0-2.5%	2.9%	6.0%	7.0%	7.0%	7.0%
ppa	31-32 %	0.7%	0.1%	0.5%	0.5%	0.25%
Humedad	1.5-2.5%	nada	nada	nada	nada	nada
Densidad	...	...	...	2.49g/cc	2.49g/cc	3.33g/cc

### 3.- Proceso horno alcalino

H.  $\text{NaCO}_3$

I.  $\text{CaCO}_3$

J.  $\text{NaCO}_3\text{-CaCO}_3$

K. sulfatos y cloruros

L. otras sales

M. agentes reductores

### 4.- Proceso horno carbotérmico

### 5.- Proceso electrolítico

#### b.- Secuencia de transición en la deshidratación de alúmina hidratada.

La transición de alúmina incluye el grupo de fases en las cuales cae entre la boemita y corundo. El grupo ha sido designado como alúmina gama. No se ha encontrado en la naturaleza, pero ha sido preparado por transformación térmica y en algunos casos por transformación hidrotermal de hidróxidos de alúminio.

Stumpf, Russel, Newsome y Tucker; describen el modelo de rayos X en secuencia de transición y rangos de temperatura, de siete modificaciones, designadas arbitrariamente como chi, eta, gama, delta, kapa, teta y alfa alúmina. Se encuentra la secuencia de fases influenciada por el movimiento de material. Las tem

peraturas de transición están influenciadas por la cantidad de vapor de agua en la atmósfera y por impurezas, figura 5.

La secuencia de transición por Stumpf, Tertian y Tapee, son aceptadas, aunque existe confusión en la identificación por rayos X en algunas fases. La secuencia es afectada no solo por la movilidad del material, sino, que también por la brusquedad de cristalinidad, velocidad de calentamiento e impurezas. Los rangos aproximados de temperatura en la estabilidad de las fases son: gibbsita.- en vacío, material fino o grueso transformación de gibbsita a ro (100-400° C ), a eta (270-500° C ), a alfa alúmina (1150° C ).

Deshidratación instantánea a 800° C : gibbsita a eta, a teta, o alfa alúmina.

En aire, gibbsita fina: gibbsita a chi (300-500° C), a kapa (800-1150° C), a alfa alúmina.

En aire, gibbsita gruesa: gibbsita a chi, a kapa, a alfa alúmina. Gibbsita a bohemia. (60-300° C), a gama (500-850° C), a delta (850-1050° C), a teta y alfa alúmina.

### 3.4 Minerales de tipo $Al_2SiO_5$ .

Existen diversos minerales con esta fórmula con un conte

nido de 37% de sílice y 63 de alúmina.

La silimanita es uno de estos minerales, se presenta en depósitos pequeños en Estados Unidos, aunque la fuente más importante de éste material se encuentra en la India.

Se confunde con la andalucita y cianita, aunque existen importantes diferencias en propiedades, como la gravedad específica, para la silimanita es de 3.23 g/cc. comparada con 3.16 g/cc. de la andalucita y 3.60 g/cc. de la cianita.

Después de calcinada, aproximadamente a cono 20 (1545°C), la silimanita se descompone en mulita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) y sílice pura. La silimanita es la más estable a la temperatura en que los otros materiales forman mulita, pero no es tan estable volumétricamente a altas temperaturas como la andalucita por ejemplo. La conversión de silimanita a mulita y sílice es acompañada solo de un ligero aumento en volumen. Cuando se quema a 1810°C, la silimanita se descompone en corundo y vidrio.

La andalucita presenta formas cristalinas diferentes a la silimanita, se encuentra en depósitos pequeños en California y en grandes cantidades en España. Se disocia apreciablemente a cono 13 (1350°C) para formar mulita, más una pequeña cantidad de vidrio altamente silicoso. Los depósitos de andalucita grado comercial son relati-

vamente raros y si estuvieran disponibles a menudo se preferirían para fabricar refractarios de tipo mulita, ya que su estabilidad volumétrica y refractabilidad los hace más atractivos.

La cianita, se encuentra en la India, en algunos estados del sur de los Estados Unidos. A  $12. (1310^{\circ}C)$ , se convierte en mulita y sílice, con un cambio de volumen del 10%. Esto es un efecto destructor que da lugar el cambio volumétrico. En general requiere previa calcinación antes de usarse.

### 3.5 Sílice.

La sílice es uno de los minerales refractarios más importantes. Es muy común en la naturaleza, generalmente se presenta en forma de mineral de cuarzo. Existen muchos tipos diferentes de depósitos de este material, es un componente esencial en roca ácida ígnea, tales como el granito y la riolita, también aparece en venas en roca sedimentaria como la piedra pómez y cuarcita y en las arenas no consolidadas de las orillas de los ríos y playas.

El cuarzo puede transformarse por calentamiento en varias modificaciones polimórficas; estas formas junto con sus márgenes de estabilidad, se indican en la figura 6. Fueron tomadas del tratado más completo sobre el sílice de Sosman.

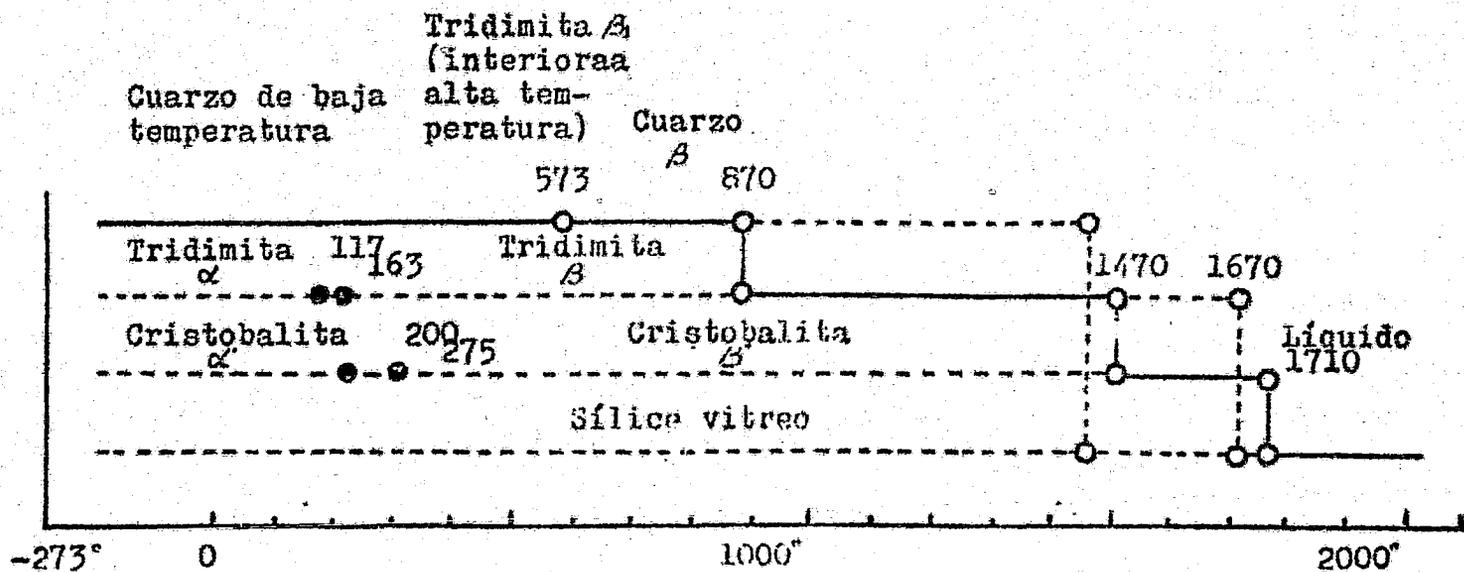


Figura 6 .- Modificaciones polimórficas de sílice y sus márgenes de estabilidad.

Existen por lo menos seis variedades cristalinas de sílice: Cuarzo, tridimita y cristobalita, cada una de ellas tiene una modificación de alta y baja temperatura. Todas las variedades se caracterizan por un retículo tridimensional que está compuesto de tetraedros de  $\text{SiO}_4$ , cada uno de sus vértices lo comparte con los tetraedros vecinos. De éste modo un átomo de sílice está siempre compartido por dos oxígenos, que configuran la fórmula  $\text{SiO}_2$ , determinada hace mucho tiempo por análisis químicos. Las densidades e índices de refracción de la tridimita y cristobalita son muy similares, pero difieren considerablemente de las de cuarzo, tal como se indica en la tabla 7.

tabla 7	Índice de refracción	Densidad g/cc.
Cuarzo	$\epsilon = 1.553$ $\omega = 1.344$	2.65-2.66
Tridimita	$\alpha = 1.469$ $\beta = 1.473$ $\zeta = 1.470$	2.26-2.33
Cristobalita	1.486	2.27-2.32

El cuarzo es notoriamente puro, y consecuentemente los valores para sus índices de refracción y densidad normalmente son similares. Existen escasos datos sobre la

química de tridimita y cristobalita, pero, de los datos que se disponen indican que en general son impuros y consecuentemente varían en densidad e índice de refracción. Por otro lado, es bastante posible que estas variaciones sean debidas al error de la medición, tabla 8.

tabla 8

Formas alotrópicas.	Cambio de densidad	Efecto calorífico. cal-g/g
Cuarzo, de $\alpha$ a $\beta$	-0.02	4.5
Cristobalita, de $\alpha$ a $\beta$	-0.04	5.0
Tridimita, de $\alpha$ a $\beta$	-0.01	1.0
Tridimita, de $\alpha$ a $\beta$	0.00	

En todos los casos, las formas alotrópicas correspondientes a altas temperaturas tiene una simetría superior a las de baja temperatura. En este sentido, puede notarse que los grupos diagonales de tetraedros en la cristobalita de alta temperatura forman casi una línea recta mientras que en la cristobalita de baja temperatura trazan una cadena helicoidal; lo mismo puede decirse de las relaciones entre el cuarzo de alta y baja temperatura. Las diferencias entre el entramado de los tetraedros en las formas del mineral correspondiente a alta y baja temperaturas son ligeras, pero tiene bastante importancia en el cuarzo, tridimita y cristobalita. Cuan-

do una forma de alta temperatura se transforma en una de baja temperatura, los tetraedros se desplazan y jiran, pero no se rompe ningún enlace, con lo cual las transformaciones a un cambio de temperatura en el mineral es rápida y reversible. Estas inversiones van acompañadas por cambios de volumen,, junto con los efectos calóricos que producen.

La estructura de los minerales de cuarzo, tridimita y cristobalita es bastante diferente entre sí, y la transformación de uno a otro requiere un cambio marcado en el enlace de los tetraedros. Por lo tanto, estas transformaciones son extremadamente lentas, y así la tridimita y cristobalita pueden existir indefinidamente en este estado metastable a temperatura ambiente. De hecho, es imposible formar cuarzo a partir de tridimita o cristobalita exclusivamente por reacciones térmicas.

Las inversiones lentas, que son tan importantes para los fabricantes de refractarios de sílice, pueden modificarse considerablemente por medio de otros materiales llamados "mineralizadores". Se han publicado muchos estudios sobre los efectos de los mineralizadores en la transformación de cuarzo a tridimita o cristobalita dentro del horno. El aditivo más común de todos ellos es la cal, que se ha utilizado en la mayoría de los ladrillos

de sílice comercial, principalmente como aglomerante y en parte como mineralizante, para acelerar la conversión del cuarzo en tridimita y cristobalita. Se han sugerido muchos mineralizadores, tales como fluoruros, dióxido de titanio, óxido bórico, cloruro férrico y cloruro sódico.

### 3.6 Sistema $Al_2O_3-SiO_2$

Este sistema fué elaborado primeramente por N.L. Bowen y F.W. Greing. En la actualidad existe una nueva versión hecha por Aksay y Pask. En la nueva versión podemos obtener información en peso o mol, según sea el caso. Existe un compuesto presente en el sistema, llamado mulita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), que muestra la forma metastable de su punto de fusión. El eutéctico entre mulita y cristobalita, ocurre a  $1587^\circ C$ , forma contenido líquido de 95% en mol aproximadamente de sílice ( $SiO_2$ ). La temperatura solidus entre mulita y alúmina está a  $1828^\circ C$ . Los factores que afectan la fabricación y uso de los ladrillos refractarios los podemos relacionar en este sistema. Los ladrillos refractarios de sílice con (0.2 a 1.0 % en peso de  $Al_2O_3$ ), los ladrillos de arcilla con (35 a 50% en peso de  $Al_2O_3$ ), ladrillos de alta alúmina con (60 a 90% en peso de  $Al_2O_3$ ), y ladrillos de más de 90% en peso de  $Al_2O_3$ .

En un extremo del diagrama lo podemos relacionar a los ladrillos de sílice, los cuales se usan en la boveda de los hornos y estructuras similares que requieran alta resistencia en temperaturas elevadas. En el desarrollo de los ladrillos de sílice, se ha encontrado que pequeñas cantidades de óxido de aluminio son indeseables y abaten las propiedades de los ladrillos, debido a la posición del eutéctico que se encuentra cerca del extremo en el diagrama. Consecuentemente, si adicionamos pequeñas cantidades de óxido de aluminio, encontramos la fase líquida a una temperatura de  $1600^{\circ}\text{C}$ . Por esta razón en la fabricación de ladrillos de super-sílice el material crudo debe ser seleccionado o tratado para tener un bajo contenido de óxido de aluminio, y así, garantizar la resistencia esperada a temperaturas altas.

~~Los ladrillos de arcilla tienen un rango de composición~~ de 35 a 50% en peso de óxido de aluminio. Para mezclas exentas de impurezas las fases en equilibrio presentes abajo de la temperatura de  $1587^{\circ}\text{C}$ , son mulita y sílice principalmente. Así, al aumentar el contenido de óxido de aluminio cambia la ~~composición relativa de fases,~~ o ocasionando cambios en las propiedades de los ladrillos. A temperaturas mayores de  $1600^{\circ}\text{C}$ , la cantidad de fase líquida presenta una relación de  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ .

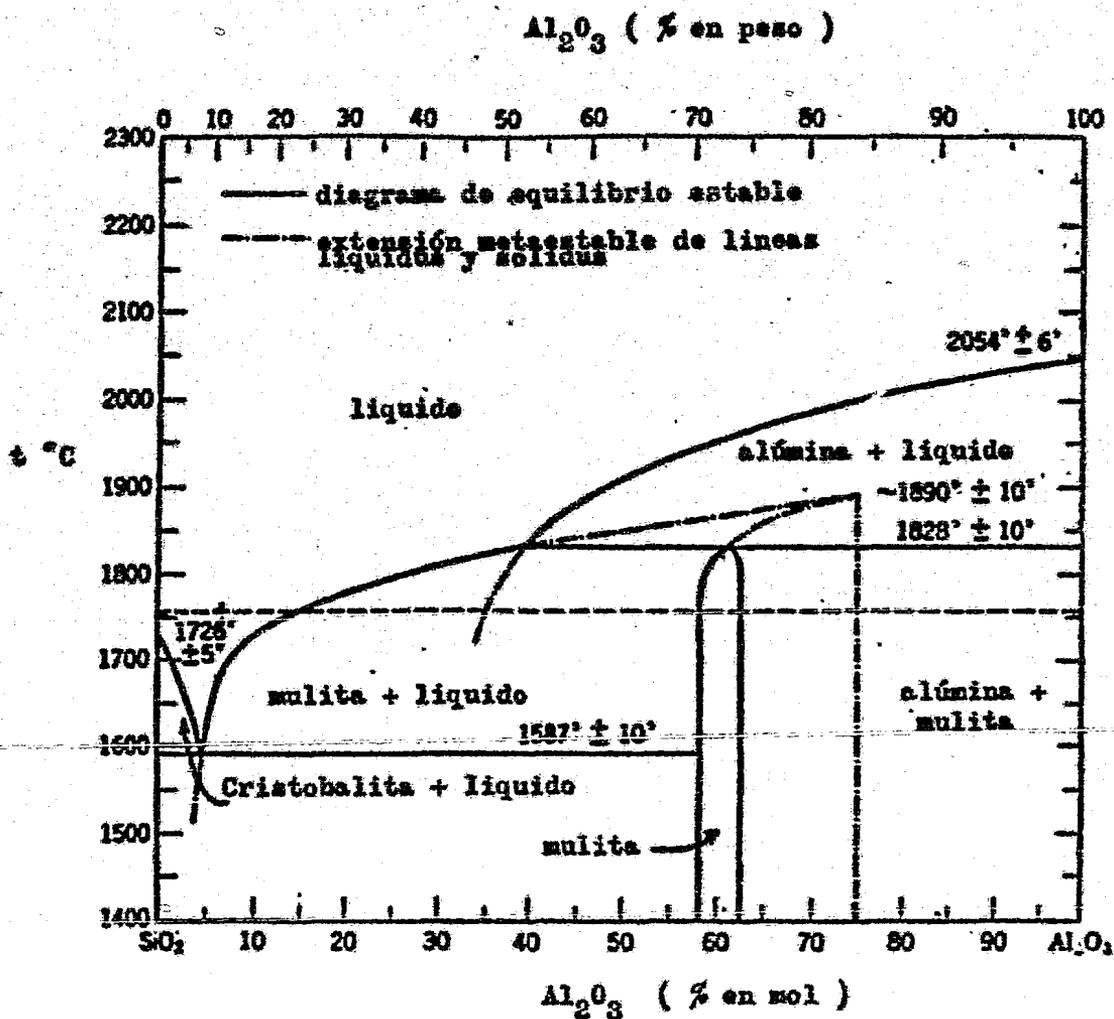


Figura 1. Diagrama binario  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

Las propiedades de los ladrillos refractarios pueden ser supuestas si adicionamos la cantidad suficiente de alúmina, incrementando la formación de fase mulita, la cual contiene un 72% en peso de alúmina. Así, el ladrillo es esencialmente de mulita o una mezcla de mulita y alúmina, bajo estas condiciones no existe fase líquida sino hasta temperaturas arriba de 1828°C. La selección de los ladrillos de mulita esta basada en una mayor resistencia a la corrosión y menor deformación al exponerse en altas temperaturas.

Para tener mayor refractabilidad de materiales refractarios la proporciona la fabricación de ladrillos de alúmina pura.

### 3.7 Extracción de arcillas.

Para este fin, existen dos métodos de extracción, dependiendo de las condiciones del terreno; método de tajo abierto, siendo el más usual para muchas arcillas. Normalmente los lechos de arcilla se encuentran cubiertos por grava o tierra comprimida, alcanzando una capa hasta de seis o siete metros, para poder ser rentable. Es necesario eliminar la capa superior del modo más económico posible. En operaciones de gran volumen, se remueve la capa mediante palas mecánicas, escavadoras accionadas por tractores, bulldozer y palas de arrastre.

El método de remover la arcilla varia según las condiciones. Si la arcilla es relativamente blanda, puede irse separando a pico y pala, y el material ya extraído se carga a mano en carretillas o camiones. En el caso de una arcilla dura, es necesario perforar y barrenar la superficie para obtener piezas lo suficientemente pequeñas que puedan ser manejables. La perforación se realiza en pozos menores, con taladros manuales de 3cm. de diámetro aproximadamente. En minas mayores, se utilizan perforadoras eléctricas o neumáticas. También, se han utilizado taladros portátiles para perforar agujeros profundos, de tal manera que puedan colocarse cargas explosivas mayores y más profundas. Método subterráneo, cuando el yacimiento se encuentra demasiado profundo, se recurre a métodos de minería. La gran parte de yacimientos de arcilla a mayor profundidad presentan espesores de tres a cinco metros. Se utiliza normalmente el método de pozos y galerías, avanzando progresivamente desde la entrada; consiste en abrir una entrada de mina y escavar galerías hasta el interior, paralelamente al borde de la cantera o yacimiento. Los pozos pueden hacerse solamente cuando el desplome del terreno no es de gran importancia. Siempre que se utilicen métodos subterráneos de extracción, es importante planificar el trabajo

perfectamente y seguir un método sistemático desde el primer momento de extracción.

En la extracción del subsuelo, el costo varía según el espesor de la vena, la dureza de la arcilla, la cantidad de andamiaje que se necesite y la distancia a la planta.

### 3.8 Trituración y molienda de materias primas para refractarios.

Prácticamente todas las arcillas deben ser trituradas antes de que se sometan a la acción del moldeo de piezas refractarias.

Los bloques de arcilla más blandos se pasan normalmente por la trituradora de simple o doble tambor, que rápidamente se desmenuzan los trozos hasta tamaños lo suficientemente pequeños como para poder utilizarse.

