



**MINISTERIO DE LA EDUCACION SUPERIOR**  
**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA**  
**“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”**  
**FACULTAD METALURGIA y ELECTROMECAÁNICA**  
**Departamento Metalurgia**

# **Trabajo de Diploma**

En opción al título de Ingeniero Metalúrgico.

**EVALUACION DE LAS TECNOLOGIAS DE PRODUCCION DE  
CEMENTO.**

**Autor: Peter Lokolimoe**

**Tutor: Dr.C. Eulícer Fernández Maresma**

**Moa, Junio de 2009**

**“AÑO DEL 50 ANIVERSARIO DEL TRIUNFO DE LA REVOLUCION”**



**MINISTERIO DE LA EDUCACION SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA  
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”  
FACULTAD METALURGIA y ELECTROMECAÁNICA  
Departamento Metalurgia**

# **Trabajo de Diploma**

En opción al título de Ingeniero Metalúrgico.

**EVALUACION DE LAS TECNOLOGIAS DE PRODUCCION DE  
CEMENTO.**

**Autor: Peter Lokolimoe**

**Firma-----**

**Tutor: Dr.C. Eulícer Fernández Maresma**

**Firma-----**

**Moa, Junio de 2009**

**“AÑO DEL 50 ANIVERSARIO DEL TRIUNFO DE LA REVOLUCION”**

## Resumen

El presente trabajo esta relacionado con el cemento, en el primer capitulo se muestra la historia, caracterización, propiedades y tipos de cementos, además de sus aplicaciones. Posteriormente en el segundo capitulo se describen los tipos de materias primas a utilizar y los procesos tecnológicos (vía seca y vía húmeda) para obtener el producto deseado. En los procesos se describen la preparación de la materia prima proveniente de las canteras, la calcinación y la molienda que definirá la calidad del cemento.

En el capitulo tres se hace una comparación lógica desde el punto de vista técnico-económico de algunas de las operaciones fundamentales de la producción de cemento. Luego en el capitulo cuatro se hace un resumen sobre el impacto ambiental y la seguridad industrial en la industria del cemento, se presenta un esquema de captación de polvos y purificación de gases

Palabras claves.

Cemento, clínker, calcinación y molienda.

## **Abstract**

The present work is related with the cement, in the first chapter the history is shown, characterization, properties and types of cements, besides their applications. Later in the second chapter the types of matters are described the use and the technological processes (dry process and Wet process) to obtain the wanted product. In the processes are described the preparation of the matter it prevails coming from the quarries, the calcinations and the mill that will define the quality of the cement.

In the third Chapter a logical comparison is made from the technician-economic point of view of some of the fundamental operations of the cement production. Then in the fourth Chapter a summary is made about the environmental impact and the industrial security in the industry of cement, presents an outline reception of powders and purification of gases.

## **Keywords**

Cement, Clínker, Calcination, y Mill

## **Dedicatoria**

Este trabajo va dedicado a todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a mi formación como profesional.

En especial a mis padres Joseph Lokolimoe y Verónica Namoe que con su esfuerzo y dedicación hicieron posible la realización de este sueño.

A mis hermanos Loquang Tom, Lokuda Luke Lokwii, Lokolimoe Charles Omel y Arikwanga Richard Noon.

A todos los profesores que de una forma u otra me enseñaron y prepararon para enfrentar la vida.

A mis amigos por su apoyo y confianza depositada en mí.

A mis hermanas Nakuru Lily Rose, Napeyok Betty Paula, Eileen Lokolimoe Mariana Natyang, y Lokeris Partricha.

A todas mis familias que de una forma u otro fueron partícipes de mi formación.

A mis Profesores y Compañeros de estudio.

A todos ustedes **Muchas Gracias** por ayudarme acrecer.

## **Agradecimientos**

Agradezco la realización de este trabajo a:

A mis padres Joseph Lokolimoe y Verónica Namoe.

A mis hermanos Loquang Tom, Lokuda Luke Lokwii, Lokolimoe Charles Omel, y Arikwanga Richard Noon.

A mis hermanas Nakuru Lily Rose, Napeyok Betty Paula, Eileen Lokolimoe Mariana Natyang, y Lokeris Partricha.

A mi tutor Dr. C. Eulícer Fernández Maresma por hacer posible la realización de este trabajo brindándome siempre su ayuda incondicionalmente.

A mis compañeros de clases que siempre estuvieron presente en las mas difíciles situaciones que se presentaron a lo largo de estos 5 años.

Y en especial a esta Revolución tan grande que tenemos, que gracias a ella contamos con todos los medios necesarios para llegar a ser profesionales.

A todos los profesores que de una forma u otra me enseñaron y prepararon para enfrentar la vida.

## Índice.

<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
CAPITULO I .....	9
ANTECEDENTES.....	9
INTRODUCCION.....	9
Objetivo .....	10
Objetivos específicos.....	10
Tareas: .....	10
1.1 Estado del arte .....	10
1.2 Caracterización de la materia prima usada para el cemento.....	14
1.3 Propiedades del Cemento .....	15
1.3.1 Resistencia del cemento.....	15
1.4 Composición química del cemento.....	15
1.5 Tipos del cemento .....	17
1.5.1 Cemento Pórtland.....	17
1.5.2. Cemento puzolánico.....	23
1.5.3. Cemento aluminoso.....	24
1.5.3.1 Reacciones de hidratación del cemento aluminoso.....	25
1.5.4. Cemento siderúrgico (de alto horno).....	26
1.5.5. Aplicaciones del Cemento.....	26
Conclusiones Parciales.....	27
CAPITULO II .....	28
FUNDAMENTO TEORICO .....	28
Introducción.....	28
2.1 Tipos de materia prima para la producción de cemento.....	28

2.2 Toma de muestra .....	30
2.3 Tecnologías de la producción de cemento .....	30
2.3.1 Vía húmeda .....	30
2.3.2 Vía seca .....	31
2.4 Operaciones de preparación, calcinación y molienda .....	32
2.4.1 Preparación de la materia prima .....	32
2.4.2 Operación de Calcinación .....	32
2.4.2.1 Formación de aluminoferrito tetracálcico (C <sub>4</sub> AF) .....	34
2.4.2.2 Formación de aluminio tricalcico (C <sub>3</sub> A) .....	34
2.4.3 La molienda del producto calcinado .....	38
2.5. Descripción de los procesos de hidratación, fraguado y endurecimiento.	38
2.5.1 Proceso de Hidratación del cemento .....	39
2.5.2 Proceso de fraguado del cemento .....	39
2.5.3 Endurecimiento .....	39
Conclusiones parciales .....	40
CAPITULO III. ....	41
ANALISIS Y DISCUSION DE LAS TECNOLOGIAS DE PRODUCCION DEL CEMENTO.	41
Introducción .....	41
3.2 Resultados de la determinación de la calcinación .....	41
3.3 Resultados de la molienda del cemento .....	42
3.4 Propuesta de la dosificación de la materia prima para el cemento .....	43
CAPITULO IV .....	46
IMPACTO MEDIOAMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL .....	46
Introducción .....	46
4.1 Impacto medioambiental .....	46

