

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA Y MANUFACTURERA**



**“REFRACTARIOS DE ALUMINATOS DE CALCIO”**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACION DE  
CONOCIMIENTOS**

**PRESENTADO POR:**

**GLENDON IVAN MORILLO ZAVALA**

**LIMA – PERU**

**2002**

## RESUMEN

Los refractarios son generalmente conocidos como aquellos materiales no metálicos apropiados para la fabricación de los revestimientos de los hornos y equipos que operan a altas temperaturas. Su rol en la industria ha ido incrementando y evolucionando para satisfacer diversos y severos requerimientos térmicos, físicos y químicos.

Los refractarios son indispensables en muchos procesos y su necesidad es obvia en los procesos de fundición de minerales, refinación de metales, generación de vapor y en muchas etapas de la industria del vidrio, del cemento, de cerámica, de petróleo, de plásticos, de papel, de textiles, etc.

Con el avance de la tecnología han aparecido nuevos y mejores productos refractarios, y el presente trabajo tiene por objeto el proveer una sólida visión técnica de los refractarios a base de aluminatos de calcio.

Se da particular énfasis al tema del cemento aluminoso o cemento de aluminatos de calcio, el cual es el componente principal del concreto refractario, dando a conocer su método de fabricación, reacciones, diseños de mezcla, propiedades especiales y los diversos métodos de aplicación.

## INDICE

	Pag.
INTRODUCCION .....	05
I. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	06
II. CLASIFICACION DE LOS CONCRETOS REFRACTARIOS	09
2.1 Concretos convencionales .....	09
2.2 Concretos de bajo contenido de cemento .....	09
2.3 Concretos de ultra bajo contenido de cemento .....	10
III. COMPONENTES DE LOS CONCRETOS REFRACTARIOS	12
3.1 Agregados .....	12
3.2 Cemento de aluminatos de calcio .....	13
3.3 Agua .....	14
3.4 Aditivos .....	15
IV. CEMENTO DE ALUMINATOS DE CALCIO	16
4.1 Procesos de fabricación .....	16
4.2 Control de calidad y métodos de ensayo .....	20
4.3 Mineralogía .....	26
4.4 Hidratación .....	28
V. DISEÑOS DE MEZCLA	31
VI. PROPIEDADES	36
6.1 Resistencia a los choques térmicos .....	37
6.2 Resistencia a los ataques químicos .....	40
6.3 Resistencia a los esfuerzos mecánicos .....	41
VII. APLICACIONES	44
7.1 Preparativos antes de la aplicación .....	44
7.2 Métodos de aplicación .....	51
7.3 Referencias de aplicación .....	55

VIII.	CURADO, SECADO Y SINTERIZACION	61
	8.1 Curado .....	61
	8.2 Secado .....	62
	8.3 Sinterización .....	63
IX.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
X.	BIBLIOGRAFIA	66

## INTRODUCCION

De forma general, un concreto refractario es un material cerámico obtenido por la mezcla de agregados refractarios, de granulometría determinada, y cemento refractario a base de aluminatos de calcio. Estos últimos han sido el factor principal del mejoramiento en las formulaciones y técnicas de aplicación para que los concretos refractarios incrementen su demanda, sobre todo en aplicaciones donde se requiera:

reducción en el tiempo de parada de las operaciones,  
facilidad y rapidez en reparaciones localizadas,  
características similares o superiores de los refractarios preformados,  
facilidad de abastecimiento y/o almacenamiento.

El desarrollo de los cementos de aluminatos de calcio se inicia con las investigaciones de Vicat (1847) proponiendo un cemento, rico en alúmina, de mayor durabilidad a los ataques por sulfatos. Mucho después, J. Bied (1908) formuló un cemento que no liberaba hidróxido de calcio durante su hidratación y cuya obtención era por la fusión de una mezcla de bauxita y caliza, patentando su invento como cemento Fondu (cemento fundido). Hoy en día la producción de este cemento es a gran escala con tecnología de punta.

Los concretos refractarios a base de aluminatos de calcio se caracterizan por su estructura altamente uniforme y su baja porosidad. Su estructura densa imparte altas resistencias en amplios rangos de temperatura, excelentes propiedades termo-mecánicas y resistencias químicas.

Con el transcurrir de los años, la demanda del contenido de alúmina se esta incrementando, lo que ha conllevado al desarrollo de los llamados concretos de bajo y ultra bajo cemento. Estos concretos contienen pequeñas cantidades de cemento, típicamente menos del 8%, y en el caso de los ultra bajo cemento, menos del 3%. Tales desarrollos ponen de manifiesto las altas técnicas sobre el comportamiento del cemento.

En el propósito de seguir los avances tecnológicos, el presente trabajo brinda, sobretodo, conceptos que pueden ser de ayuda al realizar construcciones monolíticas refractarias.

## I. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

### 1.1 Refractarios.

Refractario es cualquier material térreo no metálico destinado a resistir elevadas temperaturas.

La selección de un refractario depende de la aplicación a la cual será sometido, por tanto deben considerarse los factores químicos, físicos y de operación, es decir tener en cuenta la temperatura máxima que se alcanzará en el proceso, la naturaleza de los elementos circundantes, el cálculo de las pérdidas de calor al emplear determinado revestimiento refractario, los esfuerzos mecánicos a los cuales serán sometidos, el costo de los materiales, los costos de puesta en obra, la elección del procedimiento de puesta en obra, etc.

### 1.2 Clasificación de los refractarios.

Hay muchas maneras de clasificar los refractarios, algunas de las cuales son:

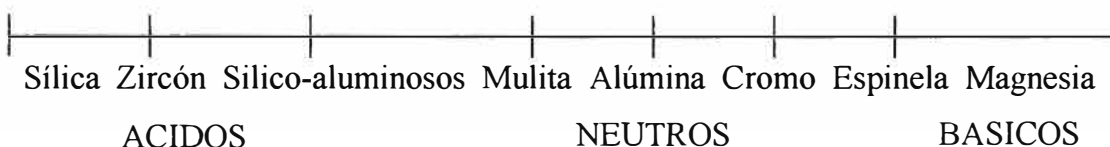
por su forma física (preformados o monolíticos)

por su uso (fundición de hierro, acero, cobre, aluminio, etc.)

por su naturaleza química (ácidos, neutro y básicos)

por su composición química (alta alúmina, magnesia, sílica, etc.)

Utilizando la clasificación por su naturaleza química, las diferentes materias primas utilizadas en refractarios se pueden agrupar de la siguiente manera:



Los óxidos refractarios a la izquierda de la escala son considerados ácidos, empezando por la sílica. Al centro los óxidos neutros, tales como alúmina y cromia. A la derecha de la escala, los óxidos básicos, tales como espinela y magnesia. Esta clasificación se basa totalmente en la solubilidad química del óxido predominante en un ambiente ácido o básico.

Un refractario ácido se usa en un ambiente ácido (ejemplo: escoria con alto contenido de sílice). Refractarios básicos se usan en un ambiente básico (ejemplo: escorias con alto contenido de manganeso).

### 1.3 Propiedades de los refractarios.

Los productos refractarios moldeados (ladrillos) que luego son cocidos para adquirir la liga cerámica, consisten de partículas minerales cristalinas ligadas por vidrio o por partículas minerales cristalinas más pequeñas. Cuando aquel producto moldeado se lleva de nuevo a alta temperatura, también se forma líquido en una proporción que depende de la composición del refractario y de la temperatura.

Las propiedades de un refractario, a determinada temperatura, dependen de la cantidad y carácter de los minerales, vidrio y líquido de los que está compuesto.

Los productos refractarios son cocidos o quemados para darles resistencia mecánica permanente, al ocurrir una adherencia entre las partículas adyacentes.

La unión o liga desarrollado por el tratamiento térmico se denomina liga cerámica.

La resistencia de esta liga cerámica en el producto depende del carácter de la mezcla, del tiempo y la temperatura de cocido.

### 1.4 Refractarios monolíticos.

Se denominan refractarios monolíticos a los castables, los plásticos, los gunitables y los apisonables.

Los refractarios monolíticos están desplazando a los refractarios de piezas preformadas debido a su bajo costo de producción y su rápida instalación.

#### A. Castables .

Los castables o concretos refractarios están compuestos de agregados refractarios, cemento, aditivos y agua. El cemento más utilizado es el cemento de aluminatos de calcio, tema del cual se tratará con más detalle en los siguientes capítulos.

- Cemento de aluminatos de calcio: Aglomerante o ligante hidráulico obtenido por la molienda del clinker aluminoso, pudiendo contener adiciones de enriquecimiento en la cantidad de alúmina y aditivos para el control de las características técnicas.

- Clinker aluminoso: Producto constituido en su mayor parte por aluminatos de calcio con propiedades hidráulicas, obtenido por proceso industrial de sinterización, fusión o electrofusión.

- Adiciones: Materias finamente molidas introducidas en los procesos de producción o en la fase de molienda, constituidos en su mayor parte de alúmina y denominados fillers.

#### B. Plásticos.

Materiales refractarios de composición variable y cuya textura es semejante a la de arcillas para productos moldeables. Contienen pocos agentes ligantes, los cuales se eliminan al entrar en servicio, dando un revestimiento homogéneo.

Son utilizados mayormente para revestimientos densos cuando se necesita una buena resistencia a las escorias, a los metales fundidos y al choque térmico. Se apisonan con martillos neumáticos; favorece un bajo porcentaje de agua (3% - 6%), logrando poca contracción al secado, y debido a su pureza brinda buena resistencia a altas temperaturas.

#### C. Gunitables.

Son mezclas que tienen las mismas composiciones que los castables, pero con diferente granulometría.

Son aplicados con pistolas a presión de aire, sea en seco o premezclado con agua en una cámara al vacío. La consistencia del gunitable es como la de una crema.

Es de mucha importancia la experiencia del operario aplicador, ya que existe mucha tendencia a la segregación y rebote de los materiales gruesos.

#### D. Apisonables.

Refractarios de textura granular, semejante a la arena húmeda. Se mezclan con agua y apisonan en el lugar.

Son aplicados a mano o con equipos neumáticos para apisonar, mayormente en pisos de hornos de fundición, en hornos de hogar abierto y en hornos de arco de la industria siderúrgica.



## II. CLASIFICACION DE LOS CONCRETOS REFRACTARIOS

Actualmente, los refractarios monolíticos aluminosos son clasificados por su contenido de cemento. En los últimos 20 años se han incrementado las investigaciones sobre castables de bajo cemento desarrollando formulaciones que incluso están llegando a los denominados materiales con cero cemento (basados en liga de alúmina hidratada o geles).

La búsqueda de refractarios que provean mejores servicios a altas temperaturas, resistan a diferentes atmósferas, resistan a los choques térmicos, abrasión, etc., está conllevando a tener materiales de mejor calidad y bajo costo. En tanto, estos refractarios pueden agruparse en las tres siguientes clases:

- Concretos convencionales
- Concretos de bajo contenido de cemento
- Concretos de ultra bajo contenido de cemento

### 2.1 Concretos Convencionales.

Constituido de agregado y cemento de aluminatos de calcio, cuyo contenido está comprendido entre 20 a 30% y necesita de 8 a 15% de agua para su aplicación. Presentan excelente resistencia mecánica después de secados a 110 °C, en razón de enlaces hidráulicos, los cuales son modificados durante la fase de calentamiento. Están incluidos en esta categoría los concretos refractarios aislantes.

### 2.2 Concretos de Bajo Contenido de Cemento.

Concebidos en Francia hace unos 30 años, los concretos de bajo contenido de cemento tienen su tecnología basada principalmente en la utilización de materias primas de riguroso control granulométrico y químico. Actualmente estos cementos vienen sustituyendo con gran ventaja a los refractarios preformados y los concretos convencionales.

Tales ventajas son debidas a la gran reducción del contenido de cemento, al variar dichos contenidos entre el 5 al 8%, lo que reduce significativamente las impurezas y la cantidad de agua necesaria en la aplicación.

La asociación de estos factores propicia una mejora en las características del material, tales como, aumento significativo de la refractariedad, sensible incremento en la resistencia mecánica con una reducción de los efectos microestructurales, consecuentemente mejorando su desempeño.

### 2.3 Concretos de Ultra Bajo Contenido de Cemento.

Son obtenidos siguiendo la misma tecnología de los de bajo contenido de cemento, ya que utilizan de 1 a 3% del cemento de aluminatos de calcio. Los concretos de ultra bajo cemento poseen actualmente una gran aplicación en la industria siderúrgica, con excelentes desempeños de operación.

Los concretos convencionales, muestran una disminución importante en la resistencia mecánica cuando son tratados a 1000 °C, eso ocurre debido a la deshidratación, asociado a los defectos causados por la eliminación de agua de moldeo y estructural. Después de los 1000 °C ocurre una fase de sinterización y formación de fases vítreas, donde el cemento de aluminatos de calcio reacciona con la sílica del agregado, formando Anortita y Gehienita, los cuales poseen bajo punto de fusión, por tanto perjudicando las propiedades en caliente de estos concretos.