~~Las trituradoras de mandíbulas y de rodillos se utilizan normalmente para las arcillas más duras, rocas y ladrillos. Estas trituran hasta tamaños de 2.5 a 5 cm. Con capacidad de trabajo de 4 a 5 ton/hr. Utilizan motor de corriente alterna con 25 a 50 h.p. En estas trituradoras no pueden utilizarse con arcillas blandas y húmedas debido a que las mandíbulas se traban entre sí.~~

Las trituradoras con tambor (molino chileno) utilizan llantas de acero al manganeso por el desgaste conside -

rable que existe en ellas. Son utilizados para materiales duros triturando hasta tamaloes de 2 a 28 mallas. La capacidad de trabajo es de 10 ton/hr. aproximadamente. Utilizan corriente alterna con motores de 50 a 75 h.p. Se debe evitar la deformación de los tambores del cilindro. para obtener moliendas finas, la separación con el piso no debe ser mayor de 3mm. y debe ajustarse periódicamente. No deben utilizarse nunca tambores planos para triturar arcillas húmedas, porque el material se pega en las llantas y entonces no hay molienda.

Trituradora de muelas para arcillas plásticas con 10% de humedad como máximo. Consta su equipo de un desintegrador con motor de 5 h.p., una banda detectora para eliminar contaminantes metálicos. El molino tiene una capacidad de 12 a 14 ton/hr., motor de corriente alterna con una potencia de 50 h.p. y 1750 r.p.m. Se pueden obtener tamaños de partícula inferiores de 14 mallas.

Para obtener partículas muy finas se utilizan los molinos de bolas. Para producción a gran escala se tiene el tipo de molino continuo, el cual consta de una tolva de alimentación, cañón alimentador con vibrador, tamiz para controlar el tamaño de partícula desechando la grana y el material pulverizado es llevado por un elevador depositandolo en un transportador neumático, para llevar

lo a las tolvas de almacenamiento.

Puede obtenerse una producción de pulverizado de hasta dos ton/hr., la capacidad de carga es de 11 ton. de bola y cinco de material. Se obtienen tamaños de partícula de -200 mallas en un 75 a 80%.

### 3.9 Tamizado.

Normalmente es necesario tamizar los materiales que se han triturado para que el material sea el requerido para la fabricación de ladrillos.

Se utilizan varios tipos de tamices, el más común es el vibratorio, cuyo funcionamiento es producido por un sistema de poleas y pesas.

La inclinación de las cribas es de 20° aproximadamente, utilizan motor de corriente alterna de 5 h.p. y 975 r.p.m

En ocasiones se superponen cribas de diferentes mallas para clasificar el producto en diversos tamaños. Para tamizar materiales por debajo de 60 mallas se ha hecho conveniente utilizar separadores de aire en lugar de cribas, siendo actualmente bastante fácil obtener clasificación de tamaño inferior a 200 mallas.

### 3.10 Almacenamiento de materias primas.

Generalmente es necesario tener almacenada una cierta cantidad de arcilla para el suministro durante las interrupciones de explotación de minas, y debido a los cambios de estación.

La cantidad que debe permanecer almacenada depende del tiempo de suspensión previsible en la explotación de las minas. El proveer el almacenaje suficiente para abastecer una planta grande de arcilla es más bien costoso y no es común almacenar más de lo estimado para esos días. Lo más común es almacenar a la intemperie los materiales solo en el caso en que se requiera material con humedad no mayor de 10% su almacenaje será en casilleros bajo techo.

Cuando el material ha sido parcialmente procesado se almacena en tolvas grandes ver figura 8 y 9, debido a que permite seleccionarse de acuerdo al tamaño de partícula según lo requieran los diferentes componentes en el proceso.

Cuando tiene que almacenarse material triturado de arcilla o chamota, debes tomarse precauciones para evitar la segregación del material en el interior de la tolva. En todos los casos de fabricación es necesario tener mayor interés en obtener uniformidad de partícula. Cuando el material pasa del triturador a la tolva, lo que ocurre es que las partículas mayores ruedan por la parte lateral de la tolva, mientras que las partículas más pequeñas se amontonan en el centro formando un cono. El material se irá sacando del fondo del cono de

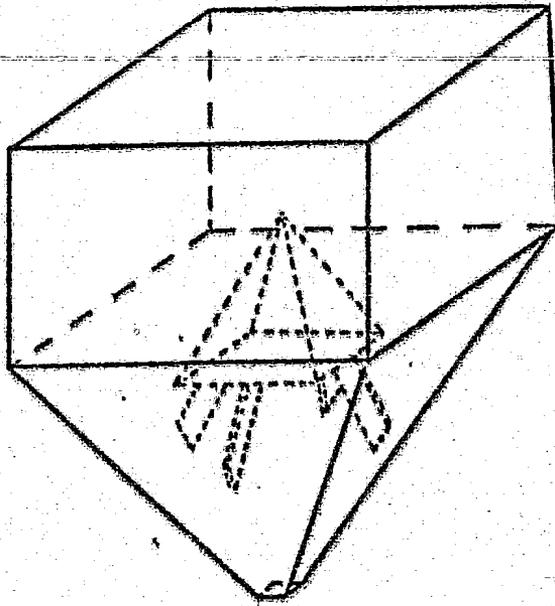


figura 8 Tolva de reserva de material.

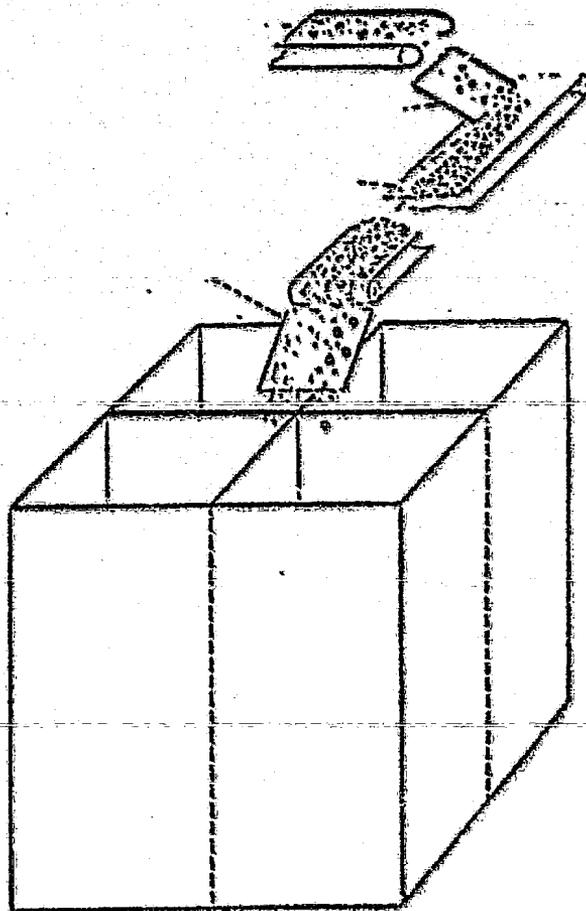


figura 9 Tolvas de almacenamiento.

la tolva tendrá en un principio partículas pequeñas en su mayor parte y posteriormente estará constituido por partículas de grano grueso. Esta segregación puede hacerse mínima mediante estudios del comportamiento de las partículas.

### 3.11 Mecanismos de segregación.

#### a.- Separación de finos

Los principales mecanismos de segregación cuando una mezcla de varios tamaños de partícula son manejados, ocurre separación de finos al vaciar las partículas. Para que estos mecanismos ocurran, debe haber movimiento entre las partículas, tales como, movimiento horizontal, cuando una mezcla se desliza en capas bajo la superficie del cono formado. Los finos se separan en la capa inferior estacionaria. La figura 10 muestra los porcentajes acumulados de finos y granos gruesos como función de la distancia radial desde el punto de carga. Justo a 50% del total de granos tiene 92% de finos, y el 50% de finos sin consentrar en solo 22% de el material. La alta concentración de finos ocurre directamente bajo el punto de carga, y fué cerca de 40% por volumen o 32% en peso.

Los mecanismos de separación pueden ser significantes

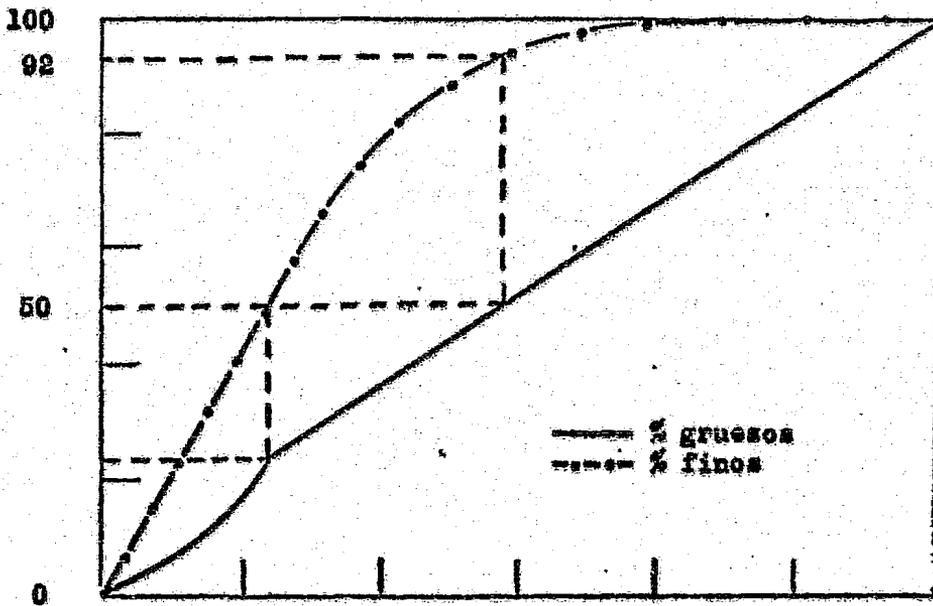


Figura 10 Porcentajes acumulados de finos y gruesos como función de la distancia radial.

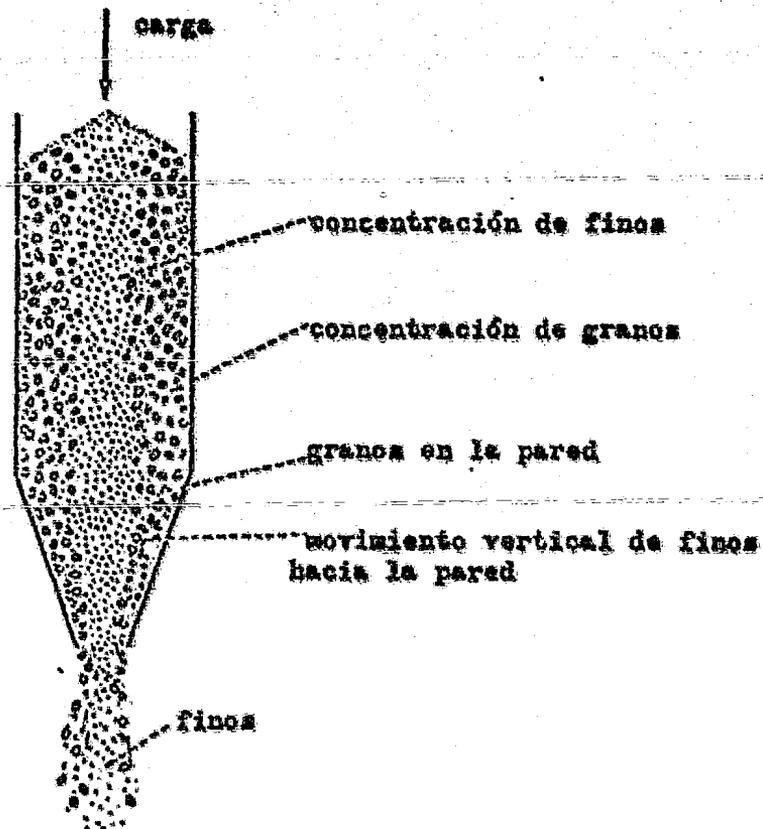


Figura 11 Segregación de partículas en una tolva.

siempre que exista un movimiento de corte horizontal girando o deslizando en una superficie libre. La figura 11 muestra la segregación de partículas en una tolva después de un mezclado, donde el flujo ocurre a lo largo de la tolva. Primero la segregación de partículas durante el cargado, causando separación de finos y los gruesos se separan a lo largo de la caída del material (en la descarga predominan en el centro los finos). Si esto ocurre en el embudo de la tolva (no hay flujo en las paredes), el contenido de finos se incrementa.

b.- Mecanismos de ángulo de reposo.

Tamaños de partícula uniforme de diferentes materiales en una mezcla pueden segregarse significativamente durante el apilamiento del material por tener diferente ángulo de reposo. El material con un ángulo de contacto mayor tiende a concentrarse en el centro.

c.- Fricción superficial en los canales.

Cuando los sólidos se deslizan en un canal, la velocidad de una partícula que sale del canal depende de la fricción superficial o del ángulo de fricción, velocidad de caída y trayectoria. Usualmente, los finos tendrán un mayor ángulo de fricción que las

partículas grandes de un material, así que los finos se depositarán cerca del canal y las partículas grandes después.

La figura 12 ilustra éste efecto de segregación. Partículas de dos diferentes tamaños mezcladas en igual proporción de volumen presentan una fricción angular de  $28^\circ$  para partículas finas y  $22^\circ$  para partículas grandes. La mezcla contiene materiales de diferente composición química, y diferente ángulo de fricción superficial, puede haber segregación diferente aún teniendo el mismo tamaño.

#### d.- Efecto de fluidización.

La segregación puede también ocurrir cuando una mezcla de partículas pulverizadas y en grano entran a una tolva. El pulverizado fluye rápidamente y permite ~~que el material no fluidizable lo sea.~~ Este fenómeno es indeseable en algunos procesos. Tal segregación formada así, puede ser disminuida reduciendo la velocidad de los sólidos, usando un plato separador a la entrada de una banda neumática.

#### e.- Efecto dinámico.

Cuando el depósito de sólidos en una pila se hacen con gran velocidad de impacto, se forma un crater en la cima. Esta formación retiene partículas que no

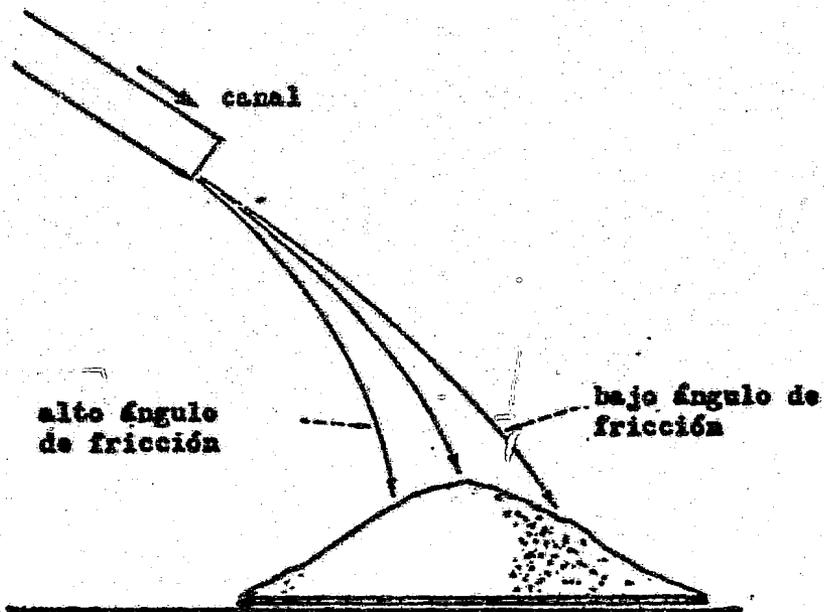


figura 12 Efecto de segregación

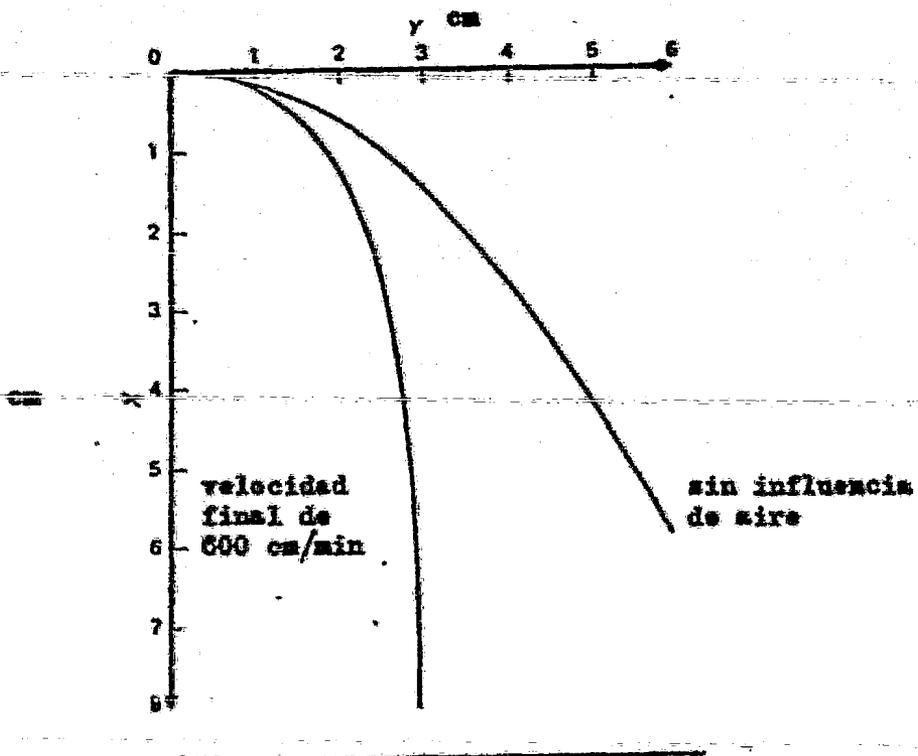


figura 13 Efecto de la trayectoria

son lo bastante elásticas como para saltar fuera. Si varía su elasticidad considerablemente las partículas más elásticas tenderán a concentrarse fuera de la pila. Los finos son menos elásticos que las partículas grandes, la segregación dinámica puede acentuar la concentración de finos.

El efecto de inercia es generalmente mínimo en grandes tolvas y pilas, pero muy significantes en tolvas pequeñas y especialmente en modelos a escala donde la velocidad no es controlada.

f.- Efecto cohesivo.

Todos los mecanismos discutidos anteriormente dependen de la actividad independiente de las partículas y tales segregaciones no ocurren si los materiales son suficientemente cohesivos. Por ejemplo; si un pulverizado se adhiere a la superficie de una partícula grande la segregación se origina hasta que la unión se rompe.

El efecto cohesivo puede alterar la separación mecánica. Un sólido cohesivo formará un gran deslizamiento en la pila, mientras que un sólido menos cohesivo formará una capa ligera.

El material cohesivo tiende a moverse como bolsas en el canal, evitando el mecanismo de fricción superficial.

g.- Efecto de la trayectoria.

Existen dos o tres mecanismos que originan la segregación provenientes de la trayectoria de partículas sólidas: el primero, cuando un material se ha segregado en el transportador de tal modo que los finos se separan y las partículas grandes se mantienen en la cima, los finos pueden adherirse al transportador. Esta adhesión reduce la velocidad horizontal comparada con las partículas grandes, causando diferente trayectoria sobre la salida del transportador. Segundo, las partículas pueden ser afectadas por la resistencia del aire al caer, figura 13.

## IV FABRICACION

### 4.1 Métodos de moldeo.

Los ladrillos refractarios se fabrican con mezclas de arcilla plástica y no plástica (tales como chamota y arcilla magra. Con buenas propiedades frente a la cocción.

#### a.- Trabajabilidad de arcillas

Existen algunas definiciones sobre los tipos de fluidos que son útiles para entender la manejabilidad o trabajabilidad de arcillas.

Fluido. Es una sustancia que sufre deformación continua cuando está sujeta a cualquier sistema de esfuerzos cortantes de magnitud infinita.

Sólido. Es una sustancia que sufre deformación permanente o ruptura solamente cuando está sujeta a un sistema de esfuerzos cortantes que exceden a un valor mínimo.

Líquido simple ( o newtoniano ). Es un líquido en que la velocidad de deformación es proporcional de deformación (flujo laminar).