4.1.1 Impacto medioambiental en la industria del cemento.....	47
4.1.1.1 Impactos negativos - Medidas de atenuación.....	47
4.1.1.2 Emisiones de partículas a la atmósfera .....	52
4.2.1 Uso de los hornos de cemento para reciclar o eliminar los desechos. ....	53
4.2.2 Combustibles Alternativos.....	53
4.2 Seguridad industrial.....	54
4.3 Propuesta de un esquema de captación de polvos y purificación de gases.	56
Conclusiones.....	58
Recomendaciones .....	59
Bibliografía.....	60

# CAPITULO I

## ANTECEDENTES

### INTRODUCCION

Desde el año 400 a.C los romanos ya usaban una ceniza volcánica llamada puzolana como cementante natural, proveniente del monte Vesubio. Vitruvius señala que para fabricar el mortero se necesitan 2 partes de puzolana por una parte de cal, grasa de animales, leche y sangre. Todavía existen ruinas de estructuras construidas con este cemento romano. Esta receta se pierde después de esta fecha y no es sino hasta 1756 cuando Smeaton la vuelve a ampliar en la construcción de un faro. Este se considera el inicio de una larga historia en el campo de desarrollo de los materiales de construcción hidráulicos. Pero fue hasta el año 1824 que el maestro de obras Joseph Aspdin patentó la fórmula de cemento, al quemar polvo fino de caliza con arcilla en un horno de cal hasta que el dióxido de carbono era retirado. El producto obtenido fue denominado cemento Pórtland, ya que su color le recordaba el de la piedra de Pórtland. Su producción llegó a expandirse por algunos países europeos con destaque para Alemania y Reino Unido a mediados del siglo XIX y principios del siglo XX, y poco más tarde vino a producirse en los demás países.

En Uganda, la producción de cemento se elevó a 507 068 t en 2003 de 505 959 t en 2002 y 321 329 t en 1998. En 2005 Hima Cement Industries Ltd. y Tororo Cement Industries Ltd. tuvieron intención de completar expansiones. La planta de cemento de Tororo y la planta de clínker de Hima tendrán una capacidad cada una de 365 000 toneladas métricas al año. (World Bank Group, 2003, p. 58-59; Uganda Bureau Of. Statistics, 2004, p. 163).

Por lo que consideramos que el *Problema que se nos presenta es*: Nuestro desconocimiento del nivel de desarrollo de las tecnologías de producción de cemento a nivel mundial.

Para enfrentar dicho problema nos planteamos la siguiente *Hipótesis*: Si se alcanza un nivel de conocimiento del desarrollo de las tecnologías de la producción de cemento a nivel mundial, eso ayudaría en la elaboración de normas de producción de cemento así como al control de las emisiones de gases y polvos al medio ambiente.

## **Objetivo**

Fundamentar desde el punto de vista tecnológico la producción de cemento a nivel mundial.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar las tecnologías de producción de cemento;
- Analizar el desarrollo actual de la industria del cemento.

### **Tareas:**

- Análisis de los antecedentes de la producción de cemento;
- Caracterización de las vías de producción de cemento;
- Caracterización y descripción de la materia prima usada en el proceso de cemento.

Además en el capítulo se describe el estado del arte de la producción de cemento, su generalización, la materia prima usada y un análisis económico del costo en la producción, así como los impactos medioambientales.

## **1.1 Estado del arte**

La norma ASTM C 150 define cemento como un conglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (árido grueso o grava, más árido fino o arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece al reaccionar con el agua, adquiriendo consistencia pétreo, denominado hormigón o concreto.

LJ Vicat y Vessage en Francia y por James Frost en Inglaterra, 1756-1830 producen cemento al incinerar una mezcla natural de cal y arcilla, cuyas propiedades variaban ampliamente por ser un elemento natural. Esto ocurrió un tiempo antes del surgimiento del cemento Pórtland.

James Parker descubrió en 1791 un cemento que patentó en 1796 con el nombre de Cemento Romano, – por una supuesta semejanza con el usado por aquellos –, que tuvo una gran aceptación por sus excelentes cualidades, tanto que al expirar el término de la patente, que en ese época era de 14 años, le siguieron dando por antonomasia el mismo nombre en razón de su probada calidad. La celebridad de la mezcla Parker y la escasez de piedras similares a las que él usaba – recogía ciertos tipos de rocas en los acantilados y en las playas de la isla de Sheppel, en Kent – hizo que químicos e ingenieros la analizaran y llegaran a la conclusión de que usando piedras calizas ligadas con aproximadamente un tercio de arcilla y mezclándole una pequeña cantidad de óxido de hierro, se lograba el cemento romano

En 1818, el ingeniero francés Louis José Vicat, en su obra Investigaciones experimentales sobre la cal de construcción, el hormigón y los morteros, dio a conocer un método para obtener cal hidráulica de cualquier piedra caliza; el procedimiento consistía en apagar la cal y unirla con arcilla pura y agua, convirtiéndola en una masa pegajosa de la que se forman bolas que, secadas al sol, se introducían en un horno y lograban un material de cualidades completamente diferentes.

El albañil inglés, Joseph Aspdin en 1824 ampliando el uso la patente del proceso de producción del cemento, que se vino a llamar cemento Pórtland. El proceso tiene similitud con el elaborado por Frost en el siglo XVIII. La solicitud de patente decía textualmente:

“El barro o polvo de las calles empedradas con piedra calcárea, o, si este material no se puede obtener en suficiente cantidad, la piedra calcárea calcinada, tiene que

ser mezclada con una cantidad determinada de arcilla, amasada con agua, por medio de trabajo manual o de una máquina, hasta reducirla a una masa impalpable. La pasta se deja secar, luego se rompe en pedazos y se calienta en un horno de cal, hasta que se haya desarrollado todo el ácido carbónico. El producto se reduce después a polvo con muelas y morteros, quedando listo para el uso”.