En cambio, los concretos de ultra bajo cemento presentan un aumento significativo de los niveles de resistencia mecánica después del tratamiento térmico, esto es debido a los mínimos defectos del sistema, a una buena densificación y principalmente a la reducción de la cantidad de agua que forma fases mineralógicas ideales.

En base a la clasificación definida, en el cuadro N° 1 se presenta las principales características de los concretos refractarios.

Cuadro N° 1: Características de los concretos refractarios

Características	Concretos convencionales	Concretos de bajo cemento	Concretos de ultra bajo cemento
% de cemento	> 10 %	5 – 8 %	< 3 %
Mezcla	Manual o mixer	Mezclador intensivo	Mezclador intensivo
Tipo de aplicación	Vertido o lanzado	Vertido	Vertido
Resistencia a la compresión	Media 50 MPa	Alta 75 MPa	Muy alta 100 MPa
Grado de calentamiento	30 °C/h	20 °C/h	20 °C/h
Porosidad	20 %	15 %	10 %
Resistencia a la abrasión	Baja	Buena	Muy buena
Pérdida de resistencia mecánica a 800 °C	40 %	Nada	Nada

### III. COMPONENTES DE LOS CONCRETOS REFRACTARIOS

Los concretos refractarios están constituidos de agregados, cemento, agua y aditivos, teniendo cada uno funciones diversas y que asociados resultan en un producto con características tales que pueden representar desempeños iguales o superiores a los refractarios convencionales formados, por tanto otorgando ventajas económicas y operacionales.

#### 3.1 Agregados.

Material inorgánico estabilizado química y físicamente, que actúa como un esqueleto estructural de los cuerpos cerámicos. El agregado sigue una distribución granulométrica según una curva predefinida, otorgando compacidad al elemento formado.

Existe una gran variedad de materiales que pueden usarse como agregados para el concreto refractario, con tal que tengan suficiente estabilidad a las altas temperaturas y no se descompongan o manifiesten expansiones o contracciones térmicas anómalas. La máxima temperatura a la que un concreto refractario puede usarse, depende principalmente del tipo de agregado y también, normalmente, de la dosificación de cemento empleada.

El uso de agregados calizos o dolomitas se recomienda para concretos refractarios que soporten temperaturas límite de 500 °C, ya que la rehidratación de los óxidos de calcio y magnesio formados por descarbonatación, puede conducir a la completa desintegración del concreto cuando superen dicha temperatura límite. No obstante las andesitas y los basaltos, es decir, rocas ígneas básicas, finamente divididas, dan concretos refractarios que pueden emplearse hasta 900 – 1100 °C. Corrientemente los ladrillos de construcción y las tejas de arcilla, suministran agregados para temperaturas de trabajo similares.

Generalmente el agregado más empleado es la chamota (material de silicato de alúmina), con contenidos de alúmina entre 30 y 44%. El poder refractario de estos concretos, crece con el contenido de alúmina del agregado. Así, los refractarios con 42-44% de alúmina suministran un agregado para concretos que tienen una temperatura límite en la cara caliente de 1350 °C. El poder refractario o

refratariedad crece al sustituir los alúmino-silicatos por otros materiales más puros o con más proporción de alúmina, por ejemplo, caolín calcinado, silimanita, kyanita calcinada y mulita. La alúmina es, por sí misma, un agregado excelente y es empleada en muy distintos grados de pureza, como esmeril, bauxita calcinada, alúmina tabular y alúmina fundida. Otros óxidos refractarios que pueden mencionarse son la magnesita calcinada a muerte y zirconia. Los agregados del tipo básico, tales como magnesia o cromo-magnesita dan concretos con una más alta resistencia a las escorias y cenizas básicas. Pueden fabricarse concretos refractarios ligeros, con diferentes clases de agregados, como son la escoria vitrificada, esquistos arcillosos activados, ladrillos aislantes o refractarios porosos, diatomitas calcinadas, vermiculitas y perlitas. Los concretos fabricados con estos agregados y cemento aluminoso, no son de tanta resistencia mecánica, debido a su estructura esponjosa, pero pueden soportar temperaturas razonablemente altas y poseen una conductividad térmica más baja. Mediante una cuidadosa selección de los agregados pueden prepararse concretos refractarios cubriendo un amplio intervalo de buena refratariedad, resistencia mecánica y conductividad térmica.

### 3.2 Cemento de Aluminatos de Calcio.

Está constituido de cal y alúmina, que forman los principales componentes de la referida materia prima.

El cemento de aluminatos de calcio es considerado de un desarrollo reciente, aunque sus características hidráulicas hubiesen sido descubiertas en 1847 por Vicat y después estudiadas por otros investigadores como Fremy, Michaelis, Bied, entre otros. El desarrollo del cemento aluminoso se inicia con la búsqueda de un cemento resistente a la corrosión por presencia de sulfatos, ya que el cemento Portland no lo cumple. En 1908 surge la patente Bied-Lafarge para la fabricación de cemento aluminoso con el nombre de Cemento Fondu, que en francés quiere decir cemento fundido.

La norma francesa NF P 15-315 (Abril de 1991) define al cemento aluminoso con las siguientes palabras:

"El cemento aluminoso Fondu es un ligante hidráulico, el cual es producto de una molienda y calentamiento hasta el punto de fusión de una mezcla de principalmente alúmina, cal, óxidos férricos y sílice, dosificados de manera que aseguren que el cemento resultante contenga por lo menos 30% de masa de alúmina .... La relación alúmina/cal es determinada de tal manera que el componente mineralógico principal sigue siendo el aluminato monocálcico; este valor generalmente varía entre 0.85 y 1.4."

El aluminato monocálcico es el componente más importante del cemento aluminoso, ya que gobierna sus principales propiedades.

En el cuadro N° 2 se presenta los principales componentes químicos de los cementos de aluminatos de calcio.

Cuadro N° 2: Principales componentes químicos de los cementos aluminosos

Componente químico	Tipo de cemento según contenido de alúmina			
	De 40 %	De 50 %	De 70 %	De 80 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37 – 41%	50 – 53 %	70 – 72 %	79 – 82 %
CaO	36 – 39 %	37 – 39 %	27 – 29 %	16 – 18 %
SiO <sub>2</sub>	3 – 5 %	4 – 5.5 %	< 0.8 %	< 0.4 %
Fe total	14 – 18 %	< 3 %	< 0.4 %	< 0.3 %

### 3.3 Agua.

El agua es el elemento fundamental para la aplicación de los concretos, por eso deberá ser añadida sólo en el momento de la preparación para su aplicación y en una cantidad recomendada por el fabricante. El no cumplimiento de estos detalles, puede ser nocivo a los concretos refractarios.

Cuando el agua es mezclada para formar los concretos refractarios, una parte es consumida para la hidratación del aluminato monocálcico y el restante para la fluidez necesaria de aplicación. En éste estado, los sólidos están en fase discontinua y el agua en fase continua.

Si es adicionado un exceso de agua, los granos gruesos se decantan y las partículas finas, incluido el aluminato monocálcico, quedan segregados,

resultando en una disminución del poder de enlace, menor densidad y aumento de la porosidad aparente.

Por tanto, un exceso de agua se debe evitar. La falta de agua también es perjudicial, pues las reacciones de hidratación pueden ser incompletas y así perjudicar la fluidez y la reología debido a los aditivos no reaccionados. La baja fluidez de la mezcla altera su compactación y en consecuencia modifica las demás características físicas del producto.

### 3.4 Aditivos.

Los aditivos son productos orgánicos o inorgánicos que se añaden en pequeñas dosis a la mezcla, durante o después de formada la pasta de cemento, con el objetivo de modificar las características físico-químicas u obtener propiedades reológicas particulares.

Los aditivos pueden ejercer sobre los concretos refractarios las siguientes funciones:

- reducción de la cantidad de agua,
- acelerador del tiempo de fragua y reacción,
- retardador de fragua y reacción,
- agente defloculador,
- agente fluidificador.

El uso de aditivos permite una obtención de mejoras en las características de los productos, utilizados en proporciones y situaciones adecuadas, ya que ellos modifican sensiblemente las propiedades reológicas de los productos refractarios.

Generalmente se utilizan pequeñas cantidades de aditivos, ya que son bastantes eficientes. Un exceso puede perjudicar las características de los concretos, principalmente su uso.

## IV. CEMENTO DE ALUMINATOS DE CALCIO

### 4.1 Procesos de fabricación.

La fabricación del cemento aluminoso requiere como materias primas alúmina y cal, siendo los materiales comunes, la bauxita y la caliza. Los productos cementantes pueden obtenerse por fritado, sinterización o fusión de proporciones adecuadas de estos materiales; sin embargo, prácticamente en todos los procesos de fabricación usados hoy, la bauxita y la caliza se funden completamente a altas temperaturas y por ello, se han empleado los términos: ciment fondu, cemento fuso, cemento fundido o Schmelzzement, para describir este tipo de cemento en varios países. Actualmente la fabricación del cemento aluminoso se realiza en Francia, Inglaterra, Norteamérica, Alemania, España, Yugoslavia, Rusia y en menor extensión en Polonia, Checoslovaquia, Hungría, Italia y Japón.

Entre los principales procesos de fabricación podemos destacar los siguientes:

- Sinterización o clinkerización de caliza y bauxita

- Fusión simple de bauxita roja y caliza

- Fusión reductora

#### 4.1.1 Sinterización o clinkerización de caliza y bauxita.

La fusión completa de la caliza y la bauxita no es esencial para la formación de aluminato cálcico; se han registrado varias patentes relativas a procesos, en los que las materias primas, pulverizadas y mezcladas, se mantienen durante algunas horas a temperaturas inferiores al punto de fusión, o sea unos 900 – 1200 °C. En estas condiciones, las reacciones en el estado sólido pueden ocurrir sin una sinterización o clinkerización visible; en general este método es demasiado lento o incompleto y necesita materias primas molidas muy finamente.

Se ha sugerido también la clinkerización de materiales pulverizados a altas temperaturas en hornos rotatorios, pero surgen dificultades si el contenido de óxido férrico de la bauxita es superior a unos 5% aproximadamente, ya que el intervalo de temperatura en la fusión incipiente y completa se vuelve muy corto, formándose con facilidad anillos de clinker. Las primeras patentes proponían diversos artificios encaminados a soslayar estas dificultades, por ejemplo,



mediante el empleo de combustibles que diesen una llama de menor temperatura, o mediante la combustión previa en una antecámara del horno; pero no existe un método para fabricar cemento aluminoso a partir de bauxita roja, en el que se practique la clinkerización de los materiales en un horno rotatorio.

Usualmente se fabrica un tipo de cemento aluminoso preparando briquetas de bauxita y caliza, finamente pulverizadas, y calcinándolas en un horno a una temperatura como máximo de 1250 °C. El producto fritado se muele después hasta la finura propia del cemento.

#### 4.1.2 Fusión simple de bauxita roja y caliza.

En este tipo de proceso de fabricación, las materias primas se funden completamente a 1500 – 1600 °C en condiciones oxidantes o sólo ligeramente reductoras. El clinker resultante contiene todos los constituyentes no volátiles de la bauxita y la caliza. Como combustible se emplea generalmente carbón pulverizado o fuel oil, aunque se han empleado también hornos eléctricos, allí donde la energía eléctrica es relativamente barata. El óxido férrico presente en la bauxita roja se reduce parcialmente a óxido ferroso, cuando se emplea carbón como combustible, resultando entonces un clinker de color muy oscuro. Variando la relación férrico/ferroso pueden producirse tonos diferentes entre amarillo parduzco y negro, sin que sean afectadas las propiedades cementantes del producto.

Mayormente los procesos de fabricación por fusión simple son realizados en hornos rotatorios, en hornos reverbero y en hornos eléctricos.

A. En hornos rotatorios: En los Estados Unidos, el cemento aluminoso se prepara por fusión de bauxita y calizas secas y pulverizadas, en un horno rotatorio calentado con carbón pulverizado, que se parece sustancialmente a los hornos empleados para el cemento Portland. El producto fundido sale a través de orificios practicados en la camisa del horno, próximos al extremo de combustión; después se le somete a un granulado con agua, antes de ser molido a la finura propia del cemento (ver figura N° 1).