Sólido elasto-plástico (el sistema arcilla-agua). Es un sólido que obedece las leyes del sólido elástico para valores del esfuerzo de deformación, inferiores al esfuerzo crítico; que corresponden al

límite de elasticidad para esfuerzos cortantes, y que se deforma plásticamente cuando el esfuerzo cortante excede de este valor.

Viscoaidad. Es un líquido newtoniano, es la razón constante entre la tensión de deformación y la velocidad de deformación.

Plásticidad. Es la propiedad de un cuerpo en virtud de la cual retiene una parte de la deformación después de que la tensión de deformación se ha anulado.

Elasticidad. Es la propiedad de un cuerpo en virtud de la cual recupera su tamaño y forma original después de su deformación.

Tixotropia. Es la propiedad de un cuerpo que produce una disminución de la tensión de corte con el tiempo a velocidad constante de tensión.

Antitixotropia (reopexia). Es la propiedad de un cuerpo que permite agitación para acelerar la floculación de un gel.

Dilatancia. Es la propiedad de un cuerpo que produce un aumento del esfuerzo cortante con el tiempo a velocidad constante de tensión .

Para el sistema agua-arcilla se consideran dos partes. Las barbotinas de bajo contenido de arcillas y las masas plásticas de alto contenido de las mismas.

Esta separación se hace porque en la región viscosa que está situada entre estos dos extremos, es imposible tener medidas precisas en cada instante con los medios de que se dispone y además porque ésta región no se utiliza industrialmente, aunque la razón principal está en que ambos casos rijan unas leyes distintas.

#### d.- Barbotinas

Se le llama a la zona en que la mezcla es fluida.

Un líquido newtoniano como el agua obedece a la siguiente relación en la región de flujo viscoso:

$$\eta = k \frac{F}{v}$$

donde  $\eta$  , es la viscosidad básica de la suspensión

$k$  , es una constante

$F$  , es la tensión de cizalladura (o esfuerzo cortante). dinas/ cm<sup>2</sup>

$v$  , es la velocidad de flujo cm/seg.

La cantidad  $\eta$  puede medirse de muchas maneras, pero para trabajos de tipo cerámico, funciona muy bien el viscosímetro de rotación. En un viscosímetro se determina por la rotación de unos alambres previamente calibrados y por lo tanto, puede cubrirse un margen muy amplio para la medida de la tixotropía de

las suspensiones.

La viscosidad de una suspensión de partícula esférica parece no mostrar cambio en la viscosidad aparente cuando existe una variación en la velocidad de deformación, pero es necesario, efectuar más investigaciones para confirmar esta similitud con el comportamiento de un líquido. Las suspensiones de partículas anisótropas, tales como las partículas de arcilla, muestran un cambio pronunciado en la velocidad aparente cuando hay variación en la velocidad de deformación, tal como se muestra en la figura 14, y entonces el coeficiente de tixotropía se determina a partir del valor de la pendiente A/B de la curva extrapolando a velocidad de deformación infinita.

La viscosidad aparente de una suspensión es debida a la suma de tres fenómenos:

1. Viscosidad del medio de la suspensión
2. La energía absorbida por las partículas individuales, que se mueven con el gradiente de velocidad del fluido deformado.
3. La energía absorbida a causa de la integración mutua de las partículas.

Se ha encontrado que las suspensiones de caolinita monodispersa ya sea en agua o en una solución con

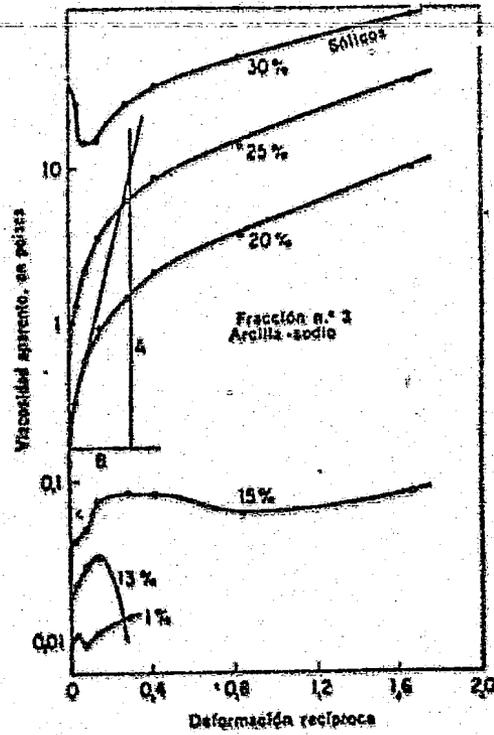


Figura 14 Viscosidad aparente de barbotinas a diferentes velocidades de deformación

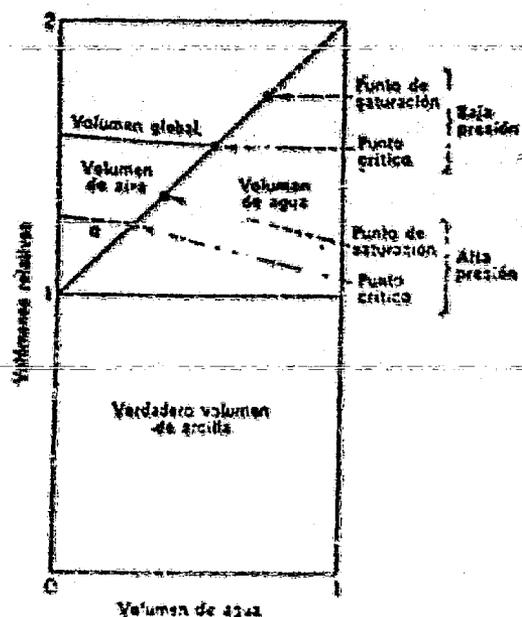


Figura 15 Sistema ternario arcilla-agua-aire.

un electrolito como agente dispersante, obedece a la siguiente ley:

$$\eta = (1-c)\eta_0 + k_1 c + k_2 c^3$$

donde  $k_1$  y  $k_2$  son constantes que varían con el tamaño de partícula y la naturaleza del electrolito del medio dispersor. Para valores bajos de  $c$  solamente presenta importancia los dos primeros términos de la expresión, pero el valor del último término aumenta rápidamente para concentraciones más altas, que es cuando las partículas se interaccionan entre sí.

La tixotropía de la suspensión viene dada por:

$$\theta = k_3 c + k_4 c^3$$

El límite elástico de las suspensiones en agua (caolinita-ácido) puede calcularse como sigue:

$$F_e = k_5 c^3$$

aplicable en un amplio margen de concentración, varía con el tamaño de partícula. Las suspensiones perfectas defloculadas (como las de caolinita-sólidos), incluso cuando están a elevadas concentraciones, no muestran un límite elástico susceptible de medición.

### c.- Masa plástica

Presenta un límite elástico suficientemente alto, capaz de resistir las fuerzas de gravedad, es interesante considerar algunos principios fundamentales. En general, el sistema de tres componentes, aire-agua-arcilla, puede expresarse de algún modo convencional; como puede ser un diagrama de volúmenes para una presión de moldeo bajo, según figura 15. Este diagrama se basa en series de mezclas de arcilla y agua, con un creciente contenido de agua, cada una de las cuales esta moldeada en un troquel cilíndrico de acero a una presión dada. En estos moldes se tiene en cuenta el posible escape de agua sobrante. Los volúmenes en seco y en húmedo y los pesos secos y mojado permitirán determinar fácilmente los volúmenes de aire, agua y arcilla, teniendo en cuenta que se conoce el peso específico de la arcilla.

Conforme aumenta la cantidad de agua, el volumen total de la mezcla, que originalmente consistía en arcilla y aire, presenta un ligero cambio a medida que se van llenando los poros. En el punto crítico, todos los huecos de arcilla se han llenado de agua y la fase de aire desaparece. Al aumentar todavía más

la cantidad de agua, las partículas de arcilla quedan separadas entre sí por una película de espesor creciente, hasta que alcanza la estabilidad máxima a la presión dada. A esta situación puede denominarse "punto de saturación". Si existe más agua que la correspondiente a este punto en la arcilla original, se escurrirá por la acción de una prensa permeable.

Las características de flujo de la masa plástica se muestran en la figura 16, para distintos contenidos de agua. El fluido es elasto-plástico, y, a medida que el contenido de agua aumenta, el límite elástico desciende mientras crece la tensión máxima.

El límite elástico que presentan las masas plásticas se explica por las fuerzas de compresión que ejerce sobre ellas la capa superficial del agua en el exterior de la masa.

En la figura 17 se muestra un campo de fuerzas, que actúa sobre una partícula de arcilla ácida. Una suspensión defloculada fuera del agua puede representarse por el punto B, donde las fuerzas atractivas y repulsivas se neutralizan exactamente. Bajo las fuerzas de tensión, las partículas se separan entre sí ligeramente; entrando en juego entonces las fuerzas

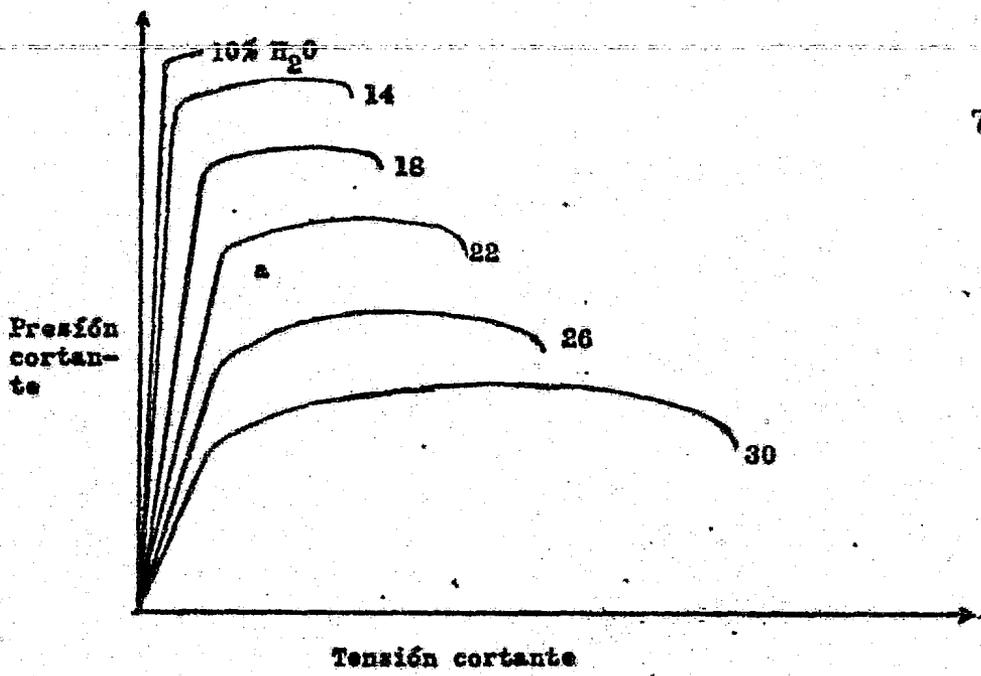


figura 16 Propiedades relativas a la fluidez en un cuerpo plástico

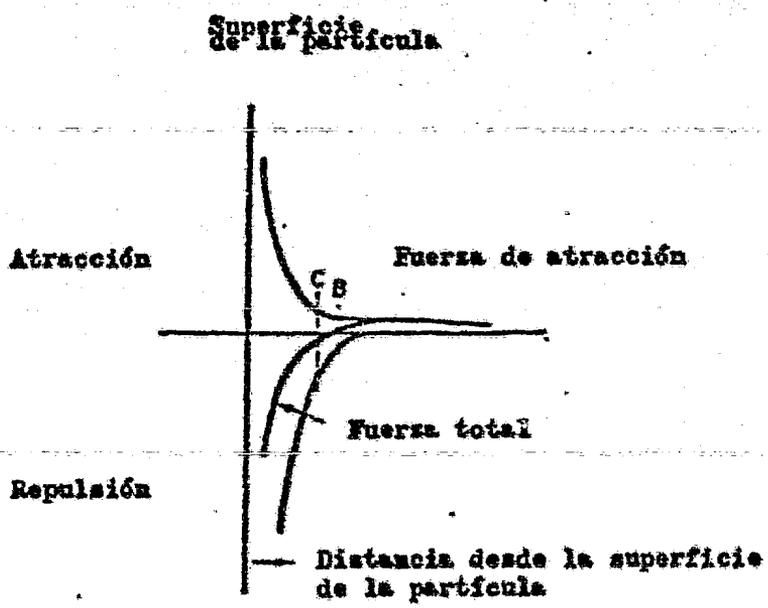


figura 17 Campo de fuerza alrededor de una partícula arcilla cuando está rodeada de agua.

atractivas, que cuentan ya para el límite elástico encontrándose en un sistema como el considerado. Por otra parte, si se elimina un poco el agua del sistema mediante una compresión con pistones porosos (filtros) o bien mediante el secado, las partículas se acercarán mucho entre sí, en una situación como la representada en el punto C, de tal modo que las fuerzas de repulsión entre las partículas aumentará justamente hasta compensar la presión externa producida o bien por los pistones o por la capilaridad superficial.

c.- Proceso de moldeo.

Barbotinas de moldeo y defloculantes en general; las propiedades más importantes de las barbotinas son la viscosidad y el peso específico. En el caso de las barbotinas con alto contenido de chamota, que es lo que interesa en este caso; el peso específico es alto comparado con muchas pastas para la loza blanca que generalmente es de 2.0 g/cc. La viscosidad también es generalmente alta cuando se trata de secciones gruesas. Es difícil medir la viscosidad en las masas fluidas que presentan un elevado contenido de chamota, no solamente a causa de que las partículas son más bastas, sino también a causa de que la viscosidad varía con el tiempo y la velocidad de agitación.

Una propiedad interesante es la reducción de la viscosidad a medida que la barbotina se agita con más rapidez, debido a un efecto tixotrópico. Esta propiedad presenta aplicación práctica, ya que se vierte la barbotina en el molde en forma líquida, agitando

y produciendo vibraciones al mismo tiempo para ayudar a la fluidez. Si se deja en reposo dentro del molde, la barbotina endurece de tal modo que se necesita eliminar muy poca agua del molde para formar un producto lo suficientemente consistente para sostenerse por si mismo.

#### d.- Barbotinas

Una buena barbotina debe poseer las siguientes propiedades:

- 1.- Una viscosidad suficientemente baja para penetrar con facilidad dentro del molde y llenarlo por dentro.
- 2.- Un peso específico lo suficientemente alto como para que la chamota no sedimente.
- 3.- Capacidad para producir moldeados perfectos sin zonas de contracción.
- 4.- Una estabilidad razonable en el almacenado.
- 5.- Desprendimiento limpio (sin residuo) del molde.
- 6.- Rápida solidificación en el molde.
- 7.- Baja contracción del secado.
- 8.- Gran resistencia a la deformación.
- 9.- No atrapar aire en el interior de la masa.
10. Gran tixotropía.

Se necesita mucha experiencia para conseguir una bue

na barbotina. El tipo y cantidad de arcilla es importante, así como la granulometría de la chamota. La cantidad de defloculante debe clasificarse cuidadosamente.

Es conveniente comunicar un alto grado de tixotropia a la pasta que pueda permanecer fluida por vibración. En la tabla 9 se da la composición de una pasta tixotrópica de alto contenido de chamota.

Tabla 9 Barbotina de chamota para recipientes de vidrio.

MATERIAL	%
caolín	13
arcilla(ball clay)	10
chamota	
de 10-20 mallas	18
de 20-40 mallas	16
de 40-100 mallas	10
menores de 40 mallas	9
silicato sódico	0.025
carbonato sódico	0.012

### e.- Moldes.

Los moldes para el moldeo con barbotina se hacen generalmente a base de yeso, del mismo modo que en la alfarería. Sin embargo, el bajo contenido en agua que poseen las pastas requiere la eliminación de muy poca cantidad de ella y por lo tanto los moldes pueden ser bastante delgados. Un molde típico utilizado en este tipo de trabajos, puede observarse en la figura 18. Se han llevado a cabo muchos experimentos para producir un molde de mayor duración que el de yeso.

FABRICACIÓN

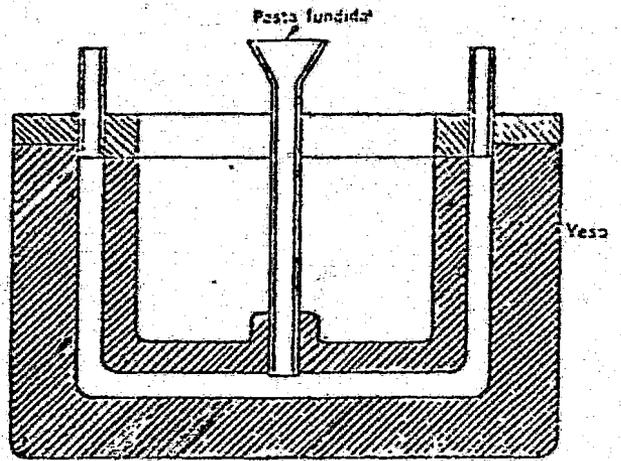


Figura 18 Un molde para moldeo sólido.

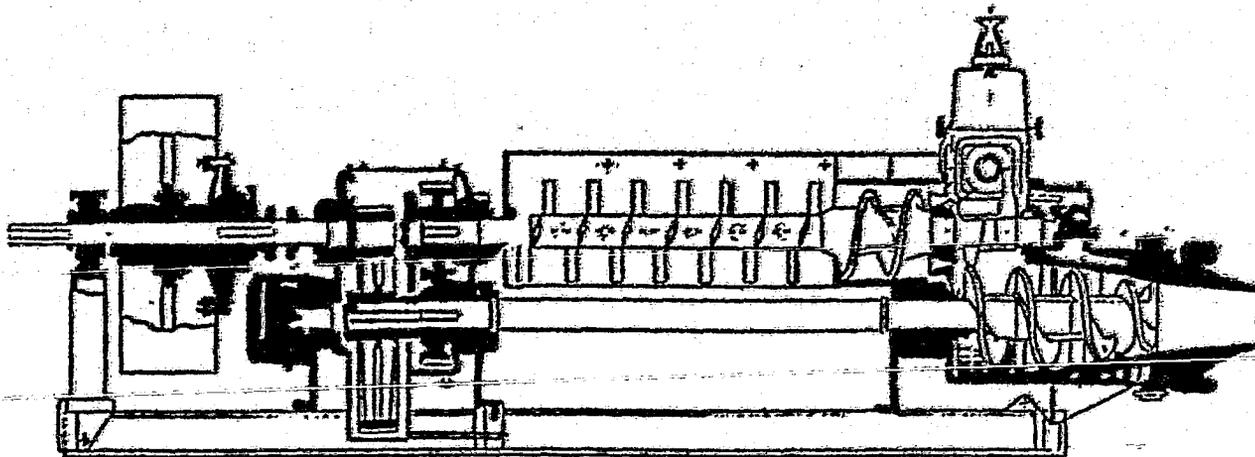
#### 4.2 Proceso de extrusión y corte por alambre.

El ladrillo de extrusión y corte por alambre se fabrica con una consistencia justamente por debajo del punto crítico; por lo tanto, se necesita una gran fuerza para moldear la arcilla. La mayoría de los refractarios fabricados por este procedimiento se moldean forzando el paso del material plástico a través de una boquilla, de la cual emerge una columna más o menos homogénea que puede cortarse en longitudes definidas. Esta columna generalmente es producida por un sistema que consiste de un tornillo de forma de hélice que penetra en la artesa forzando a la arcilla a que pase a presión elevada a través del troquel.

Un diagrama de fabricación de ladrillos por el proceso de extrusión puede observarse en la figura 19; en él las arcillas se preparan de un modo semejante al método manual de fabricación de ladrillos. El agua se adiciona a la mezcla dentro de una amasadora o una trituradora giratoria. Normalmente se prefiere el primer método, dado que esta operación es un proceso continuo y se adapta mejor a la alimentación. La amasadora es un recipiente largo en forma de artesa, que posee dos ejes horizontales que se dirigen hacia el centro, a los cuales van unidos unas paletas para amasar y mezclar las arcillas

Figura. 19 Máquina de extrusión para la fabricación de ladrillos.

83



se impulsaría luego hacia el extremo de salida. El agua puede adicionarse al material en la amasadora para producir en la mezcla una consistencia conveniente.