Como la ley obligaba a describir y legalizar en el término de 60 días el proceso de producción, el 21 de diciembre de 1824 presentó el siguiente documento:

“A todos a quienes venga la presente, yo, Joseph Aspdin, de Leeds, en el Condado de York, albañil, saludo, en vista de que su Majestad el Rey Jorge Cuarto por la Patente con el Gran Sello de la Gran Bretaña, fechada en Westminister el 21 de Octubre, el quinto año de su reinado, me concedió a mí, dicho Joseph Aspdin, mis ejecutores, administradores, y sucesores o aquellos a quienes yo, dicho Joseph Aspdin, o mis ejecutores, administradores y sucesores en cualquier tiempo convengamos y no a otros, en cualquier tiempo en el período de años aquí citado legalmente, puedan hacer uso, ejercer y vender dentro de Inglaterra, Gales y el pueblo de Berwick-upon. Tweed mi invención de “una mejora en los modos de producir una piedra artificial”, en cuya Patente se contiene una condición, obligándome el dicho Joseph Aspdin por escritura firmada y sellada por mí, describir la naturaleza de mi invención y en manera tiene que ser desempeñada la misma y hacer que la misma sea registrada en la Cancillería del Alto Tribunal de su Majestad dentro de dos meses del calendario próximos e inmediatamente después de la fecha de la citada Patente (según y por la misma) haciéndose a ella referencia. “ahora se hace saber que cumpliendo con dicha condición, yo, el dicho Joseph Aspdin declaro aquí la naturaleza de dicha Invención y la manera en la cual la misma tiene que ser desempeñada, se describen particularmente en la siguiente descripción (es decir): Mi método de hacer un cemento o piedra artificial para revocar edificios, aguas corrientes, cisternas o cualquier otro objeto a que puede ser aplicable (y que yo llamo

cemento Pórtland) es como sigue: “Yo tomo una cantidad específica de caliza, tal como la generalmente usada para hacer o reparar caminos y la tomo de los caminos después de haber sido reducida a polvo, pero si no puedo obtener suficiente cantidad de la anterior de los caminos, obtengo la caliza misma y causo que sea calcinado el polvo o la caliza. Luego tomo una cantidad específica de tierra arcillosa y la mezclo con agua a un estado que se acerque a la impalpabilidad ya sea por trabajo manual o maquinaria. Después de este procedimiento pongo la mezcla anterior en un recipiente para evaporación, ya sea por el calor del sol o sometiéndolo a la acción del fuego o vapor, llevado en tubos o conductos de bajo o cerca del recipiente hasta que el agua se haya evaporado completamente. Luego parto dicha mezcla en trozos adecuados y los calcino en un horno parecido a un horno de cal hasta que el ácido carbónico sea totalmente expelido. La mezcla así calcinada se debe moler, batir o pisar para hacerla polvo fino, y se halla entonces en estado apropiado para hacer cemento o piedra artificial. Este polvo debe ser mezclado con suficiente cantidad de agua para darle consistencia de mortero y de este modo aplicado a los propósitos que se necesiten. En testimonio de lo cual yo, el Joseph Aspdin, firmo y sello la presente el día 15 de diciembre del año de Nuestro Señor 1824, Joseph (L. S.) Aspdin.

Y téngase en cuenta que el día quince de diciembre del año de Nuestro Señor 1824, el arriba mencionado, Joseph Aspdin, vino ante nuestro dicho Señor el Rey en su Cancillería y reconoció la especificación mencionada y todo y todas las cosas en ellas contenidas y especificadas, en la forma arriba escrita. Y también la especificación arriba mencionada fue sellada de acuerdo con el tenor del Estatuto hecho para dicho objeto. Anotado el día 18 de diciembre en el año de Nuestro Señor 1824.

William hijo del albañil Aspdin, en 1843 hizo una versión mejorada del cemento inicialmente llamado patente de cemento Pórtland, aunque no ha tenido ninguno patente. Él mismo hizo otro mejoramiento en 1848 del cemento, entonces en 1853 se migró para Alemania para la industria del cemento donde vino a ser decorado

como el inventor del cemento Pórtland en 1878. Él no tenía conocimientos químicos ni científicos, sus procedimientos eran totalmente empíricos. La solicitud de patente no detallaba el proceso de fabricación, ni la temperatura de cocción.

En el año 1843, Grisell y Peto, contratistas de Inglaterra hicieron los primeros análisis comparativos del cemento Pórtland y el Romano y quedó demostrada la superioridad del primero. Pese a ello, su desarrollo inicial fue muy lento, en 1850 sólo ocho fábricas lo producían en Inglaterra, debido sobre todo a que su calidad era muy variable, lo que hacía dudar de su efectividad; sin embargo, en los años subsiguientes varias plantas lo comenzaron a producir en pequeñas cantidades en Inglaterra.

La primera fábrica con una producción verdaderamente importante fue la de Dupont y Demarle en 1850 en Francia (Boulogne-Sur-Mer). Ese mismo año Vicat y Compañía fundaron otra fábrica en Grenoble, Francia, que fue además la primera por vía seca en hornos cíclicos verticales. Cinco años más tarde, en 1855, el alemán Hermann Bleibtreu montó una planta en Züellchow, cerca de Stettin, con lo cual comenzó a expandirse y popularizarse el uso del cemento Pórtland, por los países europeos.

## **1.2 Caracterización de la materia prima usada para el cemento.**

La materia prima fundamental usada en la tecnología de producción de cemento engloba piedra caliza y la arcilla, en dicha tecnología se verifican procesos y operaciones que se resumen en: preparación mecánica, calcinación y molienda del calcinado.

Después de la dosificación de piedra caliza y arcilla, estas se trituran y se mezclan para formar una pasta (en caso de vía húmeda) o material pulverulento (en caso de vía seca) que a elevadas temperaturas transforma en la escoria llamada clínker.

### 1.3 Propiedades del Cemento

Los cementos hidráulicos son aquellos que tienen la propiedad de fraguar y endurecerse bajo el agua como consecuencia de la acción de ésta con los componentes del cemento.

#### 1.3.1 Resistencia del cemento.

Los factores que influyen en la resistencia mecánica del cemento, son los componentes mineralógicos y la finura. Se sabe que el Silicato dicálcico ( $C_2S$ ) es el máximo responsable de la resistencia del cemento a cualquier edad. Este hecho se demuestra por el incremento de la resistencia hasta la edad de 28 días. Posteriormente el Silicato dicálcico ( $C_2S$ ) desempeña un papel importante en la resistencia del cemento, a la edad de un año o más. El aluminato tricalcico ( $C_3A$ ) ofrece su máxima contribución en el periodo de un día. El Aluminoferrito tetracálcico ( $C_4AF$ ) contribuye poco o nada a la resistencia.