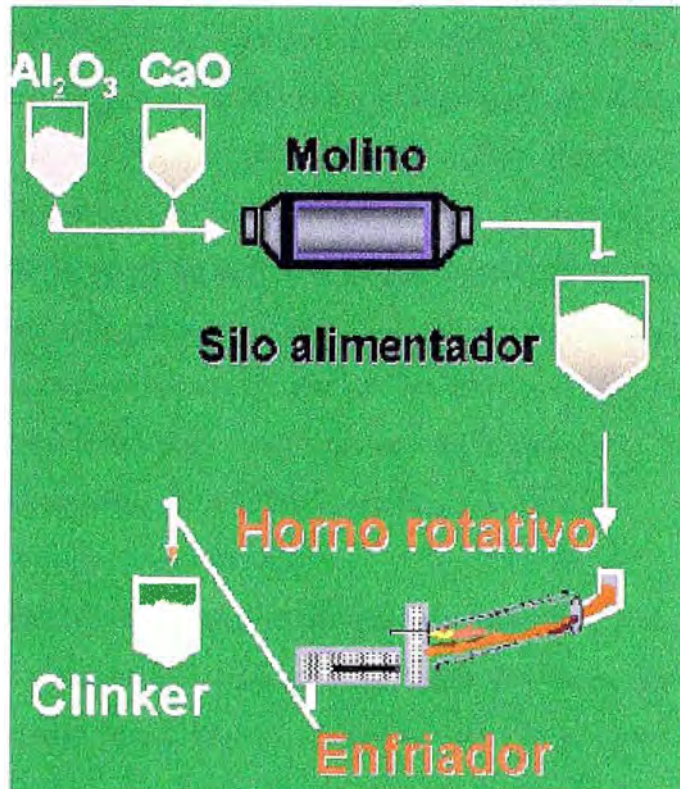


Figura N° 1: Proceso de fabricación en horno rotatorio

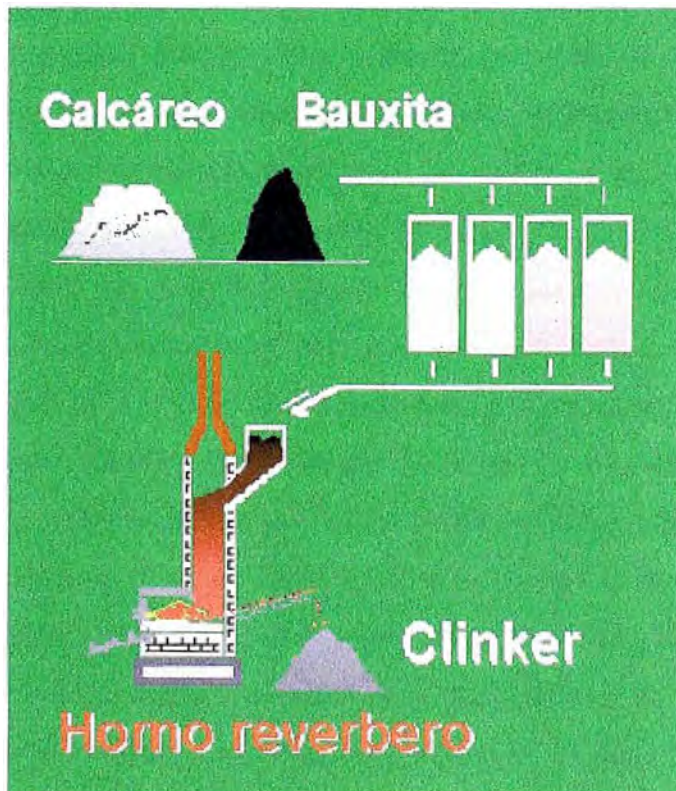


Figura N° 2: Proceso de fabricación en horno reverbero

B. En horno de reverbero: La fabricación en Inglaterra, Francia y Yugoslavia se realiza por fusión de granos de bauxita y caliza en hornos especiales, que tienen forma de L en su sección vertical. La parte vertical del horno consiste en una chimenea rectangular que se llena con las materias primas; los gases del horno al pasar a través de la carga de materias primas crudas, arrastran la humedad y el  $\text{CO}_2$ . La fusión tiene lugar en el punto donde cae la carga de la chimenea vertical al horno propiamente dicho. El clinker se mantiene líquido en la sección horizontal o de reverbero por el calor radiado de la bóveda, y fluye. Este proceso se completa por molienda del clinker hasta el grado de finura propio del cemento (ver figura N° 2).

C. En hornos eléctricos: Hornos eléctricos de arco, verticales, con dos o tres electrodos se han empleado hace años para fundir una carga consistente en masas pequeñas de bauxita (pre-calentada) y caliza; pero la producción de clinker de cemento aluminoso por fusión simple en tales hornos ha disminuido grandemente.

#### 4.1.3 Por fusión reductora.

Cuando se funden bauxita ferruginosa y caliza en presencia de carbón, el óxido férrico de la bauxita puede reducirse a hierro metálico. De esta forma, el contenido de óxido de hierro de la escoria o cemento se reduce a un valor muy bajo, obteniéndose fundición de hierro, como subproducto.

Este tipo de proceso de fabricación, por fusión reductora, se lleva a cabo mayormente en hornos de cubilote, altos hornos y hornos eléctricos.

A. En hornos de cubilote: Una de las primeras producciones comerciales de cemento aluminoso en Europa se efectuaron en hornos de cubilote, cargados con masas de bauxita, caliza o cal y coque. La envoltura cilíndrica vertical de acero del horno, se hallaba provista de refrigeración por corriente de agua, para así reducir el consumo de refractario; se aplicaba un soplado con aire caliente a la carga, a través de toberas radiales situadas en la parte inferior de la envoltura. El aluminato cálcico y el hierro fundidos acumulados en la caja del cubilote, se sangraban continuamente a lingoteras en las que tenía lugar el enfriamiento y solidificación.

B. En altos hornos: Puede realizarse una fusión reductora de los mismos materiales, en mayor escala, en los altos hornos ordinariamente usados en siderurgia para la producción del arrabio. Los primeros experimentos se realizaron en Estados Unidos y en Alemania; el proceso ya perfeccionado se constituyó como el más comercial por muchos años. El fierro fundido y la escoria de aluminato cálcico se sangran separada e intermitentemente, para luego realizar la molienda de la escoria a la finura deseada. Se han registrado numerosas patentes para la fabricación de cemento aluminoso en altos hornos, incluyendo algunas en la que plantean alcanzar una reducción sustancial del contenido en sílice del cemento, por formación de ferrosilicio.

C. En hornos eléctricos: Los hornos de arco son muy convenientes para la fusión reductora de la bauxita roja, caliza o cal y coque; originando una escoria de contenido muy bajo en óxido de fierro, juntamente con fundición de fierro. Por este método se preparan grandes cantidades de una composición de aluminato cálcico, como producto intermedio en el proceso Pederson de preparación de aluminio. En la producción simultánea de aluminatos cálcicos y fósforo, por procesos de fusión reductora en hornos de arco, además del coque, la carga del horno puede constituirse en fosfato cálcico y bauxita, fosfato cálcico y fosfato de aluminio, o bien fosfato de aluminio y cal.

#### 4.2 Control de calidad y métodos de ensayo.

En el proceso de fabricación, los laboratorios de control de calidad miden las propiedades químicas, mineralógicas, físicas y mecánicas del producto terminado. Estos laboratorios también monitorean en su integridad muestras on-line de los procesos, las cuales proveen la información química necesaria que ajuste el flujo de materiales.

Entre los principales parámetros medibles destacan las relaciones en materia prima bajo los contenidos adecuados de  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ , el contenido de  $\text{FeO}$ , el monitoreo de oxígeno dentro del horno, las relaciones de combustible/aire para una buena combustión, la medición de las propiedades reológicas, etc.



## B. Aguja Vicat

La aguja Vicat es usada para determinar consistencia y tiempo de fraguado.

Características:

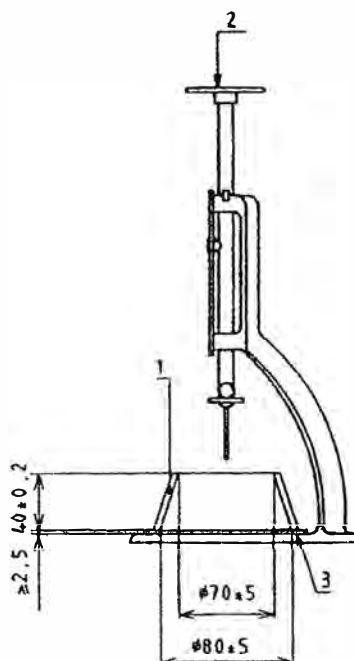
- Longitud de aguja: 50 mm.; diámetro: 1.13 mm.
- Masa de items móviles: 1000 g. para mortero, 300 g. para pasta de cemento puro.
- Molde truncado.

El fraguado es medido sea bajo agua o en una unidad de aire acondicionado con una temperatura de  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y una humedad relativa de por lo menos de 90%.

La aguja Vicat es bajada perpendicularmente hacia la superficie del mortero o de la pasta, los cuales han sido nivelados previamente. Es fijado en esta posición por 1 o 2 segundos con el fin de evitar una velocidad inicial y aflojamientos rápidos.

Entonces se procede a medir la profundidad de penetración de la aguja.

Las observaciones son repetidas hasta el inicio del fraguado.



1: Molde de caucho duro; 2: Plato para pesos adicionales; 3: Panel de vidrio

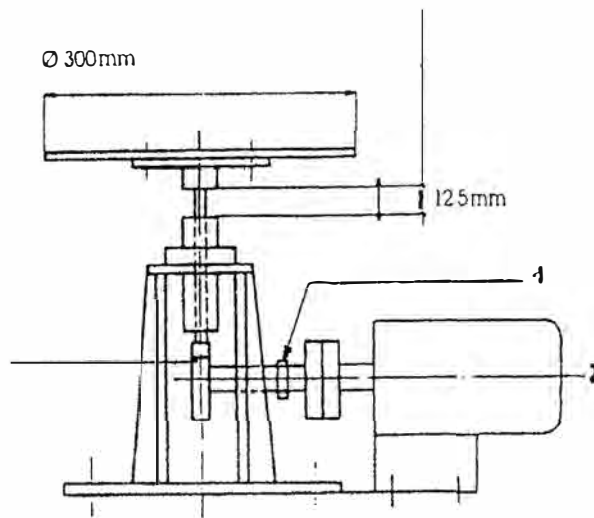
Figura N° 4: Unidad Vicat

### C. Tabla de Vibración

El mortero es colocado en un molde truncado diferente de uno que ha sido usado en los procesos de fraguado.

Las características del mortero serán:

- diámetro de la base =  $D_0 = 100 \text{ mm}$
- diámetro superior =  $70 \text{ mm}$
- altura =  $50 \text{ mm}$



1: Contactor con indicador de revoluciones y preselección; 2: Motor

Figura N° 5: Tabla de vibración

### D. Equipos de ensayo de Resistencia Mecánica

Los principales ensayos de resistencia mecánica consisten principalmente en la medida de los esfuerzos por flexión y por compresión.

#### - Flexión

El diseño de rodillos para medir la flexión es mostrado en la figura 6, la cual incluye dos rodillos llevaderos (diámetro =  $10 \text{ mm}$ , distancia entre ellos =  $100 \text{ mm}$ ), sobre los cuales es colocado la muestra de ensayo en una cara del molde. Un tercer rodillo (del mismo diámetro y con espacios equidistantes) transmite la carga.

La fuerza  $F$  es aplicada uniformemente a una velocidad de  $50 \pm 10$  N/s hasta el punto de quiebre.

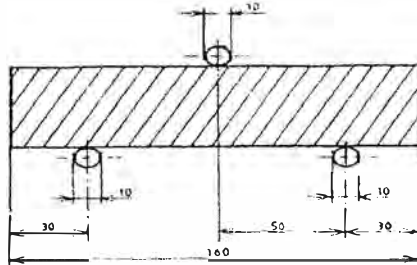


Figura N° 6: Disposición de cargas para la determinación de la fuerza a flexión

#### - Compresión

Las restantes dos partes del prisma obtenido durante el ensayo de flexión son sometidos al ensayo de compresión (Figura N° 7). La carga es incrementada uniformemente a una velocidad de 2400 N/s hasta el punto de quiebre.

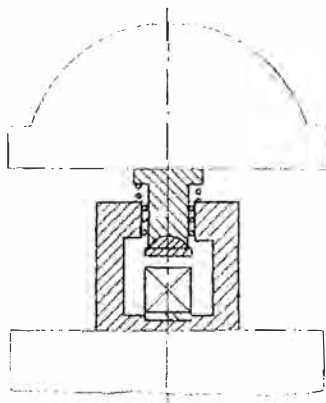


Figura N° 7: Equipo de ensayo a la compresión

#### 4.2.3 Ensayos sobre mortero estandar

Para los diferentes ensayos sobre mortero, éstos deben cumplir algunos requisitos en su preparación. La arena a usarse debe ser una arena natural limpia silíceas, con granos redondos y secos y de granulometría determinada. Ver cuadro N° 3.

Cuadro N° 3: Características de la arena de mortero estandar

Tamaño de malla (mm)	2.00	1.60	1.00	0.5	0.16	0.08
Rechazos sobre el tamiz (%)	0	7±5	33±5	67±5	87±5	99±1



El procedimiento de mezcla es el siguiente:

Verter agua y luego el cemento en el recipiente del mezclador.

Mezclar a baja velocidad durante 60 segundos, introduciendo la arena durante los últimos 30 segundos, entonces mezclar a alta velocidad durante 30 segundos.

Detener la mezcla por 1 minuto y 30 segundos e inmediatamente raspar las paredes del recipiente.