Es muy importante el diseño de la boquilla para asegurar una velocidad uniforme por parte de la arcilla, en todos los puntos de la corriente, para evitar de este modo la aparición de tensiones. Debe tenerse en cuenta también a la hora de diseñar un taldro, el evitar que tenga lugar laminaciones que se manifiestan a menudo en el centro de la columna, apareciendo como hendidura en forma de S. La boquilla se lubrica con aceite para reducir la fricción a menudo se calienta con vapor para conseguir el mismo propósito. Se ha encontrado que si la arcilla se mezcla en la cámara en el interior de una campana de vacío, el aire se elimina rápidamente y se produce una columna más densa y homogénea al pasar a través de la boquilla. La eliminación de aire se ha convertido en una práctica muy común en las operaciones de extrusión y además facilita la producción de ladrillos homogéneos a partir de arcillas que previamente no podría manejarse con facilidad. Permite al mismo tiempo obtener una estructura más

densa. Sin embargo, la eliminación de aire no es necesaria e indispensable en todos los cuerpos, ya que muchos de ellos pueden manejarse satisfactoriamente sin necesidad de tal eliminación. Esta puede proporcionar a ciertas mezclas plásticidad, mayor dureza en el secado e igualmente en la cocción.

La columna de arcilla que sale del taladro moldeada se corta en secciones uniformes con un cortador de alambre. Es difícil hacer funcionar una cortadora de alambre si el contenido de chamota de la masa es bastante alto o si la granulometría de la chamota es muy amplia.

Existen muy pocos casos en que los ladrillos producidos mediante el procedimiento de la cortadora de alambre sean lo suficientemente uniformes en tamaño como para que puedan ser utilizados como refractarios. Por lo tanto, la práctica general es la de pasarlos a través de una máquina de reprensado, donde se les da su tamaño verdadero y se les pone la marca de fábrica. Después de reprensarlos, los ladrillos son ya lo suficientemente consistentes y pueden transportarse para ser colocados de inmediato en los trenes de secado.

#### 4.3 Proceso de prensado en seco.

En el proceso de prensado en seco para la fabricación de refractarios, la arcilla presenta una consistencia

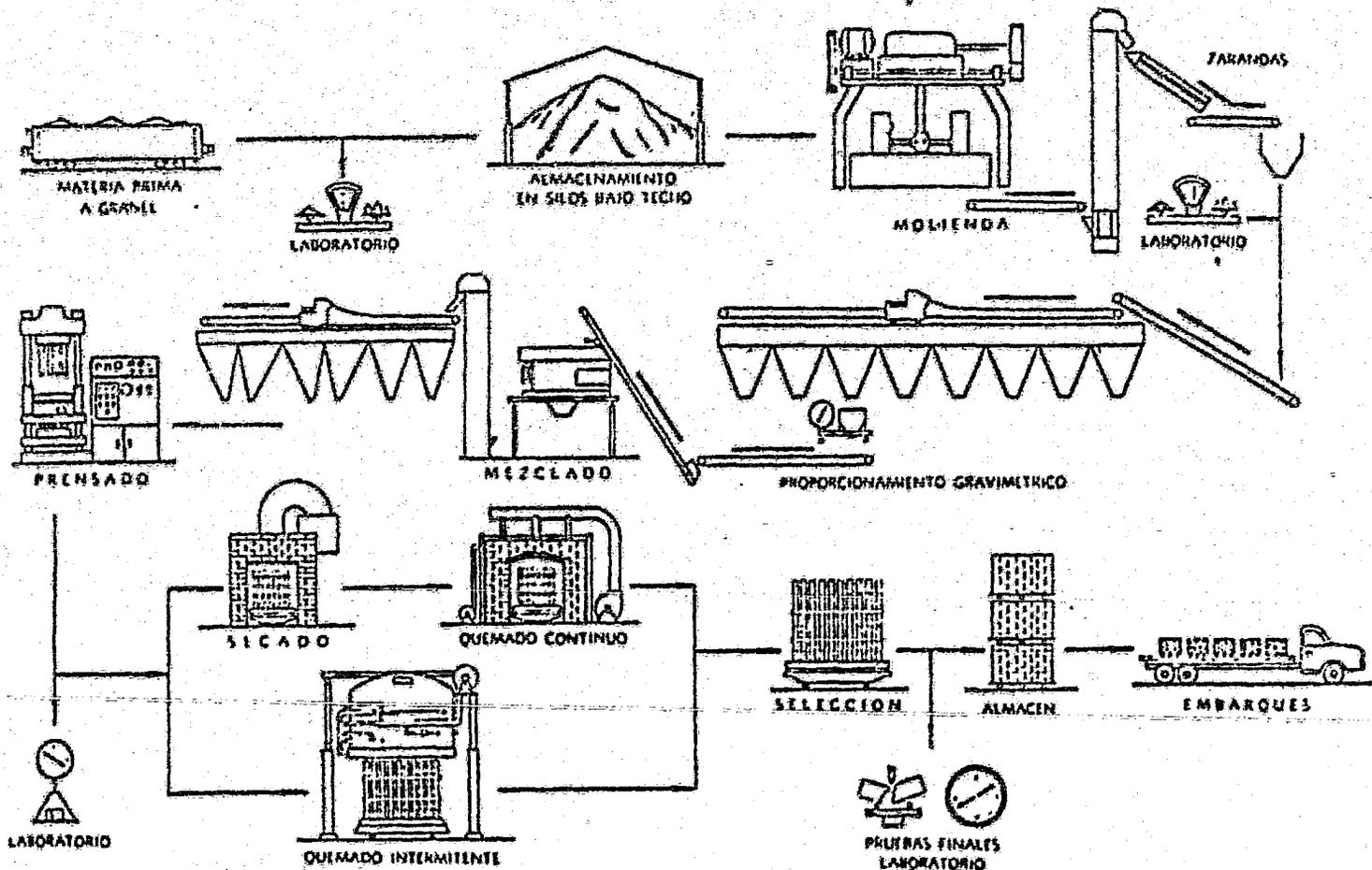
de un polvo húmedo que contiene aproximadamente de 7 a 10% de humedad. Solamente mediante una presión elevada puede consolidarse como una masa homogénea. El diagrama de fabricación para el sistema de prensado en seco se muestra en la figura 20.

En la práctica se ha encontrado que debe tenerse un control cuidadoso para la determinación de granulometrias de las arcillas, mediante un tamizado y re combinado en proporción definida. La mezcla de materiales se hace en seco, posteriormente es humedecida en una trituradora o amasadora, proporcionándole entonces la consistencia conveniente. El material mezclado se pasa a una tolva situada encima de la prensa, donde la acción de mezclado continúa y se deja fluir hasta el interior de la prensa conforme se necesite.

El prensado en seco se hace normalmente en una prensa del tipo articulado (ver figura 21) en la que pueden pren sarse hasta cuatro ladrillos estandar al mismo tiempo. En ciertos tipos de refractario se utilizan prensas hidráulicas. Para obtener un ladrillo uniforme, es esencial que la mezcla sea uniforme, que cada golpe del émbolo introduzca en los troqueles el mismo peso de material, y que éste distribuya llenando completamente las cavidades.

# PROCESO DE FABRICACION DE NUESTROS MATERIALES REFRACTARIOS

Figura 20



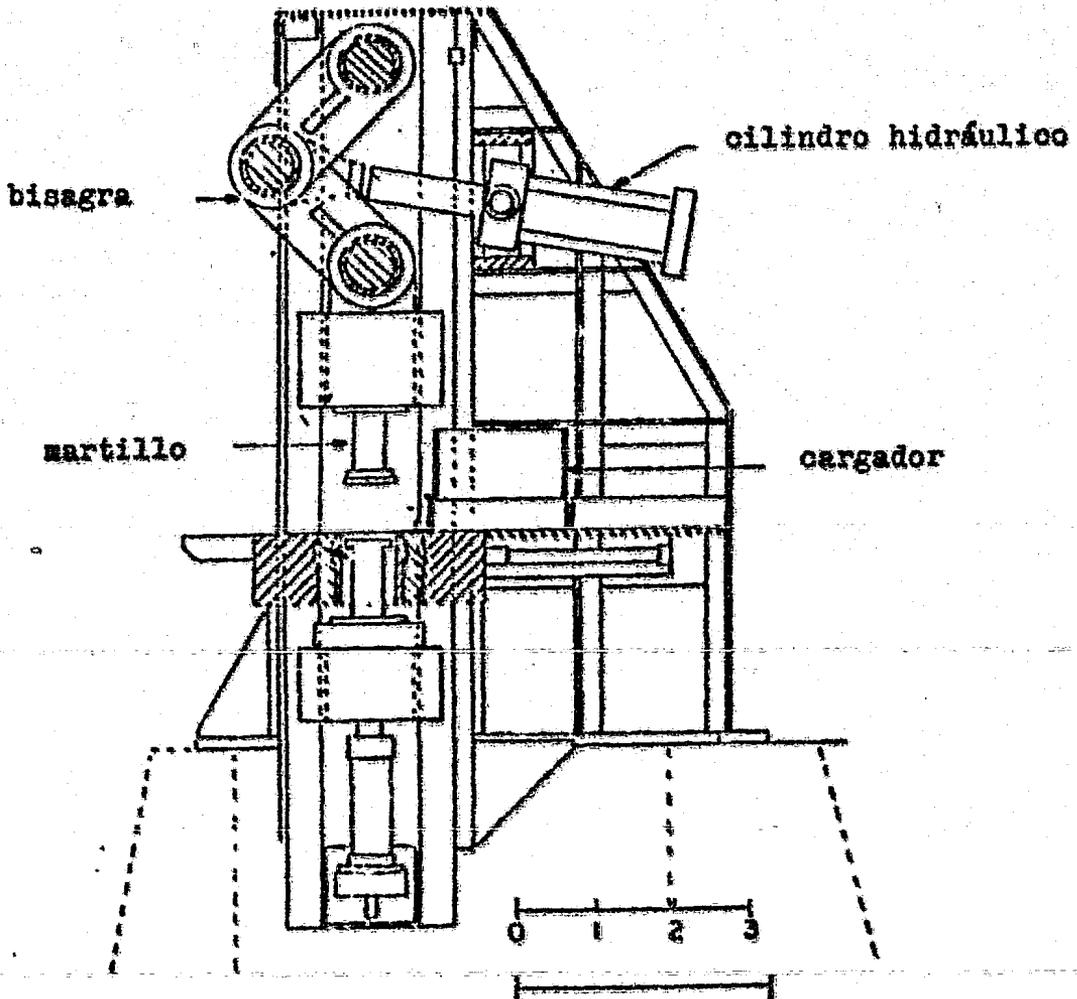


Figura 21 Prensa Hidráulica con capacidad de 1300 ton.

Hasta hace poco no se conocía exactamente la presión a que funcionaba la prensa articulada. Ahora puede determinarse mediante el alargamiento de los brazos laterales, indicando presiones tan altos como 1000 kg/cm<sup>2</sup>.

En muchos materiales, la presión máxima está limitada por la expansión del aire atrapado, el cual produce grietas al sesaparecer la presión aplicada. En la actualidad se han incorporado a muchas prensas aparatos de vacío que expulsan el aire fuera del molde e inician el mezclado tan pronto como el macho se introduce en el molde unas hendiduras de .007 pulgadas de espesor, que se sitúan en los machos, conectan el molde con un sistema de vacío.

El ladrillo descargado de la prensa en seco puede llevarse directamente al horno túnel sin necesidad de un secado prolongado como el normal.

La velocidad de fabricación de ladrillos por este tipo de prensa oscila entre 1000 y 2000 ladrillos por hora.

El proceso de prensado en seco es una práctica industrial para todo tipo de ladrillos refractarios.

Los ladrillos producidos por este tipo de prensa son de tamaño muy uniforme. poseen caras y aristas muy fuertes y presentan muy poca tendencia al alabeo. Tienen una buena resistencia a la disgregación por choque térmico y generalmente resisten bien a la presión.

El espesor de las piezas en seco está limitado por la fricción con las paredes laterales que presentan un espesor de 100 mm. aproximadamente en la prensa convencional; sin embargo, se han llevado a cabo numerosos ensayos para mejorar estas condiciones.

a.- En la fabricación de refractarios es muy importante mantener la consistencia de los tamaños de partícula de la chamota especialmente en un refractario crudo aglomerado químicamente. Se ha observado que una granulometría adecuada ayuda a conseguir una mayor resistencia a la disgregación en la temperatura de trabajo. Para esto se dividen las partículas mediante tamices en varias fracciones y posteriormente ~~recombinándolos~~ en pesos definidos para reproducir la distribución deseada.

Con el propósito de disminuir la porosidad, una gran cantidad de datos ~~fué~~ necesario recopilar en base de experimentos, usando materiales refractarios.

~~Considerando primeramente un sistema de materiales~~ cúbicos en que las partículas empacan cúbicamente, resultando cero de porosidad, suponiendo que la absorción de aire fuera pequeña. Si los sólidos tienen condensado una película de aire sin que estén en contacto, el porcentaje de vacío aumenta con la dismi-

nución de tamaños del sólido.

Para un sistema cúbico empacado con partículas esféricas, el porcentaje de vacío es constante. Si existe una esfera o número de esferas de igual tamaño, tan grande como sus diámetros son exactamente múltiplos de la unidad y son apilados de tal modo que cada esfera está directamente sobre otra en una formación cúbica.

En un sistema cúbico empacado de esferas el porcentaje de vacío es de 47.64%.

Una simple esfera de diámetro  $D$ , en un cilindro y altura  $D$ , da un porcentaje de 33.5% de vacío.

La humedad tiene gran importancia, ya que el agua que rodea a los granos disminuye de 2 a 5% de espacios vacíos ayudando a un empacado mejor.

Si utilizamos arena húmeda esta ocupa más espacio por unidad de peso, éste peso por menor unidad de volumen, basado en el peso actual de la arena menos el agua, ésta arena seca empacada de la misma manera. La explicación de esta anomalía es que una película de agua envuelve cada grano de arena separando los granos vecinos.

La tabla 10, muestra los porcentajes de vacío, calculados en base a la gravedad específica de cuarzo

Tabla 10. Porcentajes de vacío, calculados en base a la gravedad específica de cuarzo (2.65).

	seco al rededor	seco libre	libre	libre	libre	libre	libre	libre
Peso de agua %	0.0	0.0	1.0	2.125	5.0	7.5	15	17.125
g/cc	1.16	1.16	2.83	1.45	1.37	1.46	1.67	2.19
Peso de seco en 1 cc.	1.16	1.16	1.55	1.41	1.30	1.36	1.45	1.84
Vacío en %	30.6	36.0	41.3	46.7	50.8	48.6	45.2	30.6

que es de (2.65 g/cc).

La figura 22 muestra el modelo de dos componentes de un grano grueso y otro fino, en las abscisas la proporción de granos gruesos y finos de la mezcla para un peso total constante. En las ordenadas se hallan los volúmenes. La línea AB representa el volumen verdadero de los sólidos. El punto C representa el volumen aparente de la mezcla formada únicamente con granos gruesos y D el volumen aparente de los granos finos. El volumen aparente será el volumen verdadero más el de los espacios vacíos. Si una pequeña proporción de material grueso se reemplaza por material fino, es evidente que a niveles superiores de un cierto punto, el material fino llenará simplemente los espacios vacíos entre los granos mayores y por tanto el volumen aparente total disminuirá en proporción a la cantidad de partícula fina adicional. En consecuencia, el volumen aparente teórico seguirá la marcha de la curva CE. Iniciando ahora el proceso a partir del otro extremo del diagrama ; si una cierta cantidad de material fino se sustituye por material grueso, éste desplazará un volumen igual de material fino y de espacios vacíos que existen entre partículas. Por lo tanto, el

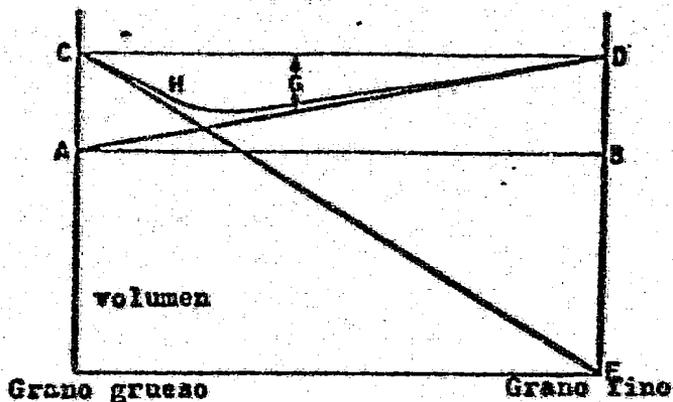
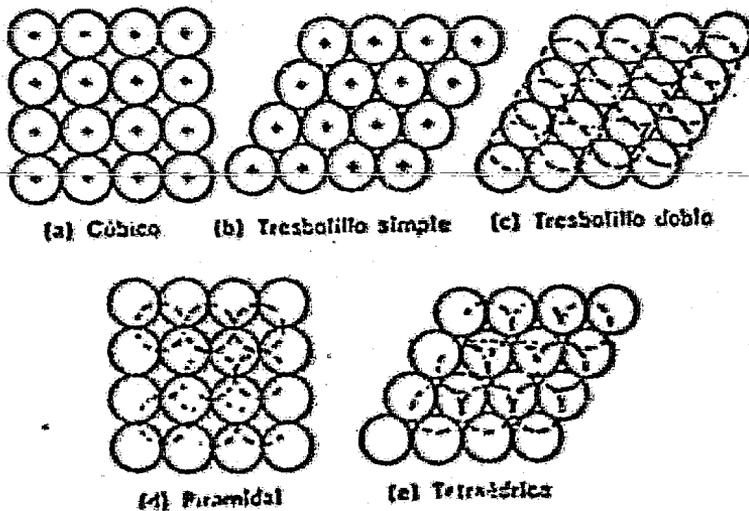


Figura 22. Empaquetamiento para dos tamaños de partícula.

Figura 23. Esferas de diámetro igual empacadas de manera regular.



volumen total disminuirá debido a la eliminación de una parte de los espacios vacíos correspondientes al material al material fino . Según ésta deducción, la línea AD representará los volúmenes teóricos aparentes. Cuando la línea CE y AD se cortan, e el punto de cruce corresponde al volumen mínimo de la mezcla de partícula gruesa y fina que presentan una relación infinita entre sus diámetros. O sea  $D(\text{grueso}) / D(\text{fino}) = \infty$  . En los casos reales ésta relación es siempre finita y la curva real de volúmenes aparentes vendrá indicada por H. La línea CD representa el volumen aparente de las fracciones antes del proceso de mezclado y la distancia G representa la contracción de volumen durante el mezclado. Los espacios porosos en un agregado dependen de la relación entre el tamaño de partícula y su forma en la formación de empaque.

**b.- Tipo de empaque.**

Esferas de igual diámetro pueden ser empaçadas en una manera regular en cinco formas;

- 1.- Cúbico
- 2.- Tresholillo simple o cúbico tetraédrico
- 3.- Tresholillo doble

#### 4.- Piramidal

#### 5.- Tetraédrico

Como se muestra en la figura 23, los círculos completos representan esferas de un solo plano, y las líneas punteadas indican esferas en segundo plano. En el empaquetado cúbico, cada esfera toca cuatro esferas de la misma capa, el punto superior de la esfera en la capa inferior en contacto con el punto inferior de la capa superior.

En el empaque de tresbolillo simple, cada esfera toca seis de sus vecindades en la misma capa y también el punto superior de la capa inferior en contacto con los puntos inferiores de la capa superior.

El empaque de tresbolillo doble es igual que el simple excepto que las esferas de la capa superior descansan entre dos esferas adyacentes de la capa inferior.

Empaquetamiento piramidal, es un arreglo de esferas de tal modo que cada esfera está en contacto con cuatro esferas adyacentes de la capa inferior.

El empaquetamiento tetraédrico, tiene un arreglo como el tresbolillo simple, pero la capa superior tiene a cada esfera descansando entre tres esferas de la capa inferior.

Para el empaquetamiento de uso progresivo de pequeñas esferas fué hecho en un sistema tetraédrico. Las esferas iniciales son llamadas primarias, los espacios vacíos son empacados con esferas de diferentes tamaños, los que se introducen en las esferas primarias llamadas esferas secundarias, seguidas de esferas ternarias en cavidades más pequeñas y así podemos introducir esferas cuaternarias y quinquinarias para completar el empaquetamiento.

c.- Forma de partícula.

Hoy en día, es de gran importancia la forma de las partículas para la manufactura de refractarios.