### 1.4 Composición química del cemento.

Una vez que el agua y el cemento se mezclan para formar la pasta cementante, se inician una serie de reacciones químicas que en forma global se designan como hidratación del cemento. Estas reacciones se manifiestan inicialmente por la rigidización gradual de la mezcla, que culmina con su fraguado, y continúan para dar lugar al endurecimiento y adquisición de resistencia mecánica en el producto.

Aun, cuando la hidratación del cemento es un fenómeno sumamente complejo, existen simplificaciones que permiten interpretar sus efectos en el concreto. Con esto admitido, puede decirse que la composición química de un clínker Pórtland se define convenientemente mediante la identificación de cuatro compuestos principales, cuyas variaciones relativas determinan los diferentes tipos de cemento Pórtland:

Compuesto	Fórmula del óxido	Notación abreviada
Silicato tricálcico	$3CaO SiO_2$	$C_3S$

Silicato dicálcico	$2\text{CaO SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

En términos prácticos se concede que los silicatos de calcio ( $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$ ) son los compuestos más deseables, porque al hidratarse forman los silicatos hidratados de calcio (S-H-C) que son responsables de la resistencia mecánica y otras propiedades del concreto. Normalmente, el  $\text{C}_3\text{S}$  aporta resistencia a corto y mediano plazo, y el  $\text{C}_2\text{S}$  a mediano y largo plazo, es decir, se complementan bien para que la adquisición de resistencia se realice en forma sostenida.

El aluminato tricalcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) es tal vez el compuesto que se hidrata con mayor rapidez, y por ello propicia mayor velocidad en el fraguado y en el desarrollo del calor de hidratación en el concreto. Asimismo, su presencia en el cemento hace al concreto más susceptible de sufrir daño por efecto del ataque de sulfatos. Por todo ello, se tiende a limitarlo en la medida que es compatible con el uso del cemento.

Finalmente, el aluminio ferrito tetracálcico es un compuesto relativamente inactivo, pues contribuye poco a la resistencia del concreto, y su presencia más bien es útil como fundente durante la calcinación del clínker y porque favorece la hidratación de los otros compuestos.

Conforme a esas tendencias de carácter general, durante la elaboración del clínker Pórtland en sus cinco tipos normalizados, se realizan ajustes para regular la presencia de dichos compuestos de la siguiente manera:

### **Tipo característica ajuste principal.**

- I. Sin características especiales Sin ajustes específicos en este aspecto
- II. Moderados calor de hidratación y resistencia a los sulfatos Moderado  $\text{C}_3\text{A}$
- III. Alta resistencia rápida Alto  $\text{C}_3\text{S}$

IV. Bajo calor de hidratación Alto  $C_2S$ , moderado  $C_3A$

V. Alta resistencia a los sulfatos Bajo  $C_3A$

La composición química del clínker (y del cemento Pórtland) se refiere a los álcalis, óxidos de sodio ( $Na_2O$ ) y de potasio ( $K_2O$ ), cuyo contenido suele limitarse para evitar reacciones dañinas del cemento con ciertos agregados en el concreto. Esto ha dado motivo para el establecimiento de un requisito químico opcional, aplicable a todos los tipos de cemento Pórtland, que consiste en ajustar el contenido de álcalis totales, expresados como  $Na_2O$ , a un máximo de 0,60 % cuando se requiere emplear el cemento junto con agregados reactivos.

El cemento se fragua o endurece por evaporación del líquido plastificante, como el agua, por transformación química interna, por hidratación o por el crecimiento de cristales entrelazados. Otros tipos de cemento se endurecen al reaccionar con el oxígeno y el dióxido de carbono de la atmósfera.

## **1.5 Tipos del cemento**

Tomando en cuenta sus diferencias de la composición química, características mecánicas, comportamiento durante: hidratación, fraguado y endurecimiento ellos se clasifican en:

- Cemento Pórtland;
- Cemento puzolánico;
- Cemento aluminoso;
- Cemento siderúrgico (de alto horno)

### **1.5.1 Cemento Pórtland**

Es el cemento más usado y posee un fraguado lento. Su temperatura de transformación se sitúa entre 1 400 a 1 500 °C.

La composición química del cemento Pórtland se presenta en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Composición química del cemento Pórtland

Materia	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O
%	20 - 25	2 - 7	0, 2 - 7	61 - 68	1 - 3	2, 5	0, 5 – 1, 5

La fabricación del cemento Pórtland se da en tres fases: (I) Preparación de la mezcla de las materias primas; (II) Producción del clínker; y, (III) Preparación del cemento.

Las sucesivas etapas de la fabricación son: Mezcla y molienda de las materias primas: Ambos procesos se cumplen conjuntamente dentro del molino de bolas, gran tambor horizontal giratorio dentro del cual hay bolas metálicas. Los choques, durante su rotación, pulverizan las materias primas, convertidas en pasta cruda. Se puede trabajar de dos maneras: por vía seca, en la que la mezcla y molienda se efectúan con las materias primas solamente, o por vía húmeda, en la que se mezcla y muele en presencia de agua.

Cocción de la pasta cruda: De los molinos de bolas la pasta cruda pasa a los hornos rotatorios continuos, semejantes a los de cal viva, pero de 200 metros de longitud y 10 metros de diámetro. El tubo tiene su chapa interiormente revestida de ladrillos refractarios. Giran lentamente: 1 vuelta por minuto. Debido a la pendiente, la pasta cruda desciende del extremo superior al inferior. Un quemador, de fuel oil y aire primario a presión, o bien de gas natural, genera una larga llama, cuya temperatura se eleva a 1 500 °C. Primero se seca la pasta cruda. Después los carbonatos se calcinan.

Por último, reaccionan los distintos óxidos. El producto obtenido, llamado clínker, es negro, duro y granulado. Cae caliente dentro de un sistema enfriador; por ejemplo, otro cilindro rotatorio por el que circula aire frío a contracorriente. El aire así calentado actúa como aire secundario en la combustión. Los hornos de cemento funcionan interrumidamente con rendimientos de varios miles de toneladas diarias de clínker.

Transformación del clínker en cemento Pórtland: El clínker se estaciona un mínimo de 15 a 30 días. Luego se muele finalmente en el molino de bolas. Durante la molienda se incorpora un 3 % de yeso crudo. Este aditivo regula el tiempo de fraguado. El cemento Pórtland no enyesado fragua velozmente: a los 5 minutos de empastado con agua endurece, en cambio cuando contiene yeso demora el tiempo señalado anteriormente.

La composición requerida para las materias primas en la producción del cemento Pórtland son minerales que contienen:

- Oxido de calcio (44 %),
- Oxido de silicio (14, 5 %),
- Oxido de aluminio (3, 5 %),
- Oxido de hierro (3 %) y
- Oxido de magnesio (1, 6 %).