Continuar la mezcla a alta velocidad por 60 segundos.

Generalmente los ensayos sobre mortero estandar son de determinación del tiempo de fraguado, medida de la trabajabilidad y medida de la resistencia mecánica.

#### A. Determinación del tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado es medido por el método de ensayo de la aguja Vicat.

El tiempo de fraguado inicial es definido como el momento exacto cuando la aguja cesa de penetrar y se detiene a una distancia del fondo del molde excediendo 2.5 mm, el cual es el tamaño de grano de arena más grande.

El tiempo de fraguado inicial es el momento cuando la aguja no penetra más en la superficie del mortero.

#### B. Medida de la trabajabilidad

Entre las muchas técnicas posibles de evaluación de la trabajabilidad de un concreto (slump, medida de trabajabilidad, valor flujo, etc.), el método de ensayo de flujo ASTM 230 es el seleccionado para los cementos de aluminatos de calcio.

El ensayo es llevado a cabo con un mortero estandarizado sobre una tabla de vibración, siguiendo los siguientes procedimientos operativos:

Dejar el mortero por 30 segundos dentro del molde

Retirar el cono

Someter el mortero a 25 choques

Medir el nuevo diámetro  $D_1$

Calcular la expansión de flujo:  $E = \frac{D_1 - D_0}{D_0} * 100$

$D_0 = 100 \text{ mm}$

### C. Medida de la Resistencia Mecánica

Las propiedades mecánicas para flexión y compresión son medidas de acuerdo a la norma Standard EN 196-1 y son calculadas en prismas de 40 mm x 40 mm x 160 mm, con morteros fabricados de acuerdo a la norma Standard NF P15-315/330.

El mortero una vez fabricado es llevado al molde y se llena hasta la mitad para luego compactarlo con 60 choques. Inmediatamente se llena la otra mitad restante y se compacta de nuevo con 60 choques más.

Las restantes dos partes del prisma obtenido durante el ensayo de flexión son utilizados para el ensayo a la compresión.

Se almacenan estas probetas de ensayo en un ambiente húmedo por 24 horas.

Los ensayos deberán realizarse en las siguientes fechas: 24 horas, 3 días, 7 días, 28 días.

### 4.3 Mineralogía.

Como los cementos aluminosos son formados por la reacción química de los compuestos de calcio, aluminio y silicio, para un mejor detalle de la formación de las fases mineralógicas podemos usar la notación cementera, que es diferente a la notación química, y es representada de la siguiente forma:

C = CaO (Oxido de Calcio);

A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Oxido de Aluminio);

S = SiO<sub>2</sub> (Oxido de Silicio)

En la figura N° 8 se muestra el diagrama de fases ternario para estos óxidos, dentro del cual se encuentran las fases formadas por los cementos de aluminatos de calcio. Como referencia se ubica el campo de fases de los cementos Portland.

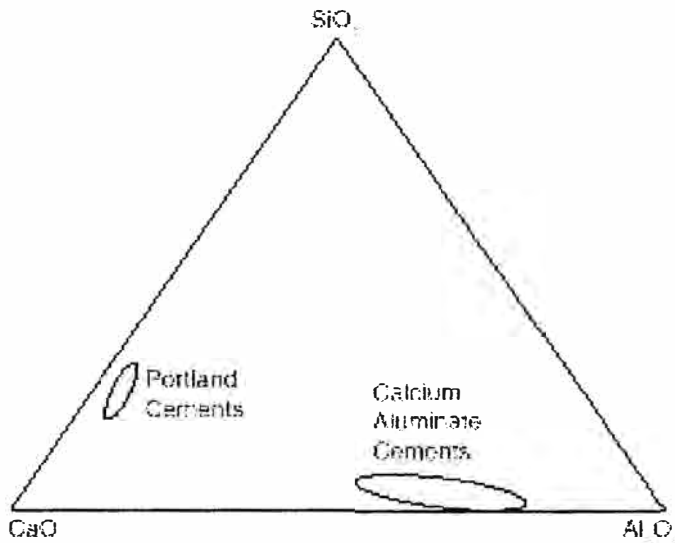


Figura N° 8: Diagrama de fases CaO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> (C - A - S)

La calidad de los cementos aluminosos está directamente ligada al control de la formación de las fases mineralógicas, ya que estas definen el comportamiento y la reactividad de los productos. De este control dependen las características del tiempo de fragua, flujo, reología, resistencias, etc.

La cal u óxido de calcio (C) es un elemento muy reactivo, mientras que la alúmina (A) y la sílica (S) son menos reactivos. Por tanto, la reactividad del cemento puede ser medida a partir de la relación:  $C / (A+S)$ .

En el cuadro N° 4 se muestra las fases existentes en los cementos y el comportamiento de su reactividad.

Cuadro N° 4: Fases mineralógicas y su reactividad

Cemento de Aluminatos de Calcio	
Fases	Reactividad
C <sub>12</sub> A <sub>7</sub>	Muy rápido
CA	Rápido
CA <sub>2</sub>	Lento

Cemento Portland	
Fases	Reactividad
CS	Inerte
C <sub>2</sub> S	Lento
C <sub>3</sub> S	Rápido
C	Instantánea
C <sub>3</sub> A	Muy rápida

Los cementos son en realidad mezclas de las fases llamadas principales y secundarias, no habiendo posibilidad de combinación de 3 o 4 fases diferentes como constituyentes principales.

Normalmente las más encontradas son dupletas como  $CA/C_{12}A_7$  o  $CA/CA_2$ .

Para un cemento aluminoso con 40% de alúmina las fases presentes son:

$CA$ ,  $C_2AS$ ,  $C_{12}A_7$ ,  $C_2S$ ,  $C_4AF$ ,  $C_6AF_2$  y fibras de  $C_6A_4SF$ .

Para un cemento aluminoso con 70% de alúmina las fases presentes son:

$CA$ ,  $CA_2$ ,  $C_{12}A_7$ , y  $A$ .

#### 4.4 Hidratación.

La reacción entre el cemento y el agua para producir hidratos cristalinos es química y por lo tanto se lleva a cabo en proporciones fijas. La relación agua/cemento requerida para una reacción completa es por lo tanto una constante y es también conocida como la relación crítica.

En realidad, desde el punto de vista químico, es la relación estequiométrica entre el agua y el cemento.

El valor de esta relación depende de la reacción específica involucrada. En el caso del cemento aluminoso existen dos valores extremos dependiendo de la temperatura de reacción. A bajas temperaturas, típicamente menores a 20 °C se forma un hidrato de baja densidad con un alto contenido de agua (ver figura N° 9). Cuando el cemento está inicialmente hidratado a baja temperatura y seguidamente es expuesto a altas temperaturas, la baja densidad del sistema es convertida en alta densidad. La ocurrencia de las altas temperaturas y de la rapidez del cambio se conoce como conversión. Este efecto es irreversible.

Será evidente que lo antedicho sobre la relación estequiométrica agua/cemento para el sistema de hidrato a baja temperatura será más grande que para el sistema de hidrato a alta temperatura. Estas relaciones son generalmente expresadas por peso. Sin embargo es instructivo expresarlos como relaciones en volumen.

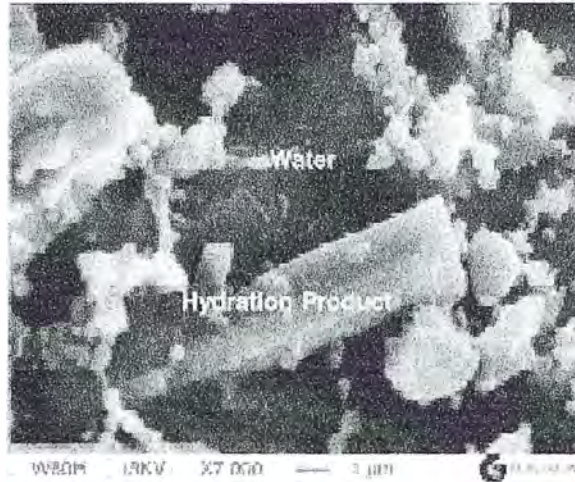
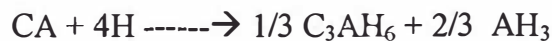


Figura N° 9: Microfotografía de la hidratación del sistema cementicio a 20° C

A 50 °C la reacción principal del cemento aluminoso puede ser escrito de la siguiente manera:



A 20 °C la reacción esencial es:



Los hidratos formados tienen alta resistencia mecánica, principalmente después del curado y secado a 110 °C.

Las propiedades de endurecimiento desarrollado a través de la hidratación se denomina fragua hidráulica.

En el cuadro N° 5 se muestran las ecuaciones de hidratación del Aluminato de Calcio (CA).

Cuadro N° 5: Ecuaciones de formación de hidratos

CA	+ 10 H	----->	CAH <sub>10</sub>
2 CA	+ 11 H	----->	C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub> + AH <sub>3</sub>
3 CA	+ 12 H	----->	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> + 2 AH <sub>3</sub>
2 CAH <sub>10</sub>		----->	C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub> + AH <sub>3</sub>
3 CAH <sub>10</sub>		----->	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> + 2 AH <sub>3</sub> + 18 H
3 C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub>		----->	2 C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> + AH <sub>3</sub> + 9 H

En relación a la cantidad de agua de cristalización de los hidratos, en el cuadro N° 6 se muestran los porcentajes respectivos.

Cuadro N° 6: Cantidad de agua de cristalización de los hidratos

HIDRATOS	AGUA DE CRISTALIZACION (%)
CAH <sub>10</sub>	53.3
C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub>	40.3
C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>	28.6
AH <sub>3</sub>	34.6

Se observa que la cantidad de agua de cristalización varía de acuerdo con el tipo de hidrato, cuya formación y función de temperatura de curado se muestra en el siguiente cuadro N° 7.

Cuadro N° 7: Temperatura de formación de los hidratos

TEMPERATURA (°C)	HIDRATOS FORMADOS
Hasta 20 °C	CAH <sub>10</sub>
De 20 °C a 35 °C	C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub> , C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> , AH <sub>3</sub>
Más de 35 °C	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> , AH <sub>3</sub>

La cantidad de agua en AH<sub>3</sub> varía de acuerdo con la temperatura de hidratación, formando diferentes hidratos con propiedades y características diferentes de composición, cristalización y densidad.

## V. DISEÑOS DE MEZCLA

El diseño de mezcla de concretos es la aplicación técnica de los conocimientos físicos y químicos de sus componentes y la interacción entre ellos, para obtener un producto que cumpla con los requerimientos del proyecto refractario.

Es esencial tener conocimiento del proceso de aplicación que se va a realizar, ya que para cada obra existen condiciones diferentes de temperatura, ambiente, tipo de materiales, equipos, mano de obra, etc., lo cual hace que cada diseño de mezcla se adecúe a la realidad del medio.

Existen una serie de métodos de diseño de mezcla, presentados bajo gráficos y/o tablas que estiman las cantidades de agua en función del tamaño máximo, geometría del agregado y el asentamiento, relaciones agua/cemento a usar en función a las resistencias a la compresión; proporciones en que deben dosificarse los agregados gruesos y finos en base a gradaciones y consideraciones teóricas y/o prácticas, etc.

Entre los parámetros básicos de los métodos de diseño de mezclas tenemos:

### 1. Volúmenes absolutos.

Se basa en el principio de considerar en el cálculo los volúmenes de los componentes sin incluir los vacíos entre ellos. De manera tal que al sumarlos con el aire que atrapa el concreto suministren la unidad de medida que se esté adoptando, generalmente 1 metro cúbico.

### 2. La resistencia a la compresión y la relación agua/cemento.

La resistencia a la compresión es un requisito principal para consideraciones de durabilidad y para consideraciones estructurales. Conllevando a la determinación del parámetro agua/cemento, quien regula estas consideraciones.

Muchas veces se asume una relación agua/cemento bastante baja para optimizar la impermeabilidad, la resistencia a la abrasión y el desgaste, la resistencia a los ataques químicos, etc.

### 3. La granulometría de los agregados.

El criterio de utilizar granulometrías adecuadas se basa en buscar el mejor acomodo entre las partículas, creando una estructura muy densa, resistente e impermeable y favoreciendo la trabajabilidad.

Existe una diversidad de métodos para evaluar las gradaciones de los agregados, dependiendo de la confiabilidad que le asigne el sustento técnico de cada uno. Esta etapa es la que diferencia un tipo de diseño de otro.

No se han establecido criterios absolutos en este aspecto, pero sin embargo, casi todos usan el concepto del Módulo de Fineza.

### 4. La trabajabilidad.

La trabajabilidad es el mayor o menor trabajo que hay que aportar al concreto en estado fresco, en los diferentes procesos de fabricación, transporte, colocación, compactación y acabado. Generalmente se evalúa la trabajabilidad por medio del “slump” o asentamiento con el cono de Abrams, ya que permite una aproximación numérica a esta característica.