Los orígenes de la chamota refractaria es de:

- 1.- Calcinción de trozos de arcilla directamente de la mina (usualmente roca o arcilla rocosa).
- 2.- Calcinción de arcillas crudas
- 3.- Material de uso refractario; como materiales monoplásticos, sillimanita, sílice, alúmina, carburo de silicio, etc.

La chamota al triturarse produce formas angulares de partícula, las cuales contribuyen a la fuerte unión y son utilizadas para llenar vacíos obteniendo un excelente empaquetado, obteniendo una mínima porosidad.

#### 4.4 Secado.

La industria de los refractarios ha adoptado métodos de fabricación con contenidos de agua mínimos para simplificar el proceso de modo que el secado y cocción se lleve a cabo sin que pierdan su forma. Esto significa que las contracciones que pueden aparecer durante el secado puedan influir decisivamente en la calidad final del producto.

Tres factores son de gran importancia en el secado de ladrillos refractarios.

##### 1.- El producto

Los materiales refractarios para el secado consisten de un material crudo o mezcla de tales materiales con un tamaño determinado que debe tomarse en cuenta el secarse. Se debe considerar los esfuerzos durante la manufactura de éstos, provocando tensiones las cuales son permanentes, reduciendo la velocidad del secado permisible. Esto significa que una mejora durante la formación resulta un notable acortamiento en el tiempo de secado.

##### 2.- El aire.

El aire constituye el medio de transporte para el calor que debe aportarse a los ladrillos y para el agua que éstos ceden.

### 3.- El secador.

Por la estructura del secador quedan determinadas las disposiciones de las piezas, las direcciones de circulación del aire y la longitud del recorrido de esta circulación. El modo de conducir el proceso (por ejemplo el número de piezas y disposición) decide el secado uniforme de todas las piezas y con ello el rendimiento. La interrupción de la corriente de aire en el secador, la reversibilidad de la dirección de aire, la continua variación de la dirección, así como la circulación de los ladrillos constituyen las posibles influencias en el secado. En la curva de secado óptima se abarcan todas las influencias que determinan la velocidad permisible de secado en la pieza. Su determinación se efectúa en un secador con recirculación, en el que se dirige el proceso de manera que las piezas se sequen sin daños en el mínimo tiempo posible. Ya que las condiciones de circulación en la proximidad de cada pieza pueda influir fuertemente en ella, la curva óptima de secado deberá determinarse exactamente y en las mismas condiciones de circulación.

#### a.- Proceso durante el secado

El objetivo del proceso de secado consiste en obte-

ner unas piezas sin daños, secas para el proceso de cocción.

Para poderse adaptar a las exigencias de calidad en una competencia con el mercado, es necesario ocuparse de los procesos que tienen lugar determinando las condiciones óptimas de secado y los factores que sobre ellas influyen.

b.- Contracción.

El fenómeno conocido que aparece durante el secado es la contracción. Si a la pieza aún plástica le restamos agua, ésta disminuye de tamaño. Con el aparato de Bigot se puede determinar la relación entre la disminución de agua y la contracción. La representación gráfica de este proceso se conoce con el nombre de la curva de Bigot, figura 24.

La pieza recién salida de la prensa tiene una determinada longitud y un contenido de agua. Si eliminamos el agua se reduce la longitud hasta un cierto grado en el que aparece un punto de inflexión en la curva. Este punto de inflexión nos indica el contenido de agua para el cual la pieza ya no tiene variación. La contracción aparece en tres dimensiones.

En la figura 25 se puede observar un comportamiento diferente de contracción para varios materiales. Más que la contracción final las curvas se diferencian

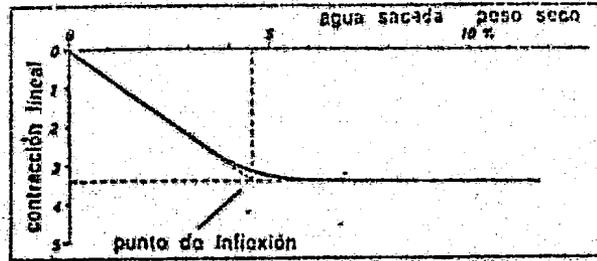


Fig. 24 Ejemplo de una curva de Bigot.

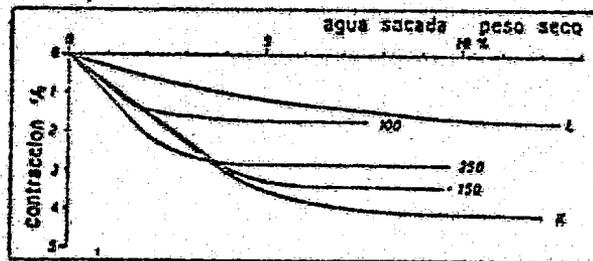


Fig. 25 Distintas curvas de Bigot.

movimiento del agua por fuerzas capilares en sentido de la pendiente

% humedad en el material

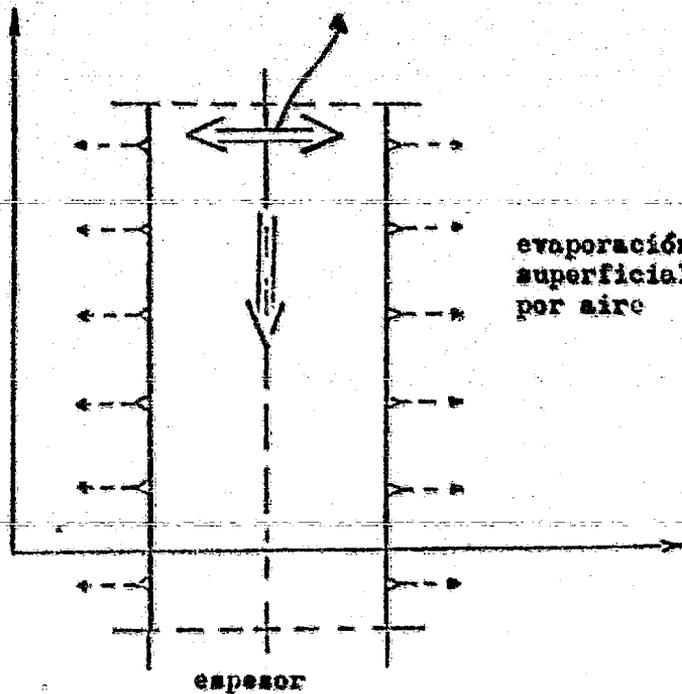


Figura 26 . Contenido de agua a través del espesor de la masa.

en las pendientes entre el comienzo del secado y el punto de inflexión. Cuando más plano sea el curso de la curva, tanto menor será la contracción por porcentaje de agua y las deformaciones que puedan aparecer durante el secado; consecuentemente será más fácil secar el material. La medida final de la contracción sólo tiene importancia por proveer la cantidad de agua que debe eliminarse en él, zona inicial de secado.

c.- Conductividad de la humedad.

En la figura 26 se muestran las magnitudes del secado a través de la distribución de agua en el espesor del ladrillo.

La diferencia entre el contenido de agua en la superficie y en el centro aumenta con la velocidad del secado y disminuye con ella.

Por otra parte, la diferencia en el contenido de agua disminuye con la conductividad creciente. Esta conductividad nos indica la facilidad con que el agua puede pasar del interior a la superficie; viene determinada por la estructura de los poros, su forma y la naturaleza superficial de las partículas del material así como por las características del agua, ver figura 27.

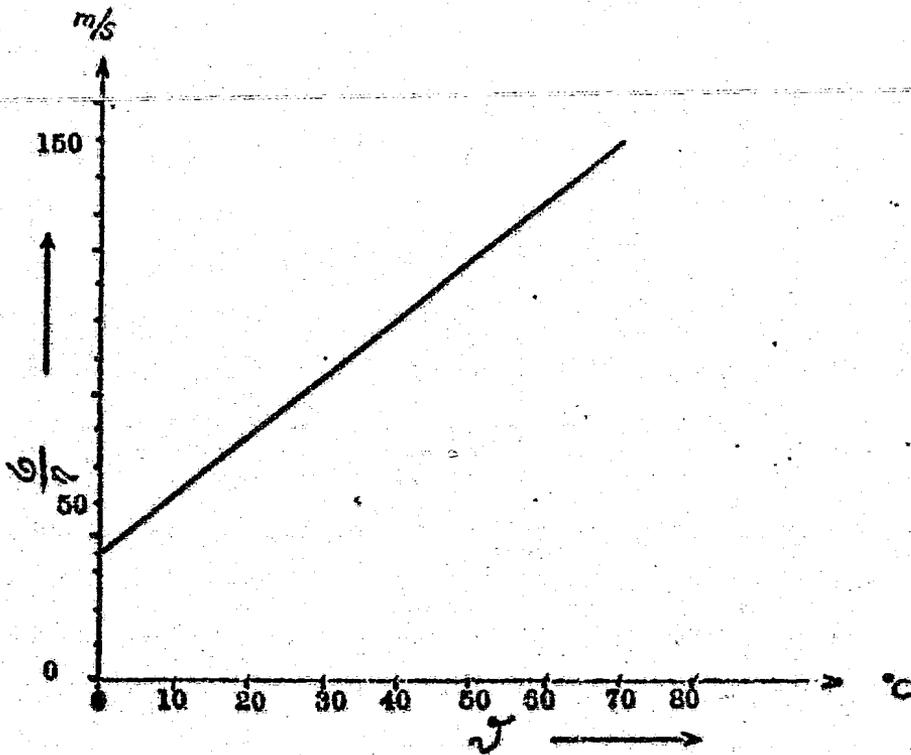
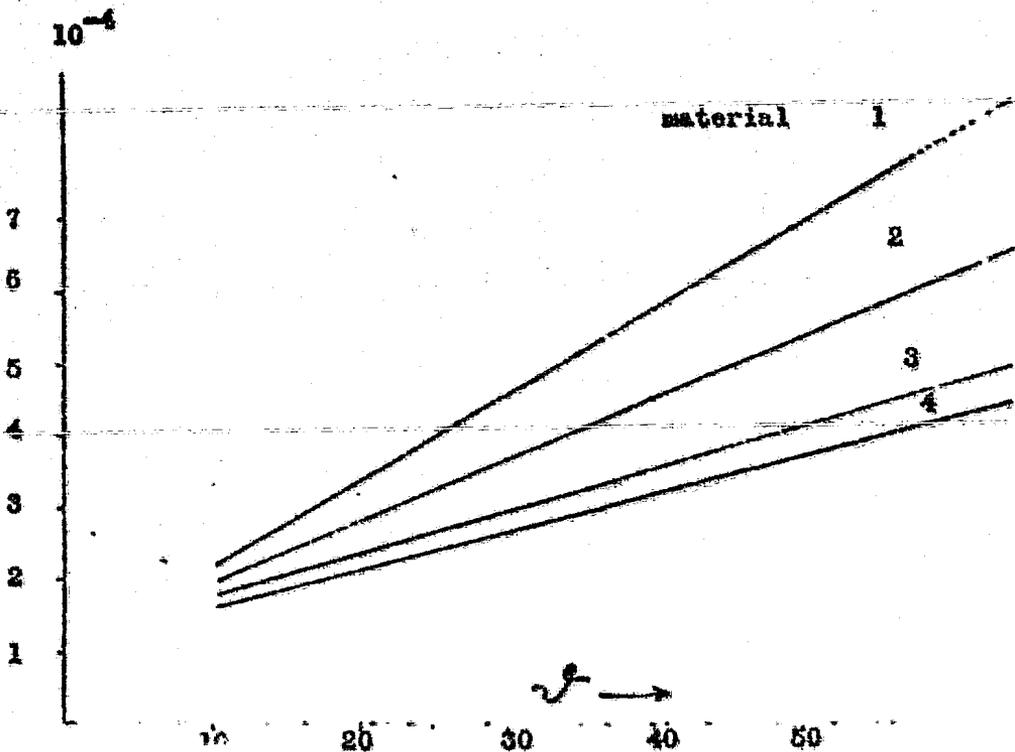


Figura 27 Relación entre la tensión superficial y la viscosidad del agua en función de la temperatura.

Figura 28 Evolución de la conductividad de humedad de diferentes materiales.



El transporte de agua a través de los capilares es influenciado por la relación entre la tensión superficial del agua y su viscosidad dinámica. La relación entre estas dos características muestra una tendencia casi lineal de la temperatura.

La determinación de la conductividad se efectúa en unos cilindros de arcilla alargados provistos en su superficie de una cubierta impermeable de manera que solo pueden ceder agua en las superficies de corte circulares. Después de un cierto tiempo de secado bajo condiciones constantes de un secador experimental, se cortan. Pesando, secando y pesando de nuevo se determina la distribución del contenido de agua y a partir de esto, teniendo en cuenta la velocidad de secado, se calcula la conductividad, para determinar la dependencia de la temperatura.

#### d.- Dilatación elástica.

La figura 28, muestra las diferencias de distintos materiales. Si observamos las figuras 25 y 26, se llega a la conclusión de que la pieza debería deformarse proporcionalmente a la distribución del contenido de agua. Pero como se trata de un cuerpo unitario éste no se puede abombar a voluntad, ya que las zonas superiores e inferiores se oponen a tales de -

formaciones. Estas deformaciones oscilantes provocan en el secado una dilatación de las capas exteriores de la pieza. Si la dilatación supera una cierta medida como consecuencia de una velocidad de secado excesiva aparecen grietas. Por lo tanto no debe tolerar se la dilatación hasta la aparición de grietas, pero también una dilatación que provoque una fluencia plástica puede llevar durante el secado a daños si las partes deformadas plásticamente no ceden, sólo pueden romperse. En ladrillos de forma normal pueden aparecer esporádicamente grietas en el interior. Tales grietas deben atribuirse a que la superficie se ha dilatado a consecuencia de una velocidad de secado excesiva, se ha deformado parte plásticamente quedando en esa última forma. El material no dilatado y en parte comprimido en el interior de la pieza se seca y contrae con retraso con lo que queda dentro de un especie de marco rígido exterior. Debido a la dilatación, este marco es demasiado grande de modo que al contraerse en el interior de esta zona aparecen grietas.

El objetivo debe ser, mantener dentro de la zona elástica las deformaciones consecuentes del secado. La magnitud específica del material que influencia

La velocidad de secado permisible es la dilatación elástica del material. Esta se determina en prove-  
tas de 20 mm. de longitud y 23 mm. de diámetro en  
el plastómetro de placas paralelas. En él se fuerza  
una pequeña deformación por carga. Al descargar  
bruscamente se mide la longitud de recuperación y  
se refiere a la longitud de partida siendo esta la  
relación de dilatación elástica. Los valores hasta  
ahora determinados están entre el 1.2 y 2.7%.

Estas tres magnitudes físicas (contracción, conducti-  
vidad de la humedad y la dilatación elástica) rela-  
cionadas con el secado caracterizan al material con  
respecto a su comportamiento.

e.- Curva de secado óptima.

La curva de secado óptima debe constituir la base de  
planificación de nuevas instalaciones y mejoramien-  
to de las mismas.

En la técnica habitual del secado en tres etapas, se  
intenta en primer lugar calentar el material sin se-  
carlo, para poderlo secar más rápido a una tempera-  
tura superior posteriormente. Tras la zona de calen-  
tamiento tiene lugar el secado principal hasta el  
final del proceso de contracción a temperaturas del  
aire constante entre 40 y 60°C, despues de elevar  
la temperatura del aire para acelerar el secado fi-  
nal. Las experiencias de este método de secado pue-

den resumirse de la siguiente manera:

- 1.- Temperaturas altas facilitan grandes velocidades de secado.
- 2.- La fase más difícil tiene lugar en el "límite de condensación.
- 3.- Para mantener los fenómenos de condensación dentro de un nivel tolerable, se calienta el aire solo entre 40 y 60° C. durante el secado.

f.- Importancia de las magnitudes físicas del secado relacionadas con el material.

Al considerar estas magnitudes resulta que la velocidad de secado aumenta con la conductividad de la humedad, aumenta así mismo con la dilatación elástica y es inversamente proporcional al coeficiente de contracción. Si se considera la figura 26, se observa la distribución del contenido de agua en el espesor del ladrillo; para cada contenido resultará un perfil de contenido de agua tolerable y con él para una temperatura dada una determinada velocidad de secado admisible. Este perfil de contenido de agua se desplaza para condiciones de secado constante, paralelamente a la disminución de los contenidos de agua. Debemos considerar que el aumento de la velocidad de secado para una misma temperatura nos lleva a un

perfil de contenido de agua más inclinado, es decir, a una mayor diferencia en el contenido entre la superficie y el centro del ladrillo. Una disminución de la velocidad de secado tiene como consecuencia para una misma temperatura un perfil más plano y significa simultáneamente la pérdida de un tiempo de secado. Si a una cierta temperatura de la pieza y una velocidad de secado admisible continuamos secando constantemente, elevando la temperatura de la pieza se aplanan el perfil, haciendo menor la diferencia de humedad entre la superficie y el centro del ladrillo, ya que la conductividad aumenta como consecuencia de la elevación de la temperatura. Para volver a alcanzar nuevamente la diferencia en el contenido de agua tolerada, puede elevarse la velocidad de secado. Es decir; si durante el secado elevamos constantemente la temperatura de la pieza, podemos secar con velocidad creciente. Así se encontró un nuevo camino para disminuir la curva de secado que simultáneamente significa una solución para el proceso que tiene lugar en el límite de condensación.

g.- Comparación de tiempos entre el secado en tres etapas y el secado con calentamiento simultaneo.

En la figura 29, tenemos representado el resultado de las experiencias efectuadas con un producto por ambos métodos, buscando el tiempo de secado mínimo. La figura muestra la curva de la velocidad de secado para cada uno de los procedimientos.

En ambos casos la temperatura del aire en el secado final fué de  $80^{\circ}\text{C}$ . En el secado en tres etapas tras 34 horas se consiguió un contenido de agua residual de 4%, lo que por el método de calefacción simultanea se alcanza a las 16 horas. El ahorro de tiempo es de mas del 50%.

h.- Distintas formas de representación de la curva de secado óptima.

La curva de secado óptima contiene tres elementos principales, la velocidad de secado admisible que depende del material y de la forma, las condiciones climáticas bajo las cuales se consigue esta velocidad y la relación entre los dos primeros elementos.

i.- Representación técnica de la curva óptima de secado en función del material.

La figura 30, señala la variación de la temperatura de la pieza, el contenido de agua en por ciento res-

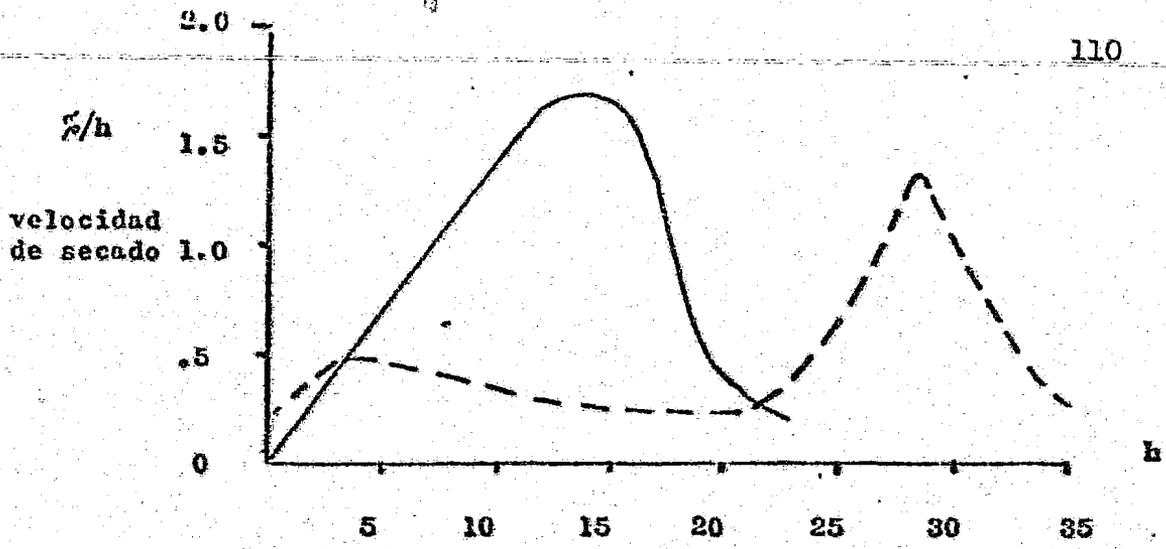
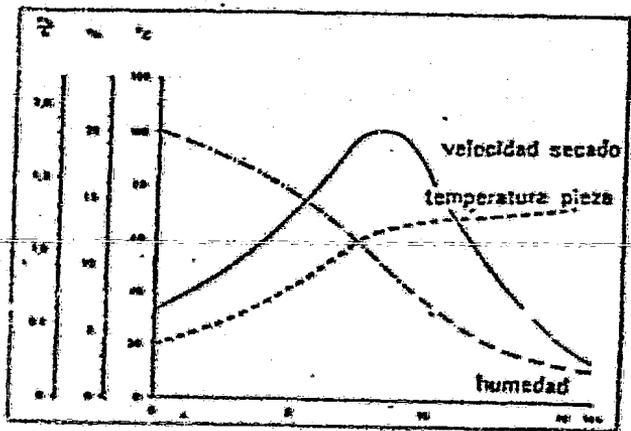


Figura 29 Comparación de los tiempos de secado, secado en tres etapas y con calentamiento simultaneo.