La extracción de estos minerales se hace en canteras, que preferiblemente deben estar próximas a la fábrica, con frecuencia los minerales ya poseen la composición deseada, sin embargo en algunos casos es necesario agregar arcilla o carbonato de calcio, o bien minerales de hierro, bauxita, u otros minerales residuos de fundiciones.

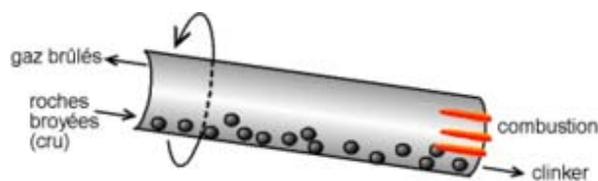


Figura 1.1. Esquema de cocción en un horno Kilm.

La mezcla es calentada en un horno especial, constituido de un cilindro o tambor (llamado Kilm) dispuesto horizontalmente con una ligera inclinación, y rodando lentamente. Como se muestra en la figura 1.1. La temperatura crece a lo largo del

cilindro hasta llegar a aproximadamente 1 400 °C; la temperatura es tal que hace que los minerales se combinen, pero no se fundan o vitrifiquen.

En la sección de menor temperatura, el carbonato de calcio (calcáreo) se separa en óxido de calcio y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En la zona de alta temperatura el óxido de calcio reacciona con los silicatos y forma silicatos de calcio. Se forma también una pequeña cantidad de aluminato tricalcico (Ca<sub>3</sub>Al) y Aluminoferrito de tricalcio (Ca<sub>4</sub>AlFe). El material resultante es denominado clínker. El clínker puede ser conservado durante años antes de proceder a la producción del cemento, con la condición de que no entre en contacto con el agua.

La energía necesaria para producir el clínker es de aproximadamente 1 700 J/g, pero a causa de las pérdidas de calor el valor es considerablemente más elevado. Esto genera gran demanda de energía para la producción del cemento, y por lo tanto la liberación de una gran cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera, gas de efecto invernadero.

### **Problemas más comunes presentados en el horno, y su eliminación**

En la industria del cemento, como en todas aquellas donde se emplean altas temperaturas dentro del proceso de producción, tiene especial interés el estudio de los hornos; sobre todo a lo que cemento se refiere, por la gran importancia que desde el punto de vista económico, la buena marca de estos equipos los hornos de cemento tienen un costo elevado nuevo de instalación y en ellos se mantienen elevadísimas temperaturas, lo cual hace que se observen especiales atenciones en su funcionamiento.

En los últimos años el desarrollo de nuevos tipos de cemento ricos en cal (supercementos): así como hornos de diámetros considerables, han hecho crecer las exigencias de trabajos de los materiales refractarios.

Los hornos pueden construirse con diámetro constante o una o dos extremidades ensanchadas.

El horno propiamente dicho va acompañado de un cierto número de dispositivos anexos representados en la figura 1.2.

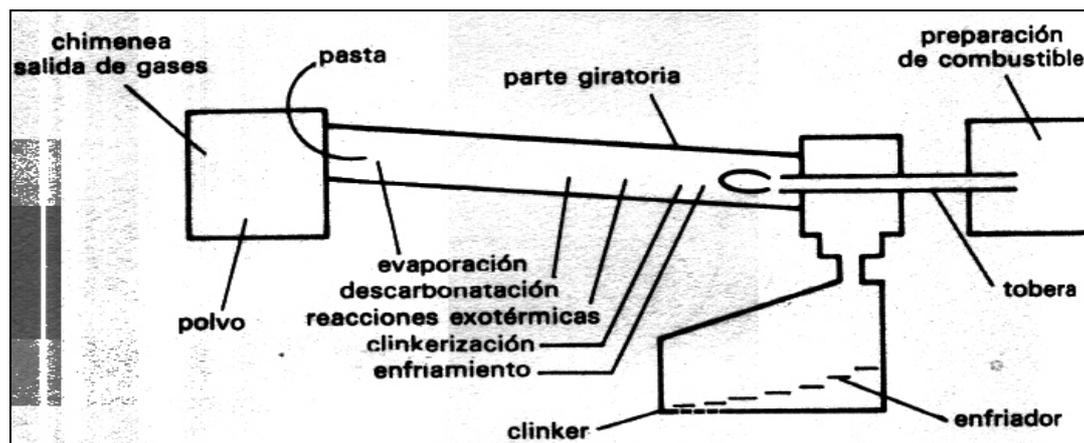


Figura 1.2. Horno acompañado de ciertos dispositivos anexos.

Primero tenemos una tobera, que sirve para inyectar el combustible y que se enfría por circulación de agua. Además, la enfriadora de clínker, que es un intercambiador térmico, capaz de recuperar una parte de las calorías arrastradas por el clínker: estas calorías retornan al horno por medio del aire secundario. Otro dispositivo es el de alimentación de pasta, generalmente está constituido por un alimentador rotativo de cuchara, cuya velocidad se sincroniza con la del horno. También tenemos el dispositivo de preparación del combustible, así como el intercambiador, que utiliza los gases calientes para vaporizar el agua contenida en la pasta o en la harina. Este elemento puede estar situado en el interior o exterior del horno, por último veremos un captador de polvo, que debe retener la mayor parte del polvo arrastrado por los gases que se escapan del horno.

La instalación cuenta con un número de ventiladores de varios tamaños, que sirven para soplar aire con el objetivo de expulsar los gases hacia la atmósfera.

Interiormente el horno esta forrado de ladrillos refractarios de un espesor según sus dimensiones. Las funciones de los refractarios en los hornos son: evitar el sobrecalentamiento de las paredes, protegerlas de las altas temperaturas, evitar la acción directa de los componentes químicos del clínker en dichas paredes, cuando se alcanzan altas temperaturas, y reducir, además, las pérdidas de calor por radiación al medio ambiente.

EL horno se divide en varias zonas, que de la entrada hacia la salida se denominan zonas de: evaporación. Descarburación, reacciones exotérmicas, clinkerización y enfriamiento. La parte final del horno hacia la caperuza se denomina anillo de salida.

Finalmente, el horno esta equipado de un cuadro de control, donde se pueden apreciar: las temperaturas, las presiones, los caudales (gases o materiales), el tenor de oxígeno, las condiciones de funcionamiento de los motores eléctricos de mando de los distintos elementos de la instalación.

El examen de estos valores permite conocer, en cada momento, el estado de marcha del horno, que debe ser objeto de una vigilancia constante.

Para mejorar las características del producto final, al clínker se le agrega aproximadamente el 2 % de yeso y la mezcla es molida finamente. El polvo obtenido es el cemento preparado para su uso.