La trabajabilidad está influenciada principalmente por la pasta, el contenido de agua y el equilibrio adecuado entre agregados gruesos y finos, que produce en el caso óptimo una forma de desplazamiento continuo muy natural.

Para concretos de cementos de aluminatos de calcio, la trabajabilidad es medida a partir de un mortero estandarizado, cuyas composiciones de diseño de mezcla se muestran en el cuadro N° 8.

Cuadro N° 8: Composiciones para diferentes morteros estandar

	Tipo de cemento de aluminatos de calcio			
	40 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Arena	1350 g	1350 g	1350 g	1350 g
Cemento	500 g	500 g	450 g	500 g
Agua	200 g	200 g	225 g	180 g
Relación A/C	0.4	0.4	0.5	0.36



Diseños de mezcla típicos para concretos de cementos de aluminatos de calcio con 80% de alúmina se presentan en el cuadro N° 9, tanto para concretos densos como para concretos aislantes. Las dosificaciones se indican para 1 m<sup>3</sup> puesto en obra y han sido obtenidos a partir de mezclas estandar, utilizando agregados refractarios comerciales.

Cuadro N° 9: Diseños de mezcla con cementos de 80% de alúmina

Naturaleza del agregado	Concretos densos				Conc. aislante	
	Chamota 42-44% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Alúmina tabular		Corindón globular	
Granulometría	0-5 mm.		0-6 mm.		0-5 mm.	
Densidad aparente del agregado	1.23		1.58		0.80	
Dosificación del concreto por 1 m <sup>3</sup>	Kg.	l.	Kg.	l.	Kg.	l.
Arido 0-5 mm.	1612	1311	2392	1514	968	1210
Cemento	500	714	500	714	350	500
Cantidad de agua por 1 m <sup>3</sup> de concreto (l)	188		191		183	
% de agua en relación al peso	8.9	9.3	6.6	8.6	13.9	10.7
A/C (en peso)	0.38		0.38		0.53	
Densidad in situ t/m <sup>3</sup>	2.30		3.10		1.50	

Diseños de mezcla con cementos aluminosos de 40% de alúmina y agregados naturales (arenas silíceas y piedras graníticas o calcáreas) son recomendados para temperaturas menores de 300 °C, procediendo a fabricar el concreto de forma similar como se fabrican los concretos de cemento Portland comunes aplicables en obras civiles.

En este caso el diseño de mezcla recomendado para un concreto de 1 m<sup>3</sup> de volumen es el siguiente:

- Cemento: 500 Kg.
- Arena: 400 l.
- Piedra: 800 l.
- Agua: 200 l.

Diseños de mezcla con cementos aluminosos de 40% de alúmina para altas resistencias a temperatura (1100 °C) y resistencias a fuerte abrasión son recomendados ser mezclados con agregados aluminosos denominados comercialmente Alag.

Alag es un agregado sintético silico-aluminoso-cálcico obtenido por fusión, que contiene aproximadamente 40% de alúmina. Se caracteriza por su alta densidad y elevada dureza.

Este agregado presenta una notable afinidad química con el cemento aluminoso, es por eso que los concretos con este material desarrollan resistencias de primera categoría.

La composición de mezcla con el agregado Alag se muestra en el cuadro N° 10.

Cuadro N° 10: Composición de mezcla para morteros y concretos con agregado aluminoso Alag

		Cemento Aluminoso	Alag Fino	Alag Grueso	Agua
Mortero (espesor < 50 mm)	Dosificación (Kg/m <sup>3</sup> )	600	1800	-	240 l.
	Proporción en peso	1	3	-	0.4
Concreto (espesor > 50 mm)	Dosificación (Kg/m <sup>3</sup> )	515	1030	1030	206 l.
	Proporción en peso	1	2	2	0.4

Densidad en concreto aplicado: 2.6 ton/m<sup>3</sup>

Las resistencias mecánicas obtenidas en concreto, con el diseño de mezcla recomendado, son las siguientes:

Cuadro N° 11: Resistencias mecánicas de concretos con cemento y agregado de aluminatos de calcio

Resistencias mecánicas a 20 °C (MPa)			
	1 día	7 días	28 días
Compresión	55	70	90
Resistencias después del calentamiento (MPa)			
Calentamiento a:	Flexión	Compresión	
110 °C	9.0	95.0	
800 °C	6.5	72.0	
1100 °C	4.0	45.0	

## VI. PROPIEDADES

Los cementos de aluminatos de calcio confieren a los concretos refractarios propiedades especiales, las cuales tienen su explicación en el predominio de los hidratos de cal, principalmente el aluminato monocálcico. La selección de un adecuado agregado también es de gran influencia para la buena performance refractaria o aislante del concreto.

Estos concretos refractarios se caracterizan por su estructura densa altamente uniforme con baja porosidad. El bajo contenido de cal y su estructura densa otorga las altas resistencias a través de un gran rango de temperaturas, excelentes propiedades termo-mecánicas y la resistencia a la corrosión frente a los ataques por líquidos y escorias fundidos.

Entre las principales propiedades se pueden destacar:

- Alta refractariedad
- Elevada resistencia mecánica
- Resistencia a los choques e impactos
- Resistencia a los cambios de temperatura
- Resistencia al desgaste
- Resistencia a la corrosión
- Endurecimiento rápido
- Puesta en servicio en corto tiempo

En la industria refractaria, los concretos deben resistir igualmente bien a los choques térmicos, así como a los ataques químicos y a la violencia de los esfuerzos mecánicos.

Los concretos refractarios, gracias a sus propiedades particulares, les es posible hacer frente con flexibilidad a los diversos requerimientos que se producen, sean estos de naturaleza térmica, química y mecánica. Por tanto se detallará las propiedades en función a las siguientes resistencias:

- Resistencia a los choques térmicos
- Resistencia a los ataques químicos
- Resistencia a los esfuerzos mecánicos

### 6.1 Resistencia a los choques térmicos.

En el proceso de cocido de los materiales refractarios, éstos son sometidos a un ciclo de calentamiento y enfriamiento. Los materiales refractarios pesados, generalmente se cuecen en una sola vez, mientras que los productos más finos exigen, casi siempre una doble cocción.

Sea cual fuera la manera de como funciona un horno, de forma continua o de forma intermitente, los intervalos de temperatura que corresponden a modificaciones en la estructura (paso del caolín a metacaolín o transformación cristalina reversible del cuarzo) deben transcurrir lentamente, principalmente cuando van acompañados de un cambio de volumen.

En esta etapa de cocido, los materiales experimentan frecuentes choques térmicos cuyos efectos pueden ser más notorios en los hornos intermitentes. Las condiciones son particularmente desfavorables durante el enfriamiento debido a que se establece un gradiente de temperatura entre la cara caliente y la cara fría del material refractario.

Estos choques térmicos hacen correr el riesgo de que provoquen fisuras en los refractarios en el peor de los casos, o de que hagan aparecer microfisuras superficiales en los casos de menor gravedad. Pero esta fisuración facilita en este caso otros ataques, abriendo el camino de un modo notable a la corrosión química. Existen diversos procesos de fabricación de materiales y piezas, con temperaturas de cocido variables dentro de los hornos (ver cuadro N° 12).

Cuadro N° 12: Temperaturas de cocción para diversos materiales

Cocción de productos de color rojo (ladrillos, tejas)	900 – 1050 °C
Cocción de mayólica y vajilla de gres	1100 – 1250 °C
Cocción de gres sanitario y de gres térmico	1250 – 1400 °C
Cocción de vajilla de porcelana y de porcelana artística	1300 – 1450 °C
Cocción de cerámica para la electrónica	1500 – 1700 °C
Cocción de piezas especiales de alúmina sinterizada	1850 – 2000 °C

Frente a estas condiciones térmicas, el comportamiento satisfactorio del material refractario depende de dos factores:

la resistencia pirosfópica del concreto refractario y de los esfuerzos que les son aplicados.

La variedad de los aglomerantes aluminosos de refractariedad creciente desde el cemento aluminoso con 40% de alúmina hasta el de 80% de alúmina y de los agregados disponibles permite la elaboración del concreto que mejor se adapte a los requerimientos térmicos de hasta 1900 - 2000 °C .

La cohesión del concreto refractario bajo los efectos de la temperatura queda asegurada a través de un proceso de reacción en tres etapas:

Evolución por separado de cada uno de los componentes. Esta fase tiene lugar durante el endurecimiento y el inicio del calentamiento.

Reacción entre las partículas de mayor actividad.

Sinterización: reacción responsable de la cohesión y determinante de la composición final.

En el cuadro N° 13 se muestra el campo de utilización de los concretos refractarios en el caso de paredes que tengan una cara caliente y una cara enfriada, para diversas parejas cemento-agregado.

De este modo, la gama de concretos refractarios permite hacer frente a todas las temperaturas que se encuentran en la industria refractaria.

Al igual que los demás materiales refractarios, los concretos refractarios están sometidos a las fatigas que derivan de los choques térmicos.

Muchas veces un concreto refractario resiste mejor que una pieza formada, debido a que ésta tiene porosidad relativamente elevada y una menor rigidez mecánica.

Esta propiedad le confiere una menor propensión a la fisuración o a la microfisuración superficial, factor favorable que acrecienta su resistencia a la penetración total de los agentes químicos agresivos.

Cuadro N° 13: Campo de utilización de los concretos refractarios

Tipo de agregado	Tipo de cemento de aluminato de calcio			
	40% $Al_2O_3$	70% $Al_2O_3$	80% $Al_2O_3$	
Silíceos				500 °C
Basalto, Granito, Escoria de alto horno				800 °C
Ladrillo rojo machacado				1000 °C
Alag				1150 °C
Chamota 40 – 42% $Al_2O_3$				1200 °C
				1450 °C
Ladrillo refractario machacado 42-44%				1300 °C
				1450 °C
				1300 °C
Silimanita, Gibbsita				1500 °C
				1600 °C
Alúmina fundida parda				1600 °C
				1800 °C
Alúmina fundida blanca				1800 °C
				1900 °C
Alúmina tabular				1800 °C
				2000 °C

## 6.2 Resistencia a los ataques químicos.

En determinados hornos cerámicos, en los que se practican tratamientos especiales, los ataques químicos pueden ser muy peligrosos. Principalmente en procesos de cocción en atmósfera reductora, procesos de salado del gres y en procesos con presencia de vapores ácidos.

Cualquiera que sea el tipo de agresión química, una vez que se hayan elegido convenientemente el aglomerante y los agregados, es recomendable que se prepare un concreto que sea lo más compacto posible, cuidando que la curva granulométrica sea la adecuada y vibrándolo. Los riesgos de agresión quedan por otra parte considerablemente reducidos con la propia tecnología que se emplea en la construcción del concreto, la cual permite obtener revestimientos monolíticos y suprime los puntos débiles y permeables, como son las juntas.

En particular en cerámica, se encuentran con bastante frecuencia dos tipos de agresión específica y excepcionalmente una tercera forma de corrosión, las cuales son:

Agresión por el monóxido de carbono (CO)

Agresión por la sal fundida

Agresión por los vapores ácidos

### 6.2.1 Agresión por el monóxido de carbono (CO).

Los concretos refractarios pueden resistir a la desagregación causada por el monóxido de carbono (CO), a condición de que se utilicen aglomerantes y agregados exentos de fierro metálico o de óxidos de fierro en estado libre.

Ensayos efectuados, tanto por la transnacional Lafarge como por laboratorios estatales en Francia, han revelado que los cementos aluminosos con porcentajes de alúmina entre 50% y 80%, resisten particularmente bien a esta agresión por parte del monóxido de carbono.

En efecto, estos aglomerantes no contienen en sus composiciones químicas ni fierro libre ni óxidos de fierro libre.



### 6.2.2 Agresión por la sal fundida.

Como consecuencia del gradiente térmico a que queda sometido el material refractario, la corrosión por el cloruro sódico fundido a temperatura elevada debería quedar limitada a la cara caliente, pero la porosidad ofrece una vía de comunicación privilegiada para el líquido corrosivo.

Así se comprende fácilmente que los ladrillos aislantes que corrientemente se emplean en los hornos intermitentes para la cocción del gres, sean la sede de la corrosión que provoca la sal y que sea necesario protegerlos con un revestimiento prácticamente impermeable y sobre todo inatacable. Los concretos refractarios compuestos de cemento aluminoso con 70% de alúmina y corindón blanco dan los mejores resultados contra el ataque de la sal a alta temperatura. Concretos refractarios de cementos aluminosos con 80% de alúmina y agregado como la gibbsita calcinada, también resisten por igual de un modo muy satisfactorio.

### 6.2.3 Agresión por los vapores ácidos.

La combustión del azufre contenido en los combustibles pueden dar lugar, en presencia de humedad, a la formación de ácido sulfúrico, el cual puede condensarse en las paredes si la temperatura del horno desciende por debajo del punto de rocío.

Los aglomerantes aluminosos, no son ciertamente antiácidos pero resisten a la acción de los ácidos cuyo pH este comprendido entre 4 y 5 según sean las condiciones en que tenga lugar el contacto. Naturalmente, serán contraindicados para aquellos ácidos cuyas concentraciones sean bastante elevadas, fenómeno que, por otra parte es extraño en los hornos para cerámica.