Figura 30 Curva de desecación óptima según los criterios de la técnica de los materiales.



pecto al material seco y a la velocidad de secado en tanto por ciento de la variación del contenido de agua por hora para condiciones fijas. Después de 7 horas disminuye la elevación de la velocidad permisible; permanece constante y disminuye a partir de las 9 horas. En las 7 primeras horas la superficie de la pieza está aún húmeda, teniendo lugar la evaporación de la superficie, después de las 7 horas se empiezan a secar los ángulos y cantos hasta que a la novena hora se alcanza el secado superficial. La evaporación pasa de la superficie al sistema capilar de la pieza. Mientras que en la superficie aún húmeda la pieza se contrae, el transporte de agua desde el interior comienza con el secado de la superficie, siendo el transporte más lento y disminuye la velocidad de secado.

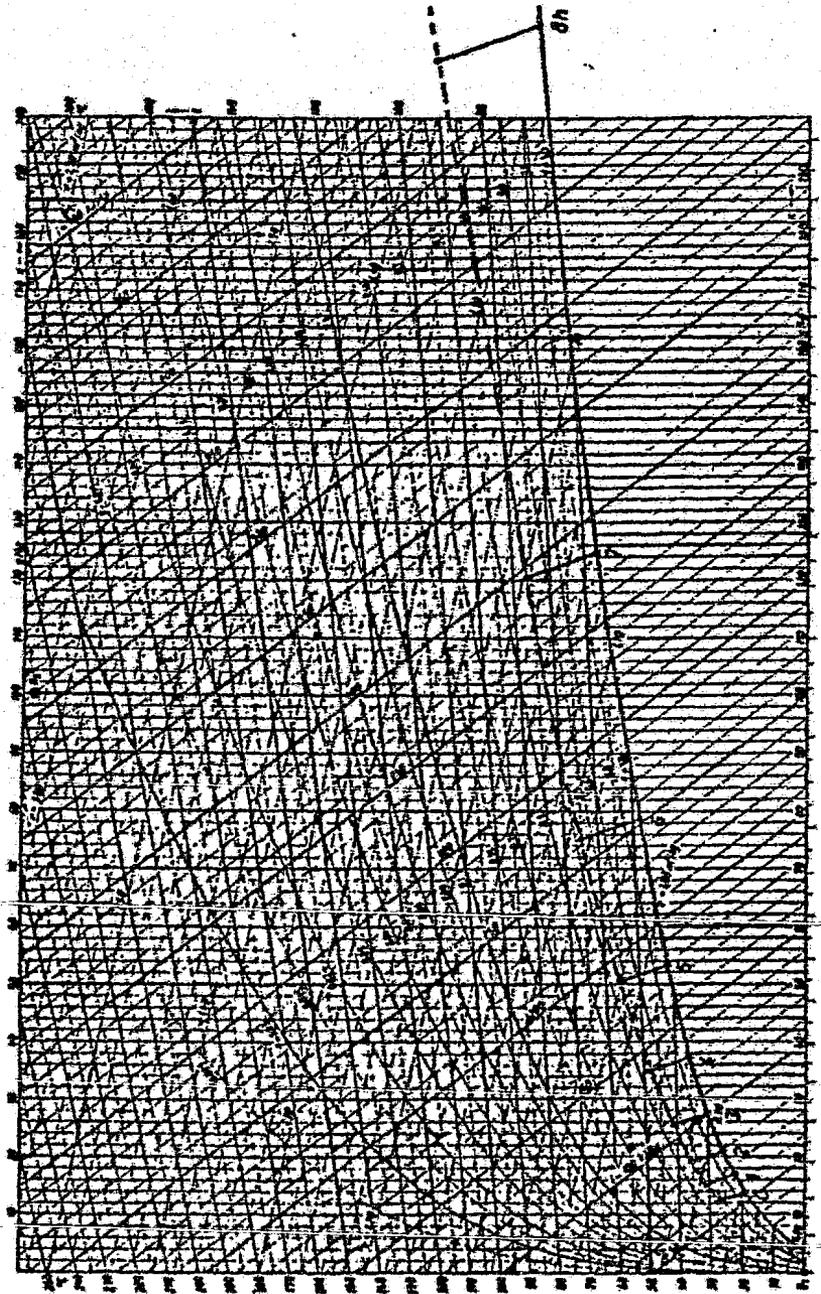
j.- Curva de secado óptima en la representación según los criterios de la técnica de los métodos operacionales.

Para correlacionar el curso de las variaciones de temperatura de la pieza con los datos del aire se utiliza el diagrama h-x. En éste se representan las relaciones entre la temperatura, el contenido de agua, la cantidad de calor y la humedad

relativa. Se marca la temperatura de la pieza sobre la línea del 100% de humedad relativa del aire en distintas constantes de tiempo y simultáneamente se marca el estado de aire de secado, uniendo estos puntos entre sí, resulta la representación de la figura 31 para la curva de secado óptima.

La línea de trazo continuo que se encuentra sobre el 100% de humedad relativa muestra el curso de la temperatura de la pieza. La línea discontinua superior da el curso de los estados de aire y las líneas entre ambos unen la temperatura de la pieza con el correspondiente estado del aire cada hora. En este diagrama son de notar dos cosas:

- 1.- Los distintos estados del aire evolucionan correspondientemente a las líneas de igual humedad relativa. Las variaciones de la aportación de aire con circulación sencilla a través del material, como se presenta en los secadores túnel transcurren casi como las líneas de igual contenido de calor (iséntropos) y perpendicularmente al curso, como resulta de la curva óptima de secado.
- 2.- Las distancias entre las líneas de unión del estado del aire y la temperatura de las piezas se



Curva de desecación óptima vista según la técnica de los métodos operacionales.

Figura 31

hacen mayores para tiempos crecientes. Esto se debe a que el ángulo entre las líneas de una misma temperatura del aire (isotermos) y la línea de humedad relativa del 100% se hace cada vez más agudo. Esto tiene como consecuencia que los mismos pozos para la elevación de la temperatura corresponden a avances cada vez mayores del contenido de agua del aire.

En la figura 32, están representados el estado del aire L, y el estado de la pieza F, para un tiempo determinado. Al igual que la figura 31, la línea de trazo continuo muestra el curso de la temperatura de la pieza en la línea  $F_1$  y la línea discontinua de trazo grueso el curso de los estados de aire. La distancia entre el punto F y L, es una medida de la velocidad de secado. La distancia perpendicular de  $b_1$  es una medida de la cantidad de calor que pasa del aire a la pieza. La línea de igual contenido de calor ( $h = \text{constante}$ ), también llamada iséntropa que pasa por el punto F, corta la distancia  $b_1$  en dos partes. Una variación en la dirección de esta iséntropa significa que el calor transmitido del aire a la pieza es únicamente el necesario para evaporar el agua, es decir, que el tramo  $b_1$  es la cantidad



de calor necesaria para la evaporación. El tramo  $b_2$  es una medida de la cantidad de calor necesaria para continuar el calentamiento de la pieza. La línea de unión entre el estado del aire L y el estado de la pieza F, tiene mayor pendiente que la línea de igual contenido de calor, lo que significa que junto al secado tiene lugar también un calentamiento de la pieza.

Desde la entrada hasta la salida del secador el aire partiendo de L, va variando a lo largo de la línea de unión en dirección de F.

La curva óptima de secado exige una variación del estado del aire que corresponde a la línea de trazo fuerte. Antes de que el aire circule de nuevo a través del material a secar debe calentarse. Por ejemplo, se debe pasar del estado  $L_2$  a  $L_3$ , existen diversas posibilidades:

- 1.- Aplicación de calentadores de aire. En general la mejor solución son instalaciones de aceite.
- 2.- Se pueden instalar quemadores de gas regulables en cada cámara de secado.
- 3.- Otra posibilidad constituyen la mezcla con aire caliente; debe pensarse sin embargo, que todos los estados de la mezcla entre dos cantidades de aire en diferente situación se encuentran en el diagrama  $h-x$  sobre las rectas de unión. Para

alcanzar estados del aire con contenidos de agua elevados debe trabajarse con pequeñas adiciones a muy alta temperatura (300-400°C), lo que representa muchas complicaciones.

k.- Influencia de la circulación en la curva óptima de secado.

Influencia de la disposición de las piezas sobre el secado; la velocidad de secado está influenciada por la velocidad de circulación del aire, de tal manera que al aumentar la velocidad de secado. Una gran sección representa una resistencia pequeña y viceversa. Como la pérdida de presión en toda la sección del secador es la misma, el aire circula con mayor velocidad en las secciones individuales grandes que en las pequeñas. En las instalaciones de secado en las que las piezas se encuentran sobre soportes, la distancia entre el canto superior es mayor que la distancia de las piezas. De ello se deduce que las piezas deberían secarse más rápidamente por la cara superior. La variación de la velocidad de secado puede observarse viendo la sección de un ladrillo macizo normal procedente de un secador de cámara con circulación horizontal. La distancia del ladrillo al soporte superior es de 140mm. y la separación entre

entre piezas de 30 mm.

Influencia de la longitud de circulación del aire sobre el secado, la velocidad de secado disminuye con la longitud del peso de aire a través de la carga del secado. Como recordatorio citaremos las principales diferencias entre los procesos de secado y cocción.

Se determinan las curvas óptimas de ambos procesos en ladrillo y se determinan curvas del proceso en función las cuales se pueden modificar éstas para reducir tiempos sin que el producto final sufra daños. Entre ambas curvas existen diferencias notables en dos sentidos:

1.- Mientras que en la cocción las piezas se disponen unas sobre otras en pilas, lo que condiciona la curva óptima en función del tipo de pila en el secado, la curva óptima puede emplearse para la pieza más rápidamente secada.

2.- En el secado la disposición de las piezas y las condiciones de circulación del aire determinan la velocidad de secado de tal manera que la curva óptima se establezca en las mismas condiciones de disposición de piezas y circulación de aire que el secador real. Por lo tanto, en la curva óptima de secado

no hay factores modificantes en el sentido L. Si en un secador se obtienen tiempos de secado más largos, esto es atribuible a que no todos los ladrillos tienen las mismas condiciones de secado como consecuencia de la estructura de secado. Dicho de otra manera, los ladrillos más rápidamente secados pueden permanecer en el secador hasta que los más lentos hayan perdido una cantidad de agua suficiente como para que pasen al proceso de cocción. La causa de la disminución de la velocidad de secado a lo largo del camino de circulación del aire es la cesión de calor a las piezas y la toma de agua de éstas. Es decir, pierde potencia de secado constantemente.

En la figura 55, tenemos representada la variación principal del estado de aire al pasar a lo largo de la carga del secador. Si  $L_1$  representa el estado al comienzo del paso por la carga y  $L_2$  a la salida, la velocidad de secado varía de  $a$  a  $a'$  con la condición de temperatura constante del ladrillo y la cantidad de calor transmitida total varía de  $b$  a  $b'$ .

Por lo tanto, cuanto más largo sea el recorrido del aire mayor será el descenso de la velocidad de secado. Como es sabido en secadores muy largos aparece

incluso condensación. Para esto las longitudes de circulación vertical de abajo hacia arriba tiene una longitud de circulación vertical de solo 3 metros (altura de la recámara) enorme ventaja frente a las cámaras con circulación horizontal.

#### 4.5 Cocción.

Lo más importante en la industria es el horno, ya que la parte más difícil dentro del proceso de refractarios es la cocción, que es donde existe más riesgo. Tanto en el secado como en la cocción, se necesitan realmente conocimientos técnicos sobre una serie de ramas industriales, mecánicas, físicas y químicas para poder hacer un buen control de los materiales procesados.

Existen nuevas concepciones de contribución y funcionamiento de hornos, tanto en lo que se refiere a la técnica como a los materiales y la economía en general. La economía de los últimos años se ha caracterizado por un aumento continuo de las producciones y de las productividades. Siempre más productos a precios más competitivos: Esto ha sido el criterio de los fabricantes y ha sido por ello que los hornos han ido evolucionando hacia modelos más y más grandes y en los que se han impuesto los ciclos continuos

os de cocción. La nueva economía se dirige al encuentro de nuevos horizontes; Las producciones variables, la influencia enorme del consumismo y de las leyes del mercado. El proyecto, fabricación y elección de un horno deberá de hacerse teniendo en cuenta estos factores. Una de las consecuencias, es el encarecimiento del costo de energía. Cualquiera que sea, para el horno la energía aumentará con toda seguridad aún más en el futuro. De ahí la necesidad de buscar la forma de economizar bajo todas las formas y de exigir a los fabricantes de hornos la inclusión de todos aquellos accesorios que permitan a los hornos recuperar el máximo de energía.

#### a.- Sistema de control.

Como en todas las aplicaciones industriales, las ciencias aplicadas en general y la electrónica en particular, aportan en el campo los controles, regulación y registro de todos los datos, las soluciones múltiples adaptadas a la precisión y a las velocidades deseadas.

En la actualidad es posible controlar y regular, además de las temperaturas, las presiones, las atmósferas, las fugas, las relaciones aire-combustible, los gradientes de temperatura y eventualmente todos

los datos físicos o químicos necesarios para el correcto funcionamiento de un horno.

Mediante el dominio de los procesos de control y regulación se detecta una revolución que reviste dos aspectos principales. El primero es la posibilidad totalmente nueva de poseer un conocimiento profundo y preciso de todo fenómeno que se produzca durante la cocción. El segundo radica en la posibilidad de generalización considerablemente rápida por el descenso de los precios del material propuesto.

b.- Transmisión de calor.

Uno de los problemas más difíciles en el diseño de un horno es el de una transmisión de calor eficaz, desde la fuente del mismo a los objetos o piezas. El problema es difícil en el horno, porque los objetos están en pequeñas unidades repartidas en un volumen considerable y, por lo tanto, la transmisión de calor por radiación. Tan importante en hogares como los utilizados por la industria metalúrgica pueden jugar un papel poco importante. Por la misma razón, la conducción de calor en una voluminosa carga de pequeñas unidades tiene poca importancia, por lo que debemos dejar a cargo del fenómeno de convección la mayor parte del calentamiento.

Si conocemos perfectamente la transmisión de calor que tiene lugar desde una corriente de gas que se mueve hasta una superficie sólida. La velocidad de transmisión depende principalmente de la diferencia de temperatura entre el gas y el sólido y de la velocidad a la cual el gas pasa a través del sólido. Las curvas de la figura 34 dan una idea de la velocidad de transmisión de calor bajo diferentes condiciones entre el gas y el sólido. La transmisión de calor desde un gas que se desplaza, por medio de la radiación desde el mismo gas, unido a las partículas incandescentes que contiene; es bastante importante en hornos de gran volumen y de gran espesor de llama, como la que se encontraría en los hornos para vidrio y en los hornos de reverbero; sin embargo, en el horno donde la corriente de gases está dividida en capas relativamente delgadas, esta radiación no puede jugar un papel muy importante, a pesar de que se han hecho intentos en la práctica para usar carbón que diera una llama alargada a fin de poder dar calor al fondo de la carga en un tiro invertido.

Uno de los diseños en un horno es producir una temperatura uniforme a través de todo el volumen de la

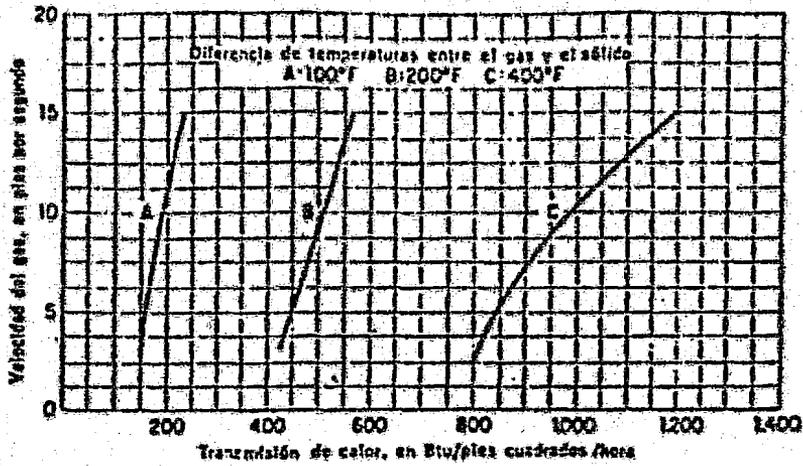


FIG. 34 Velocidad de transmisión de calor entre el gas y el sólido.

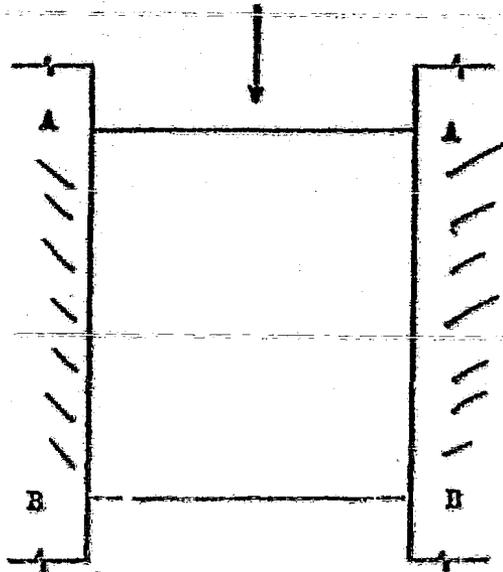


Figura 35 Efecto de la velocidad de flujo sobre la distribución de temperatura.

carga. En los hornos túnel, debido a su pequeña sección transversal, la uniformidad de la temperatura es mayor, aunque es susceptible variar de un lugar a otro el mismo carro en una cantidad apreciable. Considerando primero el caso de un horno de tiro invertido bajo condiciones de equilibrio, puede mostrarse fácilmente que las diferencias de temperatura entre abajo y arriba se relacionan con el flujo masivo de los gases. En la figura 35, la sección AA puede representar la parte superior de la carga y BB el fondo. Si  $M$  es igual al peso de los gases que circulan a través del canal por unidad de tiempo y  $S$  es la pérdida de calor entre AA y BB por transferencia lateral a través de las paredes por unidad de tiempo, entonces:

$$S = (t_1 - t_2) C_p M, \quad t_1 - t_2 = S / C_p M$$

donde,  $C_p$  es el calor específico del gas.

y  $t_1, t_2$  es la temperatura de AA y BB respectivamente.

Se puede concluir que se obtiene una temperatura más uniforme con un volumen grande de flujo, que puede lograrse por medio de la adición de aire en exceso al producto de la combustión. Esta ecuación muestra

también que el aislamiento de las paredes laterales del horno darán una distribución más uniforme de temperaturas laterales.

Otro medio para igualar temperaturas y uno de los métodos teóricamente más atractivos, es la recirculación de los gases de combustión a través de la carga. De ese modo se obtiene un gran flujo volumétrico, disminuyendo así la diferencia de temperatura, mientras que al mismo tiempo el volumen de los gases que dejan en el horno es relativamente pequeño. La única dificultad del método de circulación es el problema práctico de manejar los gases en alta temperatura. A temperaturas bajas, que son las que se encuentran en los hornos de tratamientos térmicos, los gases pueden recircularse con ventiladores hechos de una aleación metálica, enfriados por agua, que soportan temperaturas del orden de  $1100^{\circ}\text{C}$ , por encima de ésta, el único medio posible es la acción de un inyector, un método bastante afortunado para secado - res, pero que aún no se ha desarrollado para hornos.