El cemento obtenido tiene una composición del tipo:

- 64, 0 % óxido de calcio
- 21, 0 % óxido de silicio
- 5, 5 % óxido de aluminio
- 4, 5 % óxido de hierro
- 2, 4 % óxido de magnesio
- 1, 6 % sulfatos
- 1, 0 % otros materiales, entre los cuales principalmente agua.

Cuando el cemento Pórtland es mezclado con el agua, el producto solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas. Con el agregado de materiales particulares al cemento (calcáreo o cal) se obtiene el cemento plástico, que fragua más rápidamente y es más fácilmente trabajable. Este material es usado en particular para el revestimiento externo de edificios.

La calidad del cemento Pórtland deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 150.

En el 2004, los principales productores mundiales de cemento Pórtland fueron Lafarge en Francia, Holcim en Suiza y Cemex en México.

### **1.5.2. Cemento puzolánico.**

El código ASTM (1992), en la definición 618 - 78, define: "las puzolanas son materiales silíceos o aluminio-silíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han molido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.

El nombre deriva de la localidad de Pozzuoli, en las proximidades de Nápoles, en las faldas del Vesubio. Posteriormente se ha generalizado a las cenizas volcánicas en otros lugares. Ya Vitrubio describía cuatro tipos de puzolánico: negra, blanca, gris y roja.

Mezclada con cal (en la relación de 2 a 1) se comporta como el cemento puzolánico, y permite la preparación de una buena mezcla en grado de fraguar incluso bajo agua.

Esta propiedad permite el empleo innovador del hormigón, como ya habían entendido los romanos: El antiguo puerto de Cosa fue construido con puzolana mezclada con cal apenas antes de su uso y colada bajo agua, probablemente

utilizando un tubo, para depositarla en el fondo sin que se diluya en el agua de mar. Los tres muelles son visibles todavía, con la parte sumergida en buenas condiciones después de 2 100 años.

La puzolana es de naturaleza ácida, muy reactiva, al ser muy porosa y puede obtenerse a bajo precio. Un cemento puzolánico contiene aproximadamente:

- 55 - 70 % de clínker Portland
- 30 - 45 % de puzolánico
- 2 - 4 % de yeso

Puesto que la puzolana se combina con la cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), se tendrá una menor cantidad de esta última. Pero justamente porque la cal es el componente que es atacado por las aguas agresivas, el cemento puzolánico será más resistente al ataque de éstas. Por otro lado, como el  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  está presente solamente en el componente constituido por el clínker Portland, la colada de cemento puzolánico desarrollará un menor calor de reacción durante el fraguado. Este cemento es por lo tanto adecuado para ser usado en climas particularmente calurosos o para coladas de grandes dimensiones.

### **1.5.3. Cemento aluminoso.**

El cemento aluminoso se produce principalmente a partir de la bauxita con impurezas de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Adicionalmente se agrega calcáreo o bien carbonato de calcio. El cemento aluminoso, también llamado «cemento fundido», por lo que la temperatura del horno alcanza hasta los 1 600 °C y se alcanza la fusión de los componentes. El cemento fundido es colado en moldes para formar «panes» que serán enfriados y finalmente molidos para obtener el producto final.

El cemento aluminoso tiene la siguiente composición de óxidos:

- 35 - 40 % óxido de calcio

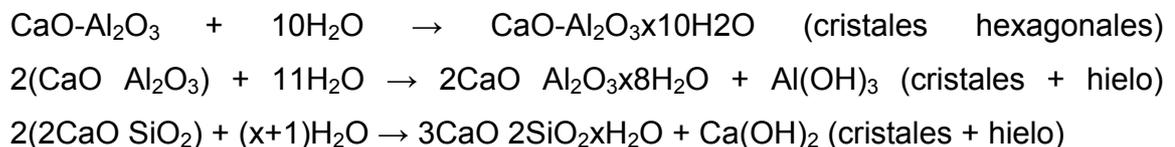
- 40 - 50 % óxido de aluminio
- 5 % óxido de silicio
- 5 - 10 % óxido de hierro
- 1 % óxido de titanio

Por lo que se refiere a sus reales componentes se tiene:

- 60 - 70 % CaO Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- 10 - 15 % 2CaO SiO<sub>2</sub>
- 4CaO Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- 2CaO Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SiO<sub>2</sub>

Por lo que se refiere al óxido de silicio, su presencia como impureza tiene que ser menor al 6 %, porque el componente al que da origen, es decir, el (2CaO Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SiO<sub>2</sub>) tiene pocas propiedades hidrófilas.

### **1.5.3.1 Reacciones de hidratación del cemento aluminoso.**



Mientras el cemento Pórtland es un cemento de naturaleza básica, gracias a la presencia de la cal Ca(OH)<sub>2</sub>, el cemento aluminoso es de naturaleza sustancialmente neutra. La presencia del hidróxido de aluminio Al(OH)<sub>3</sub>, que en este caso se comporta como ácido, provocando la neutralización de los dos componentes y dando como resultado un cemento neutro.

El cemento aluminoso debe utilizarse con temperaturas inferiores a los 30 °C, por lo tanto en climas fríos. En efecto, si la temperatura fuera superior, la segunda reacción de hidratación cambiaría y se tendría la formación de 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O (cristales cúbicos) y una mayor producción de Al(OH)<sub>3</sub>, lo que llevaría a un aumento del volumen y podría causar fisuras.

#### **1.5.4. Cemento siderúrgico (de alto horno).**

La puzolana ha sido sustituida en muchos casos por la ceniza de carbón proveniente de las centrales termoeléctricas, escoria de fundiciones o residuos obtenidos calentando el cuarzo. Estos componentes son introducidos entre el 35 hasta el 80 %. El porcentaje de estos materiales pueden ser particularmente elevados, siendo a partir de los silicatos que se origina, como un material potencialmente hidráulico. Esta debe sin embargo ser activada en un ambiente alcalino, es decir en presencia de iones  $\text{OH}^-$ . Es por este motivo que debe estar presente por lo menos un 20 % de cemento Pórtland normal. Por los mismos motivos que el cemento puzolánico, el cemento siderúrgico también tiene buena resistencia a las aguas agresivas y desarrolla menos calor durante el fraguado. Otra característica de estos cementos es su elevada alcalinidad natural, que lo hace particularmente resistente a la corrosión atmosférica causada por los sulfatos.

#### **1.5.5. Aplicaciones del Cemento.**

El Cemento, es sustancia de polvo fino hecha de argamasa de yeso capaz de formar una pasta blanda al mezclarse con agua y que se endurece espontáneamente en contacto con el aire.