### 6.3 Resistencia a los esfuerzos mecánicos.

Los distintos esfuerzos mecánicos que deben soportar los revestimientos refractarios no deben comprometer su solidez en caliente. El material de construcción refractario queda sometido no tan solo a su propio peso sino que igualmente lo está a otras cargas (debidas a los muros de ladrillos laterales y a la

bóveda) y además queda sujeto a las influencias térmicas. Las fuerzas perturbadoras provienen de orígenes diversos:

Compresiones elevadas

Choques mecánicos y abrasión

Fatigas termo-dilatométricas

El comportamiento mecánico es consecuencia de los enlaces hidráulicos o cristalinos con la acción del calor.

Después del endurecimiento y hasta 600 °C, aproximadamente, la cohesión de un concreto refractario se debe a los enlaces hidráulicos. Estos son proporcionados por los aluminatos de calcio hidratados y la bohemita o alúmina hidratada. Bajo el efecto de la temperatura se ayuda a la partida de los radicales hidróxilos acompañada de una disminución de las resistencias mecánicas.

Después de la partida del agua se reencuentran los aluminatos de calcio nativos y microcristalinos. Estos microcristales, de gran reactividad, experimentan rápidamente un crecimiento en sus dimensiones. Esta recrystalización es el origen de la cohesión en el campo de las temperaturas medianas. Para aumentar al máximo este tipo de enlaces, conviene utilizar un agregado que tenga un coeficiente de dilatación lo más reducido posible. Esto evita las discordancias dilatométricas que generalmente son las responsables de una debilitación del aguate mecánico.

A partir de 1000 - 1100 °C, da comienzo la sinterización, reacción entre los componentes del cemento y las fracciones finas del agregado. Esta sinterización va acompañada, sin embargo, de un descenso de la resistencia en caliente debido a la fluencia plástica. Después, cuando tiene lugar el segundo aumento de la temperatura el revestimiento del concreto refractario queda estabilizado.

Los concretos refractarios son adecuados para resistir los esfuerzos de compresión, choques y abrasión. La elección de los agregados tiene su importancia, pero sobre todo la tecnología que permite la construcción por elementos monolíticos es favorable para el buen comportamiento del concreto.

Al igual que los demás materiales refractarios, los concretos refractarios están sometidos a requerimientos de origen termo-dilatométrico. Estas acciones se absorben macroscópicamente por las juntas de dilatación y por la resistencia propia del material en su estado de rigidez. En este caso un concreto en masa no se distingue de un refractario moldeado en lo que concierne a la zona sinterizada. Por el contrario, el corazón de un revestimiento de un concreto refractario puede ser menos rígido que el de un ladrillo, lo cual permite la absorción de determinadas sollicitaciones.

En la construcción de un horno de concreto refractario es necesario prever juntas de dilatación, en atención por una parte, de los coeficientes de dilatación y por otra de la post-contracción que eventualmente se pone de manifiesto al término del primer calentamiento. Es éste el caso de que en los concretos de cemento aluminoso con 40% de alúmina y chamota y los de cemento aluminoso con 70% de alúmina y gibbsita, la dilatación media en la zona de las temperaturas de funcionamiento, compensa aproximadamente la contracción debida a la cocción, de ahí el interés de dejar juntas en seco.

En numerosos casos, el revestimiento refractario deberá resistir la acción conjugada de estos ataques. Más, no existen refractarios absolutos frente a estas diversas agresiones. En consecuencia, la selección del tipo de refractario que en definitiva se adopte, será un compromiso que tenga en cuenta los diversos aspectos del problema que debe resolverse.

## VII. APLICACIONES

Los concretos poseen innumerables aplicaciones en ingeniería; uno de los principales es como revestimiento refractario en condiciones severas de servicio a altas temperaturas. En tal sentido las operaciones de aplicación deben desarrollarse con ciertos cuidados.

Es así que una vez culminada la mezcla de concreto y retirada toda la masa dentro del equipo mezclador, el material debe ser transportado al lugar de aplicación en el menor tiempo posible. De esta manera se evita que ocurran planos de laminación en el revestimiento durante la aplicación. La alimentación sobre los moldes debe ser continua y en forma programada, teniendo un número determinado de mezcladores, controlando tiempos, etc.

Los equipos para el traslado, tales como latas, baldes, carretillas, etc., deben estar limpios y serán humedecidos para evitar que la masa se impregne en sus paredes y por tanto dificultando el retiro de la misma. Cuando se utilice carretillas, el volumen de concreto a cargar no debe ser muy grande, ya que podría densificarse muy rápido durante el transporte.

### 7.1 Preparativos antes de la aplicación.

Antes de realizar la aplicación del concreto deben tenerse en cuenta los siguientes factores:

- Condiciones de trabajo
- Anclajes
- Juntas de dilatación
- Encofrados
- Equipos utilizados
- Adición del agua

#### 7.1.1 Condiciones de Trabajo.

Las condiciones ambientales afectan sensiblemente la calidad final del producto aplicado. Por tanto, el proceso de fabricación deberá realizarse preferentemente en un lugar cubierto, evitándose también temperaturas extremas dentro del local.

Al sacar los concretos refractarios, principalmente los de bajo contenido de cemento y los ultra bajo contenido de cemento, no deben quedar expuestos al sol o el calor, pues dependen de la temperatura de masa, debido a la degeneración de los aditivos.

#### 7.1.2 Anclajes.

Se entiende por anclaje, todo soporte adecuadamente dimensionado, que tiene la finalidad de asegurar la estabilidad del conjunto.

Siempre que haya necesidad de ejecutarse una estructura monolítica deben tomarse cuidados especiales con relación a su estabilidad, sea por la geometría de sus formas o por la posición en que se encuentra, o por las proporciones de área a ser revestidas. Esta estabilidad es conseguida a través de un sistema de anclajes.

De esta forma, se debe dimensionar un sistema adecuado de anclajes, que en caso de los productos moldeables son indispensables. Estos pueden ser metálicos o cerámicos.

Los anclajes metálicos, normalmente son de acero fundido o laminados, cuya selección está en función de la aplicación a la cual se destina. Normalmente son especificados anclajes metálicos para espesores de revestimientos inferiores a 250 mm., y que la calidad de acero a ser empleado está en función a la temperatura de interface anclaje-concreto durante la operación.

Son varios los tipos de acero recomendados, de acuerdo con los rangos de temperaturas máximas de uso (ver cuadro N° 14)

Cuadro N° 14: Tipos de acero para anclaje según temperatura de trabajo

TEMPERATURA (°C)	TIPO DE ACERO
Hasta 600	Carbono
Hasta 760	Inox. AISI 304
Hasta 930	Inox. AISI 309
Hasta 1010	Inox. AISI 310
Hasta 1200	Inconel/Incoloy

Cuando se opera un equipo en atmósfera oxidante, se utiliza siempre acero inoxidable. La oxidación del acero ocurre con expansión volumétrica, lo cual provoca fractura en el revestimiento refractario, así como también el acero pierde ductibilidad y resistencia mecánica.

En relación a la altura de los anclajes metálicos, esta debe variar de  $2/3$  a  $3/4$  de espesor para los concretos convencionales y de  $1/2$  a  $2/3$  para los concretos de bajo y ultra bajo contenido de cemento, dependiendo de las características operacionales a que estos refractarios estarán sujetos en uso. Para el espaciamiento, se debe tomar en cuenta el lugar donde será aplicado el concreto.

Como regla general tenemos:

Local	Espesor de revestimiento	Espaciamiento
Techos y Paredes	50 a 250 mm.	150 a 300 mm.
Pisos	50 a 250 mm.	200 a 600 mm.

Los anclajes cerámicos son recomendados para espesores de revestimiento refractario superiores a 250 mm. y para lugares donde la temperatura de operación en la interface anclaje/concreto sea superior a los 1200 °C. En relación al espaciamiento de éstos anclajes, ellos están en función de la posición (paredes y techos), forma, espesor y de su función estructural para cada caso en particular.

### 7.1.3 Juntas de Dilatación.

Siempre que se construya una estructura monolítica se debe prever juntas que absorban las dilataciones del concreto cuando es sometido a variaciones de temperatura. Estas juntas deben estar constituidas de materiales combustibles a baja temperatura o de materiales incombustibles que sean compresibles, y no deben tener espesores superiores a 5 mm., debiendo estar espaciados y dimensionados de acuerdo con el área a ser revestida y a la dilatación térmica lineal de cada producto. No se recomienda la utilización de aceites, grasa o asfaltos para las juntas de dilatación, en función de la facilidad de interacción con el concreto y también de la facilidad de remoción durante la fabricación.

Otro detalle a observar, es que las juntas no se prolonguen por todo el espesor del revestimiento, más aún sin desfases en su mitad. Para el caso de paredes compuestas (concreto aislante + concreto refractario) las juntas deben ser desalineadas.

Los bloques de concreto no deben tener áreas superiores a  $1 \text{ m}^2$ . Para quemadores metálicos que están sometidos a altas temperaturas y que serán revestidos con concretos, observar la dilatación del tubo de acero en los sentidos axial y radial.

#### 7.1.4 Encofrados.

De manera general, los encofrados son confeccionados en madera o planchas de acero.

Con relación a encofrados metálicos, para su adecuado uso, estos deben estar exentos de restos de fierro. Se recomienda pintar la fase que estará en contacto con el concreto y asimismo para facilidad de desencofrado es recomendable aplicar una fina capa de desmoldante (ejemplo: aceite).

Cuando se utiliza madera en la confección de encofrados de uso esporádico, se debe emplear madera de buena calidad e impermeabilizarlas, tratando de minimizar la absorción de agua que es necesaria en la reacción del concreto. En la no posibilidad de usar una madera adecuada, se debe inspeccionar el molde en sus dimensiones y verificar posibles discontinuidades. La madera debe ser humedecida antes de usarla. También en este caso es necesario la aplicación de un desmoldante. En situaciones que se desea una superficie lisa (porosidad superficial baja), se debe utilizar un film plástico (polietileno) en la interfase concreto/molde.

#### 7.1.5 Equipos utilizados.

Entre los equipos de mayor uso, podemos citar los siguientes:

- Mezcladores
- Vibradores
- Máquinas de proyección

### A. Mezcladores

El uso de este equipo se hace necesario por la necesidad de homogenizar la mezcla de los concretos refractarios. Normalmente son provistos de paletas, debiendo trabajar en régimen de flujo forzado, compuesto de una cuba mayor a 200 litros, y en la mayoría de los casos la descarga se realiza por la parte inferior, a través de un falso fondo.

La mayor característica de este equipo es la rotación, pues ésta no debe centrifugar la mezcla.

Durante la mezcla es importante observar que toda vez que se reinicie una nueva operación, el equipo deberá estar completamente limpio. Existen ciertos elementos que interfieren en la fragua de los concretos refractarios, como el cemento Portland y la cal.

Entre las operaciones de mezcla, se debe retirar los residuos de producto, ya que estos, en estado húmedo, con el discurrir del tiempo inician su fragua y pueden contaminar las mezclas subsiguientes. El cemento de aluminatos de calcio húmedo también actúa como acelerante de la fragua. Y en caso de residuos secos, estos pueden dificultar la mezcla al absorber la cantidad de agua necesaria, principalmente en los concretos de bajo y ultra bajo cemento.

Mezcladores específicos fueron desarrollados para la aplicación de concretos refractarios de bajo contenido de cemento, del tipo flujo forzado de alta intensidad con eje horizontal y con capacidad de mezcla de hasta 200 kilos por tanda.

Se ha observado que los carritos mezcladores comunes no son adecuados para la mezcla de concretos refractarios. Cuando no se dispone de un mezclador, recomendamos mezclar manualmente en cantidades máximas de 100 kilos, con una herramienta adecuada, consultando previamente al fabricante del producto, ya que existen casos de concretos que no desarrollan una fluidez adecuada para su aplicación.

### B. Vibradores

La operación de densificación debe ser realizada, siempre que sea posible, utilizando vibradores de barras de inmersión, para así obtener una máxima densificación de la masa.



Tanto como sea posible, debe realizarse una distribución rigurosa de la masa, para que se acomode totalmente y no deje vacíos. Para eso es necesario una cantidad adicional de agua para que el concreto sea lo suficientemente fluido, teniendo presente que se pierde algunas unidades de resistencia mecánica al adicionar más agua.

Cuando se propone realizar una densificación con equipo vibrador, se deben tomar algunos cuidados en relación a la selección de los mismos, ya que existe una gran diferencia en la utilización de vibradores de alta o baja frecuencia. Un vibrador considerado de baja frecuencia tiene un rango de 8,000 vibraciones por minuto y son recomendados para aplicaciones de los concretos convencionales. Su accionamiento normalmente es hecho por un motor eléctrico.