#### c.- Hornos túnel.

El uso de los hornos túnel en la cocción de refractarios se está extendiendo rápidamente, y puede decirse que en realidad todas las modernas plantas de

refractarios que se construyen utilizan el horno túnel, ya que se ha mejorado el diseño y se ha ganado experiencia en la manipulación de los hornos, se acepta en general que este modelo, producirá mejores ladrillos a menor costo que el horno periódico. Esto no significa que el horno periódico no pueda ser utilizado, ya que todavía posee ventajas en la cocción de piezas grandes o complicadas, donde la marcha de la cocción debe ser diferente al utilizado para piezas estandar.

En principio, un horno túnel consiste de una cámara alargada, que se mantiene a una temperatura determinada, graduada convenientemente, de extremo a extremo. La carga se transporta en vagonetas, se mueve continuamente a través de la cámara y encuentra en todo momento a su paso las variaciones de calor. La economía del horno túnel estriba en que se recupera el calor de los gases de combustión para calentar la carga que entra y utilizando el calor de los ladrillos que se enfrían para precalentar el aire de la combustión o en algunos casos para secar los ladrillos.

Las ventajas del horno túnel son las siguientes:

1.- Se presta este tipo de hornos a procesos de pro

- ducción continua que minimiza el costo de manejo.
- 2.- La colocación y retirada de los objetos en el horno simple y regular, y con los ladrillos prensados en seco la cocción puede hacerse directamente desde la prensa.
  - 3.- La estructura del horno con excepción de los carros, a temperatura uniforme con un diseño adecuado, el costo de mantenimiento del refractario que reviste al horno es muy bajo.
  - 4.- Es posible con un diseño adecuado calentar y enfriar los objetos de acuerdo con un plan preestablecido, lo cual facilita una cocción adecuada del ladrillo en el tiempo más corto posible.
  - 5.- Debido a la sección transversal relativamente pequeña de la carga, el calor es capaz de penetrar rápidamente hasta el centro, permitiendo así una cocción mucho más rápida que en el caso de una carga voluminosa, tal como correspondería al horno periódico. Esta rapidez es una ventaja cuando debe cumplirse con las promesas especiales.
  - 6.- Si se hace funcionar adecuadamente el horno túnel, muestra una marcada economía de combustible en comparación con el horno periódico.

Hay una serie de desventajas en el horno túnel, que paulatinamente se van haciendo menos a medida que se tiene más experiencia con este método de cocción, esencialmente son:

- 1.- La construcción de un horno túnel necesita un desembolso de capital considerable y es imposible su capacidad gradualmente, tal como puede hacerse con una serie de hornos periódicos. Sin embargo, el costo por cada millar producido no es necesariamente superior al horno periódico.
- 2.- Un paro en el horno túnel es una avería grave, porque parará forzosamente la fábrica en su totalidad durante 3 o 4 semanas. Con un funcionamiento adecuado el paro es ocasional, pero no debe descartarse la posibilidad de que pueda ocurrir.
- 3.- La conservación de los carros es cara, debido al hecho de que periódicamente se enfrían y se calientan en cada paso a través del horno.
- 4.- Se han encontrado algunas dificultades en la obtención de una temperatura uniforme a través de la sección del horno túnel. La parte de arriba y los lados de la carga a menudo están más calientes que el fondo. Esto puede corregirse ya que

algunos hornos túnel en funcionamiento actualmente dan una distribución de temperatura muy uniforme.

- 5.- El horno túnel exige una gran extensión superficial para su instalación, y a veces algunas industrias están dispuestas de tal modo que no es posible hacerlo.
- 6.- Otra objeción al horno túnel es que para un funcionamiento más eficaz, debe trabajar con una carga uniforme, por ejemplo, con ladrillos rectos o modelos con 23 cm. de largo. Es evidente que puede variarse la marcha de acomodo a formas mayores, pero estos cambios producen un efecto perjudicial en la estructura del horno y se pierde tiempo en tener el horno funcionando uniformemente después que se ha hecho un cambio de esta naturaleza.
- 7.- Los hornos túnel no pueden funcionar eficazmente a baja capacidad y por ello adolece de la flexibilidad que tiene un horno periódico.

Los hornos túnel se hacen de dos tipos: uno de ellos por cocción directa y el otro es del tipo mufia. Puesto que un refractario de calidad media no es muy sensible a las impurezas de la atmósfera, el tipo de

mufla es más caro en inversión inicial y en gasto de combustible, se selecciona raras veces para refractarios; por lo tanto, aquí nos referimos exclusivamente a los de cocción directa. En la figura 36, se ve una sección plana de un horno túnel típico de esta clase. La carga entra en el túnel por un extremo y se calienta gradualmente alcanzando la temperatura máxima en la zona caliente. Posteriormente se enfría a medida que va saliendo de la zona en la que se encuentran los quemadores. El aire frío es forzado a penetrar por el extremo de salida del horno por un ventilador y pasa a través de la carga, enfriándola y recogiendo calor al mismo tiempo. El aire pasa entonces por la zona de combustión y luego pasa a través de la carga que va entrando. En la parte del horno pierde el calor en beneficio de la carga, luego es retirado por medio de un aspirador. El aire primario utilizado para la combustión en los quemadores se tira normalmente de la sección de enfriamiento por medio de un aspirador, pero es una cantidad pequeña en volumen comparado con el flujo del gas total.

En la actualidad se dispone de grandes ventiladores potentes que mueven los gases a temperaturas supe-

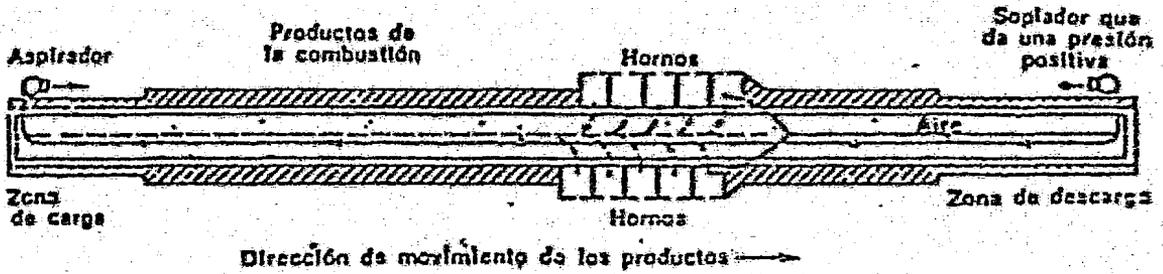


Figura 36 Vista de una sección plana de un horno túnel de calefacción directa

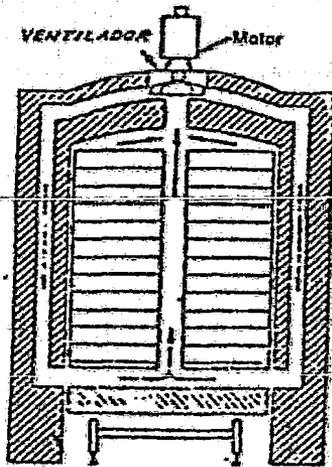


Figura 37 Recirculación de un horno túnel.

riores a  $1100^{\circ}\text{C}$ , con este equipo, o bien los gases pueden recircularse hacia la zona de precalentamiento a través de toda una sección transversal determinada para igualar temperaturas en toda la carga, tal como se indica en la figura 37, o bien puede sacarse de la zona de enfriamiento de los mismos (que corresponderá a la zona de precalentamiento del horno), y reinsertarse en una porción del horno que estuviera más caliente, tal como se muestra en la figura 38. Este último método aumenta la velocidad de flujo a través de la carga y por lo tanto, acelera la transferencia de calor desde los gases a la carga. A fin de regular la curva de calentamiento de los ladrillos, los gases no se retiran normalmente por un solo punto a la entrada del horno, sino por varios puntos a lo largo de la sección de precalentamiento, de tal modo que pueda obtenerse la curva de temperatura deseada.

Cuando más larga sea la zona de precalentamiento del horno, más fríos estarán los gases de salida y más alta la eficacia del horno. Sin embargo, por razones de tipo constructivo debe limitarse la longitud; consecuentemente la temperatura de salida de los gases oscilan entre  $100$  y  $400^{\circ}\text{C}$ , del mismo modo los ladri

llos que salen pueden enfriarse a la temperatura que que se desee, alargando suficientemente la zona de enfriamiento. Normalmente se aconseja enfriar la carga lo suficiente para que pueda ser manejada con facilidad, de este modo los ladrillos salen a temperaturas que oscilan entre 50 y 150°C.

La disposición de la carga debe ser espaciada de tal modo que se mantenga una velocidad de los gases relativamente alta a lo largo de toda la zona de precalentamiento y aún así se necesita una fuerza excesiva para hacer circular un volumen tan grande de gases que atraviesan la zona de precalentamiento variará de 150 a 600 m/min. y la presión de entrada necesaria para producir esta velocidad variará de 6 a 25 mm. de columna de agua.

Se utilizan muchos métodos de colocación de la carga para crear pasos longitudinales para los gases, ya que los lados de la carga tienen tendencia a calentarse antes que el centro; es una práctica común hacer un canal en la parte central y hacia abajo de la carga y reducir los intersticios de la parte superior y lateral al mínimo. La anchura de la carga normalmente cae en el margen de 1.2 a 2.1 m. y la altura oscila de 1.2 a 1.8 m. Se utilizan bóvedas

mas bien planas para evitar que el gas fluya encima de la carga.

Hay una gran tendencia a producirse fugas entre el fondo de la vagoneta y las paredes del horno, debido a que el espacio no puede hacerse más pequeño por causa del cambio de dimensión del techo y los carros. Este espacio se evita en la mayoría de los hornos fijando en cada carro una pala que corre por una cuneta llena de arena en cada lado del horno, tal como se ve en la figura 39. Este método parece ser satisfactorio y la arena puede suministrarse en el extremo de la entrada de la cuneta desde donde puede esparcirse gradualmente hacia el extremo de la salida donde puede sacarse y volverse a utilizar.

Los hogares para calentar los hornos túnel están dispuestos a lo largo de cada lado de la zona de cocción. El número de hogares varía normalmente entre 2 y 7 en cada lado y normalmente están alternados. En la mayoría de los casos los quemadores están colocados en cámaras pequeñas al lado de la zona de cocción y la llama se dirige a la carga.

A causa de la necesidad de que la distancia entre el quemador y la carga sea pequeña, hay peligro de sobrecalentamiento en la superficie de los ladrillos

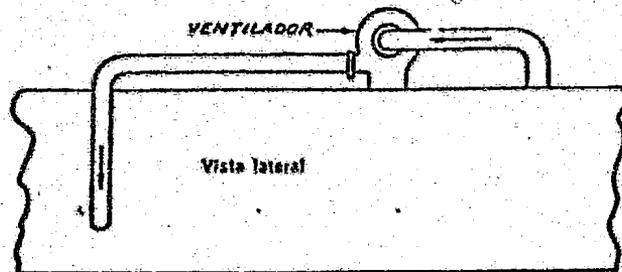
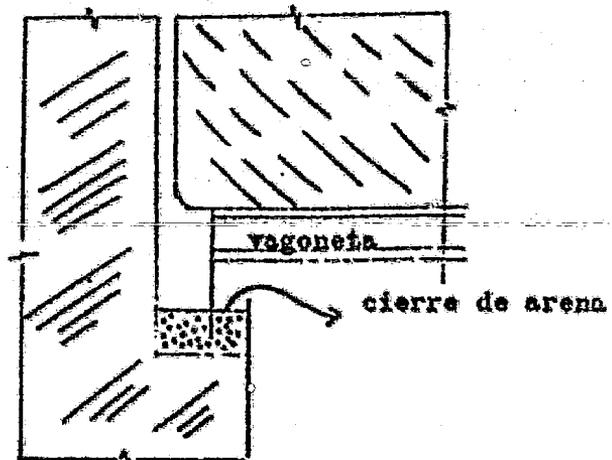


FIG. 38 Recirculación en un horno túnel.

Figura 39 Detalle de un sello de arena debajo de una vagoneta de un horno túnel.



cercanos al quemador. Por esta razón se colocan a veces un panel en forma de tablero de ajedrez.

Los hornos calentados con gas natural necesitan solamente una pequeña cámara de encendido, ya que la llama es relativamente corta. Igual que en el caso de los hornos periódicos el gas natural es un combustible ideal para estos casos y para el puede mantenerse un perfecto control de la temperatura y limpieza de la atmósfera interna.

Los carros de un horno túnel tienen una longitud que varía entre 1.5 y 2.1 m. y se construyen de acero las estructuras o de hierro colado. Generalmente los carros se montan sobre ruedas que corren sobre rieles. La parte superior de los carros del horno túnel es la que requiere mayor cuidado y mayor costo de mantenimiento debido al calentamiento y enfriamiento periódico. Esta parte superior se hace generalmente a base de bloques grandes que yacen sobre ladrillos refractarios aislantes. La arena que se ha depositado tiene tendencia a introducirse entre las juntas mientras el carro está frío; entonces, cuando las juntas intentan aproximarse debido a un nuevo calentamiento, los bloques están forzados a permanecer separados, de tal modo que en poco tiem-

po el carro crece hasta que no puede pasar por el horno. Esta circunstancia puede eliminarse soplando la arena fuera del horno, cuando los carros están ya fríos a fin de que el nuevo proceso entre el carro sin arena acumulada.

Los carros son empujados a través del horno por medio de un arrastre hidráulico que funciona con una bomba de émbolo pequeño y variable. Después que un carro ha entrado, el émbolo retrocede, un segundo carro se coloca en posición por medio de un transporte transversal y el proceso se repite. En el extremo de salida el carro se saca por medio de un transbordador del mismo tipo. Los hornos túnel se han diseñado con una serie de mecanismos para transferir la carga desde la cabeza del primer carro al siguiente, para evitar choques y sacudidas.

Casi todos los hornos túnel utilizan esclusas de ai re en ambos extremos, de tal modo que las condiciones de flujo dentro del horno no se alteren por la entrada o salida de los carros.

Los carros se mueven a la velocidad de 1.2 a 3.2 m/Hr. dependiendo de la longitud del horno y el tipo de quemado del producto, dando así un tiempo total de estancia en el horno de 50 a 100 horas.

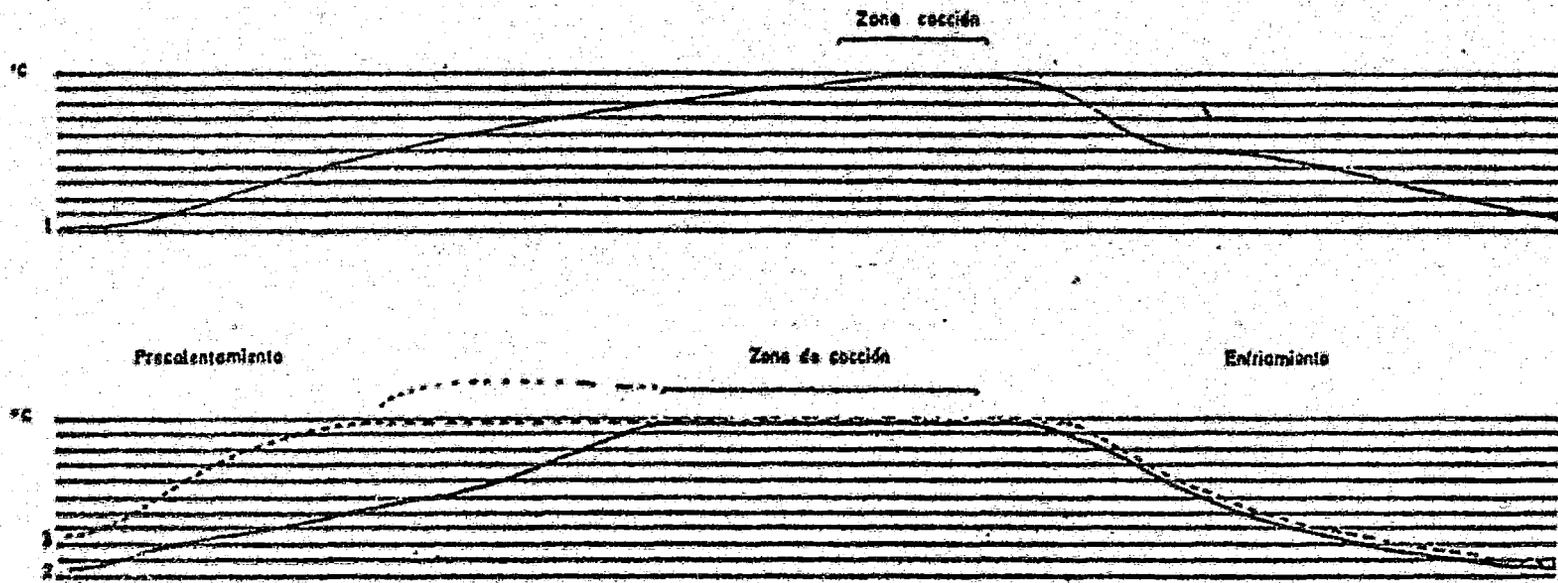


Figura 40 . - Curvas de temperatura en los hornos túnel.

TEMPERATURAS DE QUEMADO NORMALHORNO # 1

Horas:	<u>0:50</u>	<u>1:00</u>	<u>1:10</u>	<u>1:20</u>	<u>1:30</u>	<u>2:00</u>	<u>2:30</u>
	<sup>o</sup> F						
Zona 1 -	2270	2260	2250	2240	2210	2180	2150
Zona 2 -	2410	2400	2390	2380	2370	2340	2310
<u>Quemadores:</u>	<sup>o</sup> C						
9-10	1100	1180	1170	1160	1150	1120	1090
11-12	1210	1200	1190	1180	1170	1140	1110
13-14	1230	1220	1210	1200	1190	1160	1130
15-16	1250	1240	1230	1220	1210	1180	1150
.....							
17-18	1270	1260	1250	1240	1230	1200	1170
19-20	1290	1280	1270	1260	1250	1220	1190
1-2-A	1300	1290	1280	1270	1260	1230	1200
21-22	1310	1300	1290	1280	1270	1240	1210
23-24	1330	1320	1310	1300	1290	1260	1230
25-26	1350	1340	1330	1320	1310	1280	1260
3-4-A	1350	1340	1330	1320	1310	1280	1250
27-28	1370	1360	1350	1340	1330	1300	1270
.....							
29-30	1280	1370	1360	1350	1340	1310	1280
5-6-A	1370	1360	1350	1340	1330	1320	1290
31-32	1390	1380	1370	1360	1350	1340	1310
33-34	1410	1400	1390	1380	1370	1350	1320
35-36	1380	1380	1370	1360	1360	1340	1320
7-8-A	1360	1350	1350	1340	1340	1330	1310
37-38	1340	1340	1340	1330	1330	1320	1300

ZONA 1

ZONA 2

## V CONTROL

El comportamiento de los refractarios depende de las fuerzas destructivas o condiciones de operación presentes en el equipo y podemos resumir estas en las formas sig.:

- 1.- Esfuerzos
- 2.- fusión
- 3.- Ataque de escoria
- 4.- Disgregación
- 5.- Desintegración
- 6.- Abrasión

Todas estas propiedades se encuentran relacionadas con la temperatura y son determinadas y reportadas algunas de ellas en frío, naturalmente que las características del ambiente o condiciones de operación que se han enumerado con anterioridad están también relacionadas con las propiedades de los materiales refractarios en caliente, por lo tanto, deben discutirse las propiedades de los refractarios, como determinarse y que significa cada una de ellas.

### 5.1 Propiedades físicas en frío.

Peso específico, densidad, porosidad, permeabilidad y absorción de agua.

Todas estas propiedades de los refractarios están relacionadas entre sí, todas tienen que ver con la

porosidad y estructura del ladrillo, todas son una indicación de su habilidad para resistir penetración de escorias líquidas, vapores de hornos y gases. Como se sabe los ladrillos son perfectamente sólidos pero contienen, sin embargo, un sinúmero de espacios porosos, nosotros describiremos éstos como poros cerrados y poros abiertos; los poros abiertos son aquellos en los cuales puede penetrar el agua y la prueba práctica se determina colocando un ladrillo en agua hirviendo por 24 Hr., siendo los poros cerrados aquellos que son impermeables al agua.

Cualquier persona está familiarizada con el término densidad como peso de un material expresado en peso unitario por volumen, o sea que la densidad se expresa en  $g/cc.$ ,  $lb/ft^3$  o en otras unidades.

La gravedad específica o peso específico es la relación de peso del material con un volumen igual de agua; el agua pesa  $1.0 g/cc.$ , por lo tanto, si un material pesa dos veces más que el agua, decimos que tiene un peso específico de dos. Ahora bien, cuando expresamos densidad en  $g/cc$  tomamos los mismos valores numéricos que en el caso de la gravedad específica o peso específico calculado, siendo éstas más frecuentemente usadas porque están basadas en el pe

so y volumen total del ladrillo terminado.