Tiene diversas aplicaciones, como la obtención de hormigón por la unión de arena y grava con cemento Pórtland (es el más usual), para pegar superficies de distintos materiales o para revestimientos de superficies a fin de protegerlas de la acción de sustancias químicas. El cemento tiene diferentes composiciones para usos diversos. Puede recibir el nombre del componente principal, como el cemento calcáreo, que contiene óxido de silicio, o como el cemento epoxiaco, que contiene resinas epoxídicas; o de su principal característica, como el cemento hidráulico o el cemento rápido. Los cementos utilizados en la construcción se denominan en algunas ocasiones por su origen, como el cemento romano, o por su parecido con otros materiales, como el caso del cemento Pórtland, que tiene cierta semejanza

con la piedra de Pórtland, utilizada en Gran Bretaña para la construcción. Los cementos que resisten altas temperaturas se llaman cementos refractantes.

## **Conclusiones Parciales**

De los análisis hechos se observó que:

- La materia prima esencial para la producción de cemento es la caliza y la arcilla;
- Los cementos se diferencian por la composición química, características mecánicas, comportamiento durante: hidratación, fraguado y endurecimiento. De ellos se clasifican en Cemento Pórtland, cemento Puzolánico, Cemento Aluminoso y Cemento Siderúrgico (de alto horno);
- Los cementos se endurecen por evaporación de los líquidos y otra parte de ellos debido a la reacción con el oxígeno y el dióxido de carbono de la atmósfera.

## CAPITULO II

### FUNDAMENTO TEORICO

#### Introducción

En el presente capítulo se describen las materias primas y sus procesos tecnológicos hacia la obtención del producto final deseado. De los procesos se verifican la preparación de la materia prima proveniente de las canteras, la calcinación y la molienda que definirá la calidad del cemento.

#### 2.1 Tipos de materia prima para la producción de cemento

Las materias primas empleadas en la producción del cemento, son fundamentalmente de origen calcáreo: piedra calizas, margas, etc. y además, de material arcillosa, como son: pizarra, escorias de alto horno y arcilla propiamente dicha.

**Caliza.** Las calizas pueden ser de dureza y pureza variables. Proviene de yacimiento de  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de calcio) contenidos en los aguas de mares o de los lagos. Algunos de estos yacimientos, bajo los efectos de una presión y una temperatura suficientes, han dado calizas cristalinas, tales como el mármol, cuya dureza es elevada

Las principales impurezas en las calizas son:

**Sílice.** Se presenta en forma variada: libre, no se puede combinar y debe eliminarse cuando se presenta en nódulos de sílex o de cuarzo, si se encuentra en estado natural, finamente dividida y repartida en la masa de una caliza puede actuar indistintamente: combina con varios elementos (hierro, magnesita y alumina) la sílice y alumina, ya en la forma de arcilla reaccionan bien con la cal.

**Magnesita.** Es un elemento peligroso, debido a la posibilidad de expansionarse en el seno del cemento hidratado. Las calizas no deben contener más de 5 % de magnesita.

**Hierro.** Se encuentra en la mayoría de los casos en forma de óxido ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) o de pirita ( $\text{FeS}_2$ ). El máximo permitido es aproximadamente 2 %. En este último caso, el desarrolla una función útil como fundente.

**Álcalis.** Tenemos de sodio y potasio, que pueden provocar ciertas dificultades en el curso de la fabricación del cemento, como son: formación de anillos en el horno y modificación de ciertas características del cemento.

**Arcilla.** Esencialmente, la constitución de las arcillas es de sílice, alumina y hierro. Pueden clasificarse en los siguientes:

a) arcillas residuales,

b) arcillas transportadas y depositadas bajo los efectos de los mares, ríos, los vientos etcétera

Las arcillas empleadas en las fábricas de cemento son arcillas comunes: las mezclas de los grupos clasificados anteriormente, pueden constituirlos. Aquí también las impurezas, tales como: magnesio, azufre, sodio, deben presentarse en cuantía muy limitada.

Las materia primas fundamentales para la fabricación del cemento, como; la arcilla y la caliza, deben ser de fácil molienda: poco costosa para secar, si se trata de vía seca: contener cierta cantidad de agua, si se trata de vía húmeda: y además, fáciles de combinar durante la cocción.

Estos materiales se extraen de las canteras, que constituyen el punto de partida en la fabricación del cemento.

## **2.2 Toma de muestra**

Es fundamental saber antes de comenzar la explotación de una cantera, que tipos o clases de materias primas existen en ella: así como su composición química, lo que facilita la apertura de los frentes, para su explotación.

Este trabajo se realiza tomando muestras en diferentes partes de la cantera para determinar, mediante análisis en el laboratorio, que composición química tiene.

De esta forma y con la información necesaria, se procede a confeccionar el mapa químico del yacimiento, que nos garantiza saber en cada momento, en dependencia de las necesidades, que zonas hay que explotar.

## **2.3 Tecnologías de la producción de cemento**

En el proceso de la producción del cemento se destacan dos vías que pueden ser húmedas y secas, así como sus interrelaciones, ver esquema en el anexo 1.

### **2.3.1 Vía húmeda**

El procedimiento de fabricación por vía húmeda comprende las operaciones siguientes. La elaboración del cemento comienza en los yacimientos con la extracción de la materia prima.

La materia arrancada por medio de explosivo se recoge con palas mecánicas o extrae directamente mediante excavadoras. Luego se transporta en camiones hasta los molinos primarios que son las encargadas de molerla. De aquí pasa a la nave de materia prima, donde un carro distribuidor la clasifica de acuerdo con el tipo de material que se trate, ya sea caliza, arcilla, etcétera.

Posteriormente, una grúa viajera dosifica adecuadamente el material que va a los molinos secundarios o de bolas, donde se le añade el agua necesaria para formar la pasta.

La pasta se lleva hasta unos tanques y allí se homogeneiza mecánica y neumáticamente. La conexión de estos tanques entre sí, permite mezclar pastas

de composiciones distintas en las proporciones establecidas, según los resultados de los análisis químicos. Desde estos tanques o silos de homogenización se alimentara al horno.

Ya en el horno esta pasta se funde parcialmente y da lugar a la formación del clínker, que luego de almacenarlo cierto tiempo, se traslada a los molinos de cemento, donde se le añade de 3 a 5 % de yeso, para regular el fraguado del cemento. Ambos, clínker y yeso se reducen a polvo en este molino. De esta forma queda concluido el proceso de fabricación, o sea, queda listo el cemento.

El producto terminado (cemento) se almacena en silos para proceder a su entrega, ya sea a granel o en bolsas.