En cambio los vibradores de alta frecuencia funcionan con un rango de 16,000 a 20,000 vibraciones por minuto. Son vibradores neumáticos, consumiendo un promedio de 1 m<sup>3</sup>/minuto de aire a una presión de 7 Kg/cm<sup>2</sup>, siendo estos vibradores los recomendados para la aplicación de los concretos de bajo y ultra bajo contenido de cemento.

La diferencia primordial está en la amplitud de ondas generadas por los equipos. Cuanto mayor la amplitud de onda, mayor será la actuación ejercida sobre los granos mayores de los agregados, pudiendo causar ligera segregación del material si el operador es inexperto.

No se recomienda la utilización de vibradores eléctricos para la aplicación de los concretos con bajo y ultra bajo cemento.

Los dos tipos de vibradores pueden ser encontrados con diámetros que varían de 25 a 75 mm., teniendo en cuenta que cuanto mayor es el diámetro, mayor será el área cubierta por las ondas generadas.

### C. Máquinas de proyección

Este tipo de equipos será detallado en el punto 7.2, métodos de aplicación.

Los tipos de máquinas de proyección se caracterizan por tener:

- alimentación por gravedad y seca
- alimentación forzada y seca
- alimentación forzada y húmeda.

### 7.1.6 Adición de agua.

La cantidad de agua recomendada por el fabricante deberá ser respetada, ya que ella influye directamente sobre las características físicas y la trabajabilidad necesaria para su aplicación.

Una dosificación inadecuada del agua conllevará a resultados totalmente indeseados. Por ejemplo, si el agua es insuficiente para hidratar todo el cemento contenido en el concreto, el producto no logrará su resistencia máxima. Esta insuficiencia puede tener su origen en el momento de la adición del agua o debido a una rápida evaporación (en lugares de alta temperatura o con vientos muy fuertes) o por absorción a través de los encofrados.

Normalmente el aplicador siempre trabaja con exceso de agua, por una razón muy simple: aumenta la fluidez de la masa, como consecuencia necesitará menor esfuerzo físico durante la aplicación. Debido a este hecho, se recomienda utilizar un recipiente graduado para la medición del agua, ya que los concretos refractarios de bajo y ultra bajo cemento son más sensibles a la dosificación del agua que los concretos convencionales.

Para que se obtenga buenos resultados, utilizar agua potable y fresca con la medida exacta a ser distribuida en un mezclador.

Tener presente que el tiempo de secado es directamente proporcional a la cantidad de agua utilizada en la mezcla.

Los concretos refractarios presentan tiempos de fragua muy cortos, son comparables a los concretos estructurales que utilizan cemento Portland. Como consecuencia el tiempo de mezcla para los concretos refractarios debe ser de 3 a 8 minutos en un equipo mezclador mecánico.

Un tiempo de mezcla adicional, trae como consecuencia que el cemento pierda sus propiedades ligantes o aún más que el material pierda su trabajabilidad.

En el caso de concretos aislantes, los granos van a ser molidos durante este tiempo adicional de mezcla, con el consecuente decrecimiento de su poder aislante y para las mezclas que ya contienen fibras de acero inoxidable, éste tiempo de mezcla adicional puede segregar las fibras alterando las características finas del producto.

## 7.2 Métodos de aplicación.

A continuación se detallará los métodos de aplicación más comunes:

- Proyectados manualmente
- Compactados manualmente
- Compactados neumáticamente
- Inyectados
- Vibrados / Vertidos
- Proyectados neumáticamente / Gunitados

### 7.2.1 Proyectados manualmente.

Llamados comunmente "tarrajeo". El material es lanzado manualmente con la ayuda de una espátula sobre la superficie a ser revestida, para luego ser alineada y dar acabado superficial.

Para su aplicación, estos materiales deben poseer alta plasticidad y son recomendados en lugares de difícil acceso, donde los espacios son muy pequeños, o donde no sea posible aplicar otro método.

Para los concretos de bajo y ultra bajo contenido de cemento no se recomienda utilizar este método.

### 7.2.2 Compactados manualmente.

Este tipo de aplicación es poco utilizada en los concretos convencionales, tan sólo cuando es necesario por tener lugares de difícil de acceso y superficies delgadas, con espesores menores a 50 mm.

Es requerido cuando se necesita concretos con fragua química y con elevada resistencia a la erosión y temperaturas intermedias de 600 a 1100 °C, por ejemplo la industria petroquímica.

Normalmente son utilizados mallas hexagonales en acero inoxidable, y con la masa de concreto se forman pequeñas bolas (+/- 25 mm. de diámetro), las cuales son introducidas entre las celdas y en seguida son compactadas con la ayuda de un martillo de caucho. El exceso de material es retirado dejando una superficie de malla expuesta.

Esta técnica es muy utilizada en la aplicación de concretos refractarios aislantes a base de vermiculita. El presente método tampoco es recomendado en la aplicación de concretos de bajo y ultra bajo cemento.

#### 7.2.3 Compactados neumáticamente.

Este método es también poco utilizado. Normalmente es empleado para la aplicación de concretos refractarios con fragua química, con superficies curvas o revestimientos delgados (ejemplo: quemadores). El llenado es realizado con auxilio de martillos neumáticos y también requieren mucha experiencia de parte del aplicador. Los concretos de bajo y ultra bajo cemento no se adaptan a este método.

#### 7.2.4 Inyectados.

Se refiere al mismo método utilizado en los concretos de obras civiles, los cuales son aplicados con el auxilio de una bomba. Esta práctica no está muy difundida, pero es bastante utilizada por los responsables del mantenimiento refractario de los altos hornos. Se emplea esta técnica de inyección de concreto en ciertas regiones de equipos para prolongar la vida útil de los revestimientos.

En este tipo de aplicación es importante tomar en cuenta la reología del concreto, una buena alimentación de la bomba y el transporte de la masa de concreto a través de las mangueras de caucho.

#### 7.2.5 Vibrados o Vertidos.

Es el método más utilizado para la fabricación de bloques monolíticos.

Después del vaciado de la masa de concreto en el molde, se coloca el vibrador de forma perpendicular a la superficie y se comienza a vibrar de abajo hacia arriba, manteniendo el mismo de tal modo que permanezca el mayor tiempo posible sumergido en la mezcla. El vibrador debe actuar a intervalos de +/- 200 mm. (normalmente varía en función de la distancia entre anclajes y del área a ser revestida) y la vibración debe continuar hasta que el concreto adopte una densidad uniforme.

Durante la vibración pueden notarse excesos de agua, a través del afloramiento del agua en la superficie. En este caso debe reducirse el tiempo de vibración a fin de que la masa de concreto no segregue.

Una vez iniciado el proceso de vibración, éste no debe ser interrumpido hasta que se complete una sección entera del encofrado y es imperativo que el proceso total de concretado termine antes que cualquier parte de la masa inicie su fragua. Se pueden usar retardadores de fragua, caso de piezas de gran tamaño, secciones complejas, etc.

Durante la vibración la superficie del concreto se acomoda horizontalmente y si se desea obtener una cierta forma curva en la superficie (caso de revestimientos cilíndricos), los concretos convencionales permiten que esto sea realizado colocando el vibrador en forma horizontal y moviendo el concreto en la dirección deseada. Es importante la experiencia del aplicador, para evitar que ocurran planos de laminación.

Otro punto importante a tener en cuenta es la forma como se va retirando el vibrador, el cual debe tener un movimiento constante dentro de la masa de concreto (de abajo hacia arriba) y sacado en forma lenta, principalmente en los concretos de bajo y ultra bajo contenido de cemento para que no aparezcan bolsas de aire internas que provocarían altas presiones de vapor durante el calentamiento del concreto.

#### 7.2.6 Proyección neumática o Gunita.

Es una forma práctica y eficiente de aplicación para un concreto refractario, los cuales, generalmente presentarán características físicas superiores a los que son moldeados (una densidad aparente regularmente superior de 1 a 5%, un módulo de ruptura superior en aproximadamente 50% y una resistencia a la compresión mayor al 100%). Una de las grandes ventajas de este método es la posibilidad de realizar reparaciones en caliente.

Existen tres tipos de equipos para el proceso de gunitado: en seco con alimentación por gravedad, en seco con alimentación forzada y húmedo.

En los equipos más modernos, el material es pre-humedecido con un contenido de agua del 3 al 10%, para que no se pierda parte del cemento y evitar la formación de polvo. El restante del agua es incorporado al producto durante la aplicación.

El concreto es disparado contra la pared por un chorro de aire y debido al gran impacto del producto contra la superficie, una parte rebota y cae. El material que rebotó debe desecharse ya que ha sufrido una separación granulométrica y a su vez ya deben haber iniciado su tiempo de fragua. El índice de rebote debe ser el menor posible y varía en función de la experiencia del aplicador, del tipo de equipo utilizado, de la posición de la superficie a ser revestida y de la propia granulometría del concreto. Las pérdidas por rebote oscilan generalmente del 30 al 35% para aplicaciones sobre paredes verticales y pueden llegar al 50% en aplicaciones sobre cabeza (techos).

La calidad final de la aplicación está directamente relacionada con la experiencia del aplicador, la presión del aire utilizado, la cantidad de agua proveída en el pico de la boquilla, la fluidez de la masa, la distancia del equipo al lugar de aplicación y la distancia de la boquilla a la superficie de revestimiento.

Este método está bastante difundido y existen varios tipos de boquillas, que en conjunto con la experiencia del aplicador hacen que no sea necesario la operación de acabado superficial. Y en caso de ser necesario, debe utilizarse una regla de madera o metálica.

Algunos tipos de concretos refractarios aislantes están sujetos a variables excesivas de densidad cuando son aplicados por gunitado. El aumento de la densidad causa un consumo extra de materiales para un volumen dado y un aumento en la conductividad térmica, afectando directamente en el producto final de revestimiento.

Las experiencias muestran que el factor más importante para un gunitado de concretos refractarios aislantes es la manera como se incorpora el agua, así como la cantidad total de masa en la mezcla. El pre-humedecimiento es también considerado como uno de los factores importantes.

Este método es muy utilizado en la industria siderúrgica, en las reparaciones de las cucharas de acero y en las puertas de alimentación de los carros torpedos.

### 7.3 Referencias de aplicación.

Los refractarios de aluminatos de calcio satisfacen a gran parte de las exigencias demandadas en las industrias con operaciones a altas temperaturas. Las propiedades especiales de estos materiales así lo determinan, otorgando ventajas en numerosas aplicaciones, entre las cuales se pueden destacar construcciones de muros, bóvedas, tolvas, ciclones, piqueras para los quemadores, bloques quemadores, toberas, salidas de humos, pisos alrededor de las puertas de los hornos, rampas de coque, incineradores, revestimientos, etc.

Como una referencia de aplicación se presenta el caso de un revestimiento refractario en las vagonetas para horno túnel de una fábrica de ladrillos comunes.

Asimismo se da una breve descripción de referencias de aplicación de concretos de aluminatos de calcio en:

- Piso en alto horno
- Rampa de descarga de coque
- Almacén de escorias

#### 7.3.1 Vagonetas para horno túnel.

A. Importancia y antecedentes: La calidad de la plataforma de las vagonetas determina el buen funcionamiento del horno. El revestimiento refractario de las plataformas está expuesto directamente dentro de los “recintos de combustión” a la llama de los quemadores de combustible pesado y a las cenizas fusibles de determinados carbones; los quemadores laterales ejercen una acción pirogénica más intensa que los quemadores situados en la bóveda. La acumulación de residuos y de polvo entre las juntas ha sido una de las causas por la que se produzcan dislocaciones en la plataforma.

B. Partes refractarias de la vagoneta: El revestimiento de concreto refractario de una vagoneta puede descomponerse en tres partes, cada una de las cuales juega un papel específico:

- el entorno refractario: constituye el cinturón sólido de la vagoneta que incrementa la rigidez del chasis o bastidor; sirve también para soportar la plataforma y alberga el relleno interior;
- la sub-base o base de apoyo aislante: protege el bastidor y las ruedas metálicas del calor del horno;
- la plataforma refractaria: está destinada, dado su carácter plano, a asegurar la estabilidad y regularidad del empilado. Casi siempre se compone de losas refractarias prefabricadas, que descansan sobre la sub-base de apoyo y el entorno.

C. Selección del tipo de refractario: La escasa dilatación del concreto refractario permite obtener bloques de grandes dimensiones con un mínimo de juntas y realizar revestimientos que sean adecuados para resistir la acción del polvo y de la arena durante la carga del horno. Las buenas características de los refractarios de aluminatos de calcio permitieron que éstos se impusieran, sin argumento alguno en contra, para el revestimiento de las vagonetas para horno túnel. La extraordinaria resistencia del concreto a las variaciones bruscas de temperatura, la diversidad de agregados de que se dispone y la comodidad que representa poder variar la proporción de cemento en función del objetivo que se persigue, hicieron del concreto refractario un material que se adapte al esfuerzo mecánico, al aislamiento térmico y a la estanqueidad de las vagonetas.