El peso volumétrico calculado se obtiene fácilmente el peso del ladrillo se divide entre su volumen real.

El peso volumétrico calculado dá una buena idea de la densidad de un ladrillo; la densidad de los bloques empleados en el fondo de los altos hornos deben ser cuidadosamente controlados, cada ladrillo cada ladrillo es pesado individualmente despues de haber sido prensado para asegurarse que su peso es superior al mínimo establecido y automáticamente es eliminado el ladrillo cuyo peso sea menor al mínimo.

La porosidad es una medida del volumen total de los poros abiertos y cerrados que contiene el ladrillo y se expresa como una relación en la forma siguiente: el volumen total de los poros, dividido entre el volumen del ladrillo obteniéndose la porosidad real; el volumen de los poros abiertos entre el volumen del ladrillo es igual a la porosidad aparente.

5.2 La resistencia de los ladrillos se determina en dos pruebas diferentes:

a.- Resistencia a la compresión.

La compresión en plano de los ladrillos refractarios es determinada colocando un ladrillo sobre una cara de 11.43 x 6,35 cm., y aplicando

sobre esta una carga, la resistencia se reporta en  $\text{Kg/cm}^2$  determinada por la carga total requerida para provocar el rompimiento del material dividido entre el área del ladrillo .

b.- Módulo de ruptura.

Se determina colocando el ladrillo acostado sobre dos soportes con una separación de 17.8cm y aplicando la carga al centro de la pieza; al aplicar la carga el ladrillo tiende a doblarse por la parte media, en virtud de que la pieza se encuentra sujeta a compresión en la parte superior y a tensión en la parte inferior. Los ladrillos refractarios al igual que la mayoría de los productos cerámicos son más débiles a la tensión.

Los ladrillos refractarios de arcilla presentan variaciones en su módulo de ruptura desde valores relativamente bajos del orden de  $35 \text{ Kg/cm}^2$  a valores de  $176 \text{ Kg/cm}^2$ ; aún cuando no exista una correlación real entre el módulo de ruptura y la compresión en plano, ésta última generalmente es de 2 a 4 veces el valor del módulo de ruptura.

La resistencia de los ladrillos determinada por estas pruebas dan una buena indicación de la resisten

cia del material al abuso general que se le dá durante su manejo transportación e instalación, dando también una cierta indicación de resistencia a la abrasión si no se dispone de mayor información, y por otro lado no nos dá ninguna indicación de resistencia a temperaturas mayores.

### 5.3 Abrasión.

Los materiales refractarios en servicio pueden quedar sujetos a varios tipos de abrasión, la cual podemos dividir en tres tipos generales como son:

a.- Abrasión por frotamiento, incluye la acción de objetos pesados que rosan sobre su superficie del ladrillo raspándolo o erosionándolo, y lo encontramos a menudo a bajas temperaturas en donde el ladrillo no se encuentra lo suficientemente caliente como para presentarse en un estado pirolástico. en estas condiciones cuando un material se calienta a elevada temperatura pierde parte de su resistencia ablandándose, siendo más fácil atacarlo en este estado.

Para determinar la resistencia del ladrillo al frotamiento o la acción abrasiva, se cuenta con un aparato que consiste esencialmente de bolas de acero con diámetros diferentes dentro de un

tambor metálico con un peso aproximado de 140Kg para provocar la abrasión mecánica a las piezas de prueba y calculando la pérdida en % en periodos de tiempo de 20 y 50 minutos.

b.- Abrasión por impacto; es producida generalmente por pequeñas partículas que golpean la superficie de un ladrillo, Una prueba de laboratorio consiste en lanzar arena sílica con un tamaño de 20 mallas sobre el ejemplar de prueba con una presión de  $3.5 \text{ Kg/cm}^2$ , la arena se lanza verticalmente hacia abajo sobre un ladrillo que se encuentra colocado con un ángulo de 35 grados en relación con la horizontal, haciendo la prueba en esta forma las partículas lanzadas nunca chocarán perpendicularmente. La cantidad de material perdido se obtiene pesando el ejemplar antes y después de la prueba, reportando la pérdida de peso en %.

c.- Abrasión por impacto de objetos pesados; ésta sucede generalmente en el lugar de trabajo la cual determina en parte la vida del refractario.

#### 5.4 Propiedades químicas.

El objeto principal del análisis químico es controlar la calidad uniforme de las materias primas y

hasta cierto punto al producto terminado, determinando así la calidad para su clasificación de los refractarios y en general para conocer su punto de reblandecimiento y su comportamiento en altas temperaturas. El análisis químico es útil para determinar los principales ingredientes del producto; tales como la alúmina, sílice, etc., El análisis químico es de poco valor cuando queremos ponderar la resistencia en frío en los ladrillos refractarios o la disgregación térmica.

La composición química es mucho más importante en ladrillos básicos que en sílico-aluminosos, como en el caso de los ladrillos de cromo-magnesita. La composición mineralógica es de suma importancia en un ladrillo básico, en el cual la magnesita no se hubiese transformado en periclasa totalmente podría considerarse como un ladrillo que no es totalmente bueno. Ya que la determinación de la composición mineralógica de los componentes refractarios es muy difícil de efectuarse prácticamente, no es utilizado este sistema para determinar el comportamiento del ladrillo en servicio, la forma más fácil es sometiendo a pruebas físicas.

Los ladrillos de arcilla no tienen un verdadero punto de fusión, pero si se reblandecen gradualmente dentro de un amplio límite de temperatura a diferencia con los compuestos químicos puros que si tienen un punto de fusión determinado, este límite depende principalmente de los puntos de fusión de los eutecticos (composiciones químicas de bajo punto de fusión que se forma por las combinaciones de diferentes minerales dentro del ladrillo debido no solo a las temperaturas), sino tambien a las cantidades de vidrio que se encuentra en forma viscosa dentro del ladrillo.

Un ladrillo fabricado a base de arcilla por el proceso de prensa seca despues de que se ha quemado en el horno túnel contiene una cantidad de vidrio rígido apreciable, éste vidrio es el componente cerámico que proporciona al ladrillo su resistencia en frio, cuando el ladrillo se calienta el vidrio conserva su rigidez hasta una temperatura aproximada de  $1100^{\circ}\text{C}$  y se mantiene tan resistente como a la temperatura ambiente, sin embargo, a medida que la temperatura se eleva esta liga cerámica comienza a perder rigidez y se convierte en un líquido viscoso, variando esta viscosidad en un amplio límite de tem

peratura. Se presenta deformación solamente como resultado de presiones; ;bajo presión este líquido es muy viscoso, se deformará lentamente sirviendo como lubricante para las partículas que se encuentran dentro del ladrillo y se deformara éste gradualmente dependiendo de la carga, la temperatura y el tiempo que se expone. A medida que la temperatura aumenta, al llevar consigo partículas sólidas y disolverlas disminuyendo su viscosidad, es decir, se convierte en un líquido más fluido hasta que el ladrillo se deformará bajo su propio peso, finalmente todo el material cristalino se disolverá fundiéndose el ladrillo cuando se ha alcanzado una temperatura suficientemente alta.

#### 5.5 Comportamiento de los ladrillos bajo carga en altas temperaturas.

La propiedad que tienen los ladrillos refractarios para soportar cargas en altas temperaturas no es de mayor importancia en la mayoría de las construcciones donde el revestimiento refractario está expuesto al calor en una sola cara, en la mayoría de los casos hay un gradiente de temperatura a través del revestimiento permitiendo una temperatura suficientemente baja para soportar cualquier reblandecimiento o

deformación que pudiera suceder, sin embargo, en cierto tipo de construcciones las propiedades de deformación bajo carga pueden ser el principal factor en la selección del refractario adecuado especialmente en aquellos casos en que el refractario se encuentra expuesto en altas temperaturas en más de una cara, cuando el revestimiento se encuentra fuertemente aislado disminuyendo la caída de temperatura a través del muro hasta el punto en que una buena parte de la pared se encuentra arriba del punto de deformación bajo carga en condiciones normales. La prueba de deformación bajo carga en los ladrillos se efectúa sometiendo al ladrillo de muestra a una carga de  $1.76 \text{ Kg/cm}^2$  durante un lapso de tiempo de 90 minutos a una temperatura de  $1350^\circ\text{C}$  para ladrillos de alta calidad y  $1450^\circ\text{C}$  para ladrillos de calidad superior. Las hiladas inferiores de un muro de ladrillo refractario de 7.5 m. de altura estarían sometidas a una carga equivalente a la utilizada en la prueba de deformación bajo carga en caliente siendo esta prueba muy útil para comparar la resistencia a la carga de distintos tipos de ladrillos. Esta prueba aún cuando no nos dá un indicio muy claro del comportamiento de los refractarios bajo car-

ga en altas temperaturas si nos proporciona una lectura de la cantidad de deformación que este material sufre al cabo de un tiempo determinado, sin indicar la temperatura a la cual el ladrillo empieza a deformarse por la velocidad en la que esta deformación se efectúa de una manera progresiva, siendo esta una relación de tiempo y temperatura. Con todas las posibles variaciones en carga a relación de calentamiento, temperatura, tiempo, atmósfera y presión del horno, es muy difícil determinar un método de prueba que dé la información suficiente y clara como para poder predecir con toda exactitud el comportamiento de una cierta marca de ladrillo bajo los distintos tipos de condiciones que pueda encontrarse en un horno, ya que además de las variaciones mencionadas otras fuerzas destructivas como la escoriación, disgregación térmica o abrasión pueden acelerar rápidamente la falla bajo carga en servicio de un ladrillo.

#### 5.6 Tensiones y cambios en dimensiones debido al calentamiento.

Cuando los ladrillos refractarios se calientan expanden y cuando se enfrían contraen causando ciertas tensiones dentro del propio refractario, cuando el

calentamiento y enfriamiento es rápido o brusco, estas tensiones son muy altas debido a que el refractario en si no tiene la oportunidad de efectuar ningún cambio en sus dimensiones.

Existe una fuerte caída de temperatura desde la cara caliente de la pared hasta la cara fría, generalmente la cara caliente tiende a expandir más que la cara fría; esta diferencia de expansión térmica causa tensiones internas dentro del revestimiento. En todos los revestimientos refractarios nos encontramos con este tipo de tensiones o presiones, las bóvedas por ejemplo, son particularmente vulnerables, debido a las tensiones producidas por las expansiones y contracciones. Al expandir el ladrillo de una bóveda, estas expansiones tienen que ir a algún lugar y generalmente se elevan en lugar de empujar los soportes de acero de las salmeras, produciendo en algunas ocasiones deformaciones o disgregaciones.

Cuando el ladrillo refractario se expande debido al calentamiento, volverá a sus dimensiones originales cuando se enfría, siempre que no haya tenido cambios permanentes dentro de la naturaleza del ladrillo debido al calentamiento, este efecto se llama expan

ción térmica reversible y a menudo se le llama solamente expansión térmica.

#### 5.7 Cambios permanentes en el ladrillo refractario.

Un ladrillo refractario puede ser calentado a temperaturas tan altas que alteren su estructura de manera que al enfriarse no vuelven a sus dimensiones originales, estos cambios se presentan a elevadas temperaturas, es decir a temperaturas mayores de aquellas a las que fueron quemadas originalmente y pueden considerarse ser el resultado de una vitrificación como los cambios mineralógicos pueden ser acelerados en buena forma por escorias, humos o polvos que reaccionan con el ladrillo en servicio etc., y la prueba para determinar la capacidad del ladrillo que resiste cambios permanentes en volumen se llama prueba de cambio lineal permanente.

La prueba se efectúa midiendo un rectangular con toda precisión, después es colocado en un horno y se calienta a una temperatura de prueba, para la calidad superior se hace a  $1600^{\circ}\text{C}$ , esta temperatura se mantiene durante 5 Hr. y después el ladrillo se deja enfriar lentamente dentro del mismo horno se vuelve a medir el ladrillo para calcular la variación de volumen en %. El cambio permanente de volumen puede ser debido en primer lugar a la formación

de nuevos minerales tales como la mulita, que tiende a expandir, en segundo lugar a una expansión secundaria en el recalentamiento y tercero a un sobrecalentamiento como en el caso del ladrillo de expansión para ollas.

### 5.8 Disgregación térmica.

La disgregación térmica de un ladrillo se define como la pérdida de fragmentos, astillas o desconchamiento de la cara de un refractario a través de ciertas grietas y la ruptura con la consecuente exposición de las partes interiores, pudiendo considerarse tres tipos diferentes de disgregación:

- 1.- Disgregación mecánica, lo suficientemente fuerte como para romper el ladrillo y su efecto puede ser el desconchamiento como algunas ocasiones se presenta en las bóvedas, una segunda causa puede ser el calentamiento demasiado rápido de ladrillo húmedo, una tercera causa de disgregación mecánica puede ser producida al no proporcionar el suficiente espacio para que el ladrillo expanda en una construcción sin juntas de expansión adecuadas.
- 2.- Disgregación estructural, es el producto de los cambios de la estructura del ladrillo y puede

ser debido a:

a.- Altas temperaturas

b.- Absorción de escorias o fundentes.

Este tipo de disgregaciones se presentan en aquellos revestimientos que han sufrido una alteración en su estructura mineralógica debido a una alteración química provocada por impurezas o escorias que han penetrado al revestimiento refractario, así como por una vitrificación por alta temperatura.

3.- Disgregación térmica, generalmente se asocia con cambios rápidos de temperatura.

Los refractarios que poseen una gran resistencia a la disgregación térmica presentan:

a.- Bajo coeficiente de expansión térmica.

b.- Coeficiente de expansión térmica uniforme

c.- Textura flexible que alivie de la tensión interna.

Un ladrillo denso y quemado a altas temperaturas es más sensible a los cambios bruscos de temperatura que un ladrillo con una construcción un poco abierta. El ladrillo de sílice es particularmente sensible a los cambios de temperatura debido a que sufre cambios estructurales y volu

métricos alrededor de  $650^{\circ}\text{C}$ , arriba de esta temperatura debido a ya casi no sufre ninguna expansión térmica.

### 5.9 Punto de fusión.

El significado físico de punto de fusión, ha tenido mucha confusión al considerar exactamente que es lo que significa al hablar de punto medio de un refractario. No podemos hacer otra cosa que referirnos al método utilizado por el técnico en vidrios para determinar los puntos de fusión o reblandecimiento del vidrio. En este caso, el punto de fusión se especifica como la temperatura a la cual una muestra particular bajo una tensión definida se vuelve lo suficientemente fluida como para fluir a una velocidad determinada.

Un método común para determinar el punto de fusión es comparar las características de pandeo de la muestra con una serie de conos pirométricos estandar que están todos en el mismo horno. Esta prueba es útil para poder conocer el punto de fusión de un material, en el caso de una calidad de ladrillos refractarios poderlos clasificar, controlar su calidad y conocer la temperatura máxima a la cual se puede trabajar.

La desventaja del método es no obtener un grado de precisión extraordinariamente fina, debido a causas aleatorias como las variaciones en la atmósfera del horno o por otras causas que además no son fáciles de controlar. Sin embargo, bajo buenas condiciones puede obtenerse una precisión de  $\pm 15^{\circ}\text{C}$ .

#### 5.10 Transmisión de calor en refractarios.

En ciertas partes del horno, tales como las paredes o el techo, es necesario que exista una transmisión de calor mínima hacia el exterior, por lo que se necesita un refractario que tenga conductividad térmica muy baja. Por otra parte, aparatos como muflas o crisoles de precocción requieren refractarios con un valor de la conductividad alto. De todo ello se desprende que el diseñador debe disponer de datos sobre la conductividad térmica de los refractarios que ayudan a la selección adecuada de los materiales para el horno.

Debido a que los refractarios son más o menos porosos, es interesante saber como esta porosidad influye en la velocidad de transmisión.

Parte del calor se transmite a través del sólido en virtud del íntimo contacto que existe entre partículas que constituyen su estructura. Esta conducción

disminuirá a medida que la porosidad aumenta.

En estructuras altamente porosas, la conducción de calor por parte del gas que se encuentra en los poros puede ser una proporción apreciable del total de la conducción.

Si los poros se llenan con aire o gas de combustión como ocurre en los casos normales, se transmite cierta cantidad de calor por medio de corriente de convección dentro de los mismos poros. Este transporte es tan pequeño que para tamaños normales de poros puede despreciarse.

Gran cantidad de flujo calorífico en alta temperatura puede ser debido a radiación directa a través de los poros. Para una porosidad determinada, los poros grandes transportan mayor cantidad de calor por radiación.

## VI CONCLUSIONES

En la industria de los productos refractarios es de gran importancia conocer las propiedades químicas y físicas de las materias primas, el comportamiento de las piezas moldeadas y las propiedades finales del producto. Para este fin es necesario establecer un control de calidad en cada una de las diferentes etapas del proceso, las diferentes etapas del proceso son;

1.- Materia prima, esta primera etapa es decisiva ya que el conocimiento de su composición mineralógica permite hacer una clasificación de materia prima y utilizarla según sea conveniente, auxiliados para su determinación con estudios petrográficos, microscopio electrónico, rayos "X" y análisis térmico diferencial.

La determinación de las propiedades físicas de la materia prima es necesaria su obtención para tener una referencia del comportamiento que se puede esperar cuando forma parte de un ladrillo. Al igual que a los ladrillos se hace una prueba en el laboratorio para conocer su densidad, porosidad, módulo, pérdidas por calcinación, etc. Datos importantes para poder formular una mezcla.

2.- Clasificación de partícula, es de gran importan -

cia obtener una distribución homogénea debido a que forma la base para la construcción de un buen refractario, evitando problemas de falta de prensado, aspecto poroso y propiedades internas del ladrillo que se afectan.

- 3.- Prensado, esta etapa es de control muy importante ya que cada pieza debe salir con dimensiones lo más exactas posibles, el peso de la pieza y la densidad de prensado son datos establecidos que deben seguirse. Una mezcla con excelente granulometría y humedad adecuada bien mezclada seguramente que obtendremos piezas moldeables por prensado homogéneas.
- 4.- Secado, aquí la eliminación de humedad debe hacerse ~~bajo un control riguroso de tiempo y temperatura~~ principalmente para evitar agrietamientos, asegurando un terminado final de quemado bueno.
- 5.- Cocción, en esta etapa la formación de vidrio y transformaciones cristalográficas se llevan a cabo ~~Con un control riguroso de tiempo y temperatura~~ obtenemos propiedades semejantes de las piezas refractarias, cada calidad tiene su curva de quemado.
- 6.- Selección, el material antes de enviarse al cliente es checado por el laboratorio para garantizar

desde su instalación hasta su desarrollo con resultados satisfactorios.

La información recavada para este trabajo, ha sido con el objeto de que al lector lo conduzca a una mejor comprensión de que son los materiales refractarios, las formas actuales de fabricación y control de los mismos.

## BIBLIOGRAFIA

Norton F. H.

## REFRACTORIES

3a. Edición 1949

Mc Graw-Hill Book Company Inc,  
New York.

J. H.

## STEELPLANT REFRACTORIES

## SHEFFIELD

The United Steel companies LTD  
1946.

W. F. Ford

## 4. THE EFFECT OF HEAT ON CERAMICS

Institute of ceramics Textbook series

Maclaren and sons LTD.,

London, England, 1967.

## TECNICA CERAMICA

No. 36 Septiembre-75, No. 50 Febrero-77

Trav. de las Corts, 354, Entl.<sup>o</sup>, 5a.

Barcelona (15).

W. D. Klungery

H. K. Bowen

D. R. WHLAmann

INTRODUCTION TO CERAMICS

2a. Edition

A Wiley-Interscience Publications

New York

CERAMIC DATA BOOK

1979 Supplier' Catalog and Buyers' Directory

58 th Edition

Published by Caihners Publishing Company,

Division of Reed Holding, Inc. 5South

Wabash Avenue, Chicago, Illinois 60603, U.S.A.

Alumina AS. A CERAMIC MATERIAL

The american Ceramic Society, Inc.

Special Publication No. 4

1970

1977 ANNUAL

Book of ASTM STANDARS

Part 17

Refractories, Glass, and Other Ceramic  
Materials; Manufactured Carbon y Graphite  
Products.

CERAMICS INDUSTIRAL PROCESSING AND TESTING

J. T. Jones and M. F. Berard

the Iowa State University press ames Iowa.