D. Diseño de aplicación: De hecho, la excelente resistencia de un concreto refractario a los cambios bruscos de temperatura, hace posible que las vagonetas puedan resistir los frecuentes y repetidos ciclos de pasada por el horno túnel, sin deterioro importante del revestimiento. Para cada parte de la vagoneta se recomendó:

- Entorno refractario: Cemento con 40% de alúmina y chamota.

La chamota es el agregado más indicado para la mezcla con el cemento aluminoso. Se indicó que mientras las cargas de material no sean muy altas puede sustituirse la chamota por ladrillos machacados, haciendo la salvedad que esta



sustitución conduce a unos resultados que son en detrimento de la calidad del revestimiento. Se seleccionó la chamota.

La composición de diseño para 1 metro cúbico se muestra en el cuadro N° 15.

Cuadro N° 15: Composición de diseño cemento aluminoso-chamota

Producto	Cantidad
Cemento aluminoso	400 Kg
Chamota de 0 a 0.2 mm.	175 l.
Chamota de 0.2 a 2 mm.	390 l.
Chamota de 2 a 5 mm.	320 l.
Chamota de 5 a 10 mm.	365 l.

- Sub-base aislante: Concreto de cemento con 40% de alúmina y ladrillos machacados de 38% de alúmina. Se recomendó utilizar vermiculita como agregado con el cemento aluminoso, debido a su densidad y a su conductividad térmica que son muy reducidas, o de lo contrario algún otro agregado ligero, tal como la perlita, la arcilla expandida, la puzolana o la chamota expandida. Por razones logísticas se seleccionó los ladrillos machacados de 38% de alúmina. Igualmente se planteó disponer un aislamiento en dos capas: una capa a base de cemento aluminoso/vermiculita y una capa intermedia menos aislante pero más resistente de cemento aluminoso/chamota expandida o puzolana.

La composición de diseño para 1 metro cúbico consistió de cemento aluminoso (350 Kg.); Vermiculita de 0 a 1 mm.(750 l.) y Vermiculita de 3 a 8 mm.(750 l.)

- Plataforma refractaria: Cemento con 50% de alúmina y chamota. Para la confección de las losas de la plataforma, resultó mejor prefabricarlas; en general una chamota con el 40% de alúmina, igual que para el entorno refractario, es el mejor de los agregados que puede asociarse al cemento aluminoso, atendiendo especialmente a las características dilatómicas del concreto que se obtiene.

E. Resultados: la duración de las vagonetas se incrementó en más del 20% comparado con los refractarios fabricados anteriormente. Las vagonetas resistieron en promedio 360 pasos de cocción por el horno túnel con una temperatura promedio de 960 °C.

Asimismo, para la plataforma refractaria se recomendó el uso del agregado sintético Alag, de gran dureza y notable afinidad química con el cemento aluminoso. Los resultados fueron mucho mejores al incrementarse a 400 pasos de cocción por el horno túnel. Se comprobó que la durabilidad de estos concretos refractarios resultó ser superior a la de los productos preformados.

### 7.3.2 Piso en alto horno.

Reparación del piso de un alto horno con concreto de cemento y agregados de aluminatos de calcio para resistir las proyecciones de fundición, resistir las radiaciones de calor y soportar la circulación de equipos mecánicos muy pesados. Este piso era reparado continuamente con ladrillos preformados, conllevando a tiempos de mantenimiento largos, riesgos para el personal que trabaja en dichas áreas y costos de reparación continuos. La aplicación del concreto resultó óptima, duplicando los tiempos de durabilidad y permitiendo poner en servicio la zona aplicada en muy corto tiempo (ver figura N° 10).



Figura N° 10: Piso en alto horno

### 7.3.3 Rampa de descarga de coque.

Rampa de descarga de coque caliente de una batería de hornos de empresa siderúrgica, a una temperatura promedio de 900 °C.

La rampa es de concreto de aluminatos de calcio, resiste perfectamente los choques térmicos y la abrasión, a su vez asegura la conservación de una superficie plana.

Inicialmente en esta zona eran instalados ladrillos refractarios, los cuales no resistían el lanzamiento de coque ardiendo, provocando desgastes superficiales que entorpecían el deslizamiento libre del coque (ver figura N° 11).



Figura N° 11: Rampa de descarga de coque

#### 7.3.4 Almacén de escorias.

Una de las aplicaciones del concreto de aluminatos de calcio se realizó para el revestimiento de paredes y pisos de las zonas de almacenamiento de escoria y metales incandescentes, que están sometidos a temperaturas de 1000 °C y tienen que resistir severos ataques mecánicos por la descarga y remoción de estos materiales con maquinaria pesada (ver figura N° 12).



Figura N° 12: Almacén de escorias

## VIII. CURADO, SECADO Y SINTERIZACION

### 8.1 Curado.

Durante la fabricación de los concretos refractarios, éstos liberan calor, reacción exotérmica, como consecuencia de reacciones de hidratación que ocurren durante la fragua y curado de los mismos.

No se debe confundir la fragua con el curado, pues la fragua es una reacción de endurecimiento inicial, que ocurre normalmente en los primeros 60 minutos después de haber agregado el agua en el concreto. Por tanto la fragua es la reacción inicial de la fase del curado.

El curado es el periodo en el cual ocurren una secuencia de reacciones químicas, otorgando al producto sus características físicas en frío. Estas reacciones son lentas y necesitan de por lo menos 24 horas para ser completadas.

Para que el curado se procese normalmente, debe considerarse dos parámetros principales: la temperatura y el tiempo.

De acuerdo a la cantidad de cemento utilizado para la fabricación del concreto, las reacciones exotérmicas (30 minutos después de agregar el agua) pueden lograr temperaturas superiores a los 70 °C y que también está influenciado por la reactividad del producto, por la temperatura ambiente y del agua, del área a concretar y del volumen aplicado.

La experiencia ha demostrado que temperaturas mayores a los 70 °C son perjudiciales para las características de los concretos. Por tanto se recomienda que la temperatura en el concreto no sea mayor a los 50 °C durante esta fase. Y esto puede conseguirse esparciendo agua sobre la superficie del concreto o aplicando resinas que formen una membrana impermeable y así se evite la evaporación. También puede optarse por cubrir la superficie con sacos húmedos de tela, o con una capa de arena húmeda o también con un plástico (polietileno).

Lo importante es que el concreto se mantenga húmedo durante el curado. Nunca se debe disminuir el tiempo de curado (ocurrencia de reacciones lentas) porque de lo contrario los valores de resistencia mecánica sufrirán sensibles reducciones.

Cuando nos encontramos con bajas temperaturas ambiente, el calor desprendido puede ser perdido a través de radiación. En este caso la masa ahora parece haber

endurecido, pero en verdad lo que ocurre es que la masa posee consistencia, pero el desarrollo de su resistencia mecánica está retardado. A temperaturas de 0 °C las reacciones de hidratación ocurren muy lentamente. Si el agua libre se congela dentro de la masa entonces la reacción de hidratación queda interrumpida y asimismo se perderá resistencia inmediatamente cuando se descongele el hielo formado.

En función de los cambios de estado del agua habrá variaciones volumétricas que causarán que la solidez del concreto sea quebrada y por tanto reducción de la resistencia mecánica.

Otro punto importante a mencionarse es que cuando las operaciones de aplicación y curado del concreto se realizan a temperaturas bajas (< 20 °C), éstos son más susceptibles a "explosión" durante las operaciones secado-calentamiento que se dan entre 300 - 600 °C.

## 8.2 Secado.

Cuando los concretos refractarios son mezclados con el agua, una parte es consumida por la hidratación del cemento aluminoso, agua combinada, y el restante es para atender la fluidez-trabajabilidad necesaria para la aplicación, agua libre.

Normalmente es el agua libre la que es eliminada durante el secado. Esta agua puede ser retirada totalmente a la temperatura de 110 °C, en un tiempo predeterminado, el cual está en función del tipo de concreto, espesor de revestimiento y volumen aplicado. Cuanto mayor sea el espesor de revestimiento y menor fuese la porosidad, entonces mayor será el requerimiento de temperatura (> 110 °C), ya que el agua es eliminada en forma de vapor por los poros o capilares del concreto.

En el caso de que la velocidad de calentamiento sea muy rápido, entonces se formarán volúmenes considerables de vapor al no tener tiempo suficiente para migrar, creando bolsas con altas presiones de vapor que pueden provocar explosiones y serios daños al revestimiento.

Para evitar este problema, deben seguirse las instrucciones de los fabricantes quienes poseen las curvas de secado-sinterización para sus productos.

Después de pasar la temperatura inicial de 110 °C , se debe elevar la temperatura en rangos de 30-50 °C/hora, hasta lograr los 600 °C, donde ocurre la eliminación del agua combinada (agua de cristalización).

En seguida se vuelve a elevar la temperatura en rangos de 50 - 100 °C hasta lograr los 900 - 1000 °C, donde se inicia la sinterización del producto. A esta temperatura el agua combinada ya debe haber sido eliminada totalmente.

Para los concretos de bajo y ultra bajo contenido de cemento, es necesario una etapa adicional de secado, que es aproximadamente a los 350 °C.

### 8.3 Sinterización.

Esta es la última fase de la instalación de los productos no moldeados.

Durante la sinterización los enlaces hidráulicos-químicos, que darán cierta resistencia al concreto, son sustituidos por el enlace cerámico, el cual confiere a los productos sus características finales. Este fenómeno se procesa en rangos de 900 a 1400 °C, dependiendo del producto utilizado.

## IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los concretos refractarios permiten construcciones monolíticas estables, sean de formas simples o de formas complejas, reemplazando a las piezas preformadas y ladrillos.
2. El no tener cuidados indispensables en la preparación, aplicación, curado y calentamiento de un refractario, pueden transformar una ventajosa opción en desastrosos perjuicios.
3. Los diseños de mezcla en concreto son una herramienta para obtener un refractario de calidad, pero finalmente el criterio personal es el determinante para lograrlo, basados en el conocimiento técnico y experiencia en obra.
4. La técnica de aplicar el concreto por proyección está tecnificándose e incrementando su uso, permitiendo realizar obras que son de elevado grado de dificultad por los procesos convencionales.
5. Las ventajas de los cementos de aluminatos de calcio en aplicaciones refractarias son también ventajas en aplicaciones de obras civiles, como son la resistencia a la abrasión, al desgaste, a los choques mecánicos, endurecimiento rápido, altas resistencias en corto tiempo, etc.
6. La resistencia a los ataques químicos de los concretos a base de cemento aluminoso se debe principalmente a la constitución química del cemento, cuyo componente principal es el aluminato monocálcico, el cual en su hidratación forma aluminatos de cal hidratados sin que aparezca cal libre en su fase sólida.
7. Frente a distintos mecanismos de ataque químico y por mayor resistencia a los choques térmicos se recomienda una selección del tipo de agregado a ser mezclado con el cemento aluminoso, para obtener un concreto compacto e



impermeable que sea resistente y durable. Mezclas con agregados aluminosos ofrecen mejores soluciones.

8. Los concretos de cemento aluminoso con agregados de aluminatos de calcio también presentan una buena durabilidad ante condiciones severas de abrasión, esto es atribuible a que el cemento y los agregados tienen las mismas características físicas y mineralógicas, creando un doble vínculo entre ellos: un enlace físico común a todos los cementos, y un enlace químico alrededor de la superficie de los agregados.
9. Como resultado de las características propias de los concretos refractarios se logra una mejora económica en los siguientes aspectos:
  - reducción de un 15 – 30% en el costo de la construcción;
  - economía en el almacenaje al tener una gran disminución de stocks de materiales preformados (capital inmovilizado);
  - simplificación de la puesta en obra, reparaciones en corto tiempo sin paradas inútiles.
10. Sólo con un profundo conocimiento de las ventajas y desventajas de los diversos materiales refractarios y de los parámetros de operación, se podrá obtener rendimientos óptimos en los revestimientos refractarios.

## X. BIBLIOGRAFIA

1. Harbison-Walker, Modern Refractory Practice, tercera edición, USA, 1950.
2. Singer F.-Domínguez J., Cerámica Industrial, primera edición, Editorial URMO S.A., España, 1976
3. Midgley H., The chemical resistance of high alumina cement concrete, Séptimo Congreso Internacional de la química del cemento, París, 1980
4. Pollman H., Mineralogy and crystal chemistry of calcium aluminate cement, International Conference on Calcium Aluminate Cements, Londres, 2001
5. Baron J.-Olliver J., The durability of concrete, Reproduced from the collection published by the French Association of Hydraulic Binder Industry, Francia, 1997
6. Cuevas G.-Evangelista P., Calcium Aluminate Cement concrete with Calcium Aggregates, ALAFAR, 1997
7. Parr C.-Bier T.-Bunt N., Calcium Aluminate Cement based castables for demanding applications, Primera Conferencia de Monolíticos, Tehran, 1997
8. Boch P.-Masse S., Calcium Aluminate Cement in Refractory Applications, International Conference on Calcium Aluminate Cements, Londres, 2001
9. Fichas y Boletines Técnicos editados por Lafarge Aluminates.