### **2.3.2 Vía seca**

Este proceso se utiliza cuando las materias primas por su naturaleza son pobres en agua. Se trata de secarlas completamente para obtener polvo y no una pasta como en el procedimiento anterior. Como en el de vía húmeda, el proceso comienza en las canteras con la extracción de la materia prima. Esta materia prima se reduce de tamaño en los molinos primarios después de dosificarse debidamente pasa al molino de bolas, donde se efectuará una segunda molienda con secado simultáneo, aprovechando los gases calientes provenientes del horno.

El polvo obtenido pasa a los silos de crudo, donde sufre un proceso de homogeneización. Este proceso se efectúa fundamentalmente por medios neumáticos.

El polvo homogeneizado entra al horno a través del intercambiador de calor, que eleva la temperatura del material hasta aproximadamente 800 °C. Después, en el interior del horno se calcina hasta la formación del clínker.

## **2.4 Operaciones de preparación, calcinación y molienda.**

Estas operaciones definen la calidad de cemento a ser producido, por lo tanto constituyen la base fundamental para los sucesos de las tecnologías sean ellas vías seca y húmeda de producción.

### **2.4.1 Preparación de la materia prima.**

Después de su extracción de las explotaciones mineras, generalmente canteras con arranque por voladura para el caso del componente calcáreo, las materias primas, que son de características químicas y mineralógicas diferentes y recibidas algunas de ellas en trozos de gran tamaño, deben de sufrir un proceso de preparación antes de ser sometidas al proceso de cocción en el horno. La finalidad del proceso de preparación de las materias primas es convertirlas en un polvo (crudo o harina de cemento) de composición homogénea y de características extremadamente precisas, adecuado para ser sometido al proceso de cocción. Dicho proceso está relacionado, básicamente, con la selección de los métodos de ingeniería más eficientes para la trituración, secado, molienda, mezclado y transporte de sólidos entre las distintas etapas. El consumo de energía es considerable, sobre todo en la molienda, y se controla constantemente intentando mejorar el rendimiento energético.

El tamizado y la clasificación también se emplean en la industria del cemento con vistas a conseguir una mayor economía en las operaciones de trituración y molienda. En cambio la beneficiación y concentración de las materias primas tan solo se aplican en la industria del cemento en casos muy excepcionales.

### **2.4.2 Operación de Calcinación**

La calcinación de la materia prima es la operación que se utiliza para elaborar clínker, y constituye la fase fundamental de la fabricación del cemento. Esta operación tiene lugar en hornos que pueden ser: verticales, rotatorios, pero los más utilizados son los hornos de tambor rotatorios.

El clínker es la transformación física – química de las mezclas por la acción del calor, donde se combinan los materiales que lo componen, y se forman óxidos que comprenden de 95 a 96 % del total de los óxidos formados, que son: CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Las reacciones de clinkerización se producen esencialmente, entre los cuatros elementos principales, los mencionados anteriormente, para formar silicatos dotados de propiedades hidráulicas.

El material se traslada a través del horno a contracorriente con los gases de combustión.

La alimentación del horno se efectúa con el material procedente de los tanques de alimentación. El material va a los dosificadores provistos de los llamados alimentadores, accionado cada uno y para cada horno por su motor eléctrico.

Al avanzar la pasta desde la entrada del horno por el interior de este, primero, pierde el agua por evaporación; posteriormente la materia orgánica se quema y los carbonatos pierden su bióxido de carbono, una porción de los sulfatos se descompone, también, liberando trióxido de azufre, y los cloruros y sales alcalinas se volatizan parcialmente. Únicamente en las últimas fases de la cocción se forman líquidos que provocan reacciones, y estas, a su vez, actúan en la formación de los compuestos del clínker.

Dichas reacciones son, en parte, bastante complejas y dan como resultado la composición mineralógica de dicho clínker.

Dentro del horno y sus primeras zonas, la caliza, cuyo Principal componente es el CaCO<sub>3</sub> se descarboniza a una temperatura entre 800 °C. y 1000 °C, mediante la descomposición siguiente:



El CO<sub>2</sub> se pierde con los gases de escape, y queda únicamente dentro del horno, el CaO.

#### **2.4.2.1 Formación de aluminoferrito tetracálcico (C<sub>4</sub>AF).**

Se produce a partir de una fracción de CaO (cal viva) que se combina con Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, de lo cual resulta un líquido que acelera las reacciones de clinkerización producidas al comienzo, entre granos sólidos.

Este compuesto se caracteriza por una lenta velocidad de hidratación, en que desarrolla poco calor, con una escasísima contribución a las resistencias a cualquier edad, y por una buena durabilidad frente a los ataques químicos de los sulfatos. El C<sub>4</sub>AF escasea o prácticamente no existe en los cementos Pórtland blancos, y por el contrario, abunda en los cementos de moderado o de bajo calor de hidratación, en los cementos resistentes o moderadamente resistentes a sulfatos, y en los cementos fríos.

#### **2.4.2.2 Formación de aluminio tricalcico (C<sub>3</sub>A).**

Cuando se combinado todo el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para formar C<sub>4</sub>AF, la última Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que queda se combina con una fracción de CaO (cal) para dar C<sub>3</sub>A. El C<sub>3</sub>A posee una gran velocidad de hidratación, que desarrolla mucho calor, es el constituyente que mas calor desprende. Este compuesto desempeña un papel importante para la resistencia a corto plazo y no libera cal en su hidratación, sino que, por el contrario, fija una cierta proporción la cal liberada por los dos silicatos. Es muy sensible a los sulfatos en general (aguas selenitosas). Es el constituyente causante del fraguado rápido del cemento para retardar, regular y normalizar el fraguado.

El clínker es la transformación físico-química de las mezclas por la acción del calor, donde se combinan los materiales que componen, y se forman óxidos que comprenden de 95 a 96 % del total de los óxidos formados, son: CaO (óxido de calcio), SiO<sub>2</sub> (óxido silicio), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de aluminio) y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de hierro III)

Las reacciones de clinkerización se producen esencialmente, entre los cuatro elementos principales, los mencionados anteriormente, para formar silicatos dotados de propiedades hidráulicas.

Al avanzar la pasta desde la entrada del horno por el interior de este, primero, pierde el agua por evaporación: un poco mas lejos, la materia orgánica se quema y los carbonatos pierden su bióxido de carbono: una porción de los sulfatos se volatilizan parcialmente. Únicamente en las ultimas fases de la cocción se forman líquidos que provocan reacciones, y estas, a su vez, actual en la formación de los compuestos clínker.

Dichas reacciones son, en parte bastante complejas y dan como resultado la composición mineralógica de dicho clínker. A continuación daremos una explicación simplificada de ellas en la figura 2.1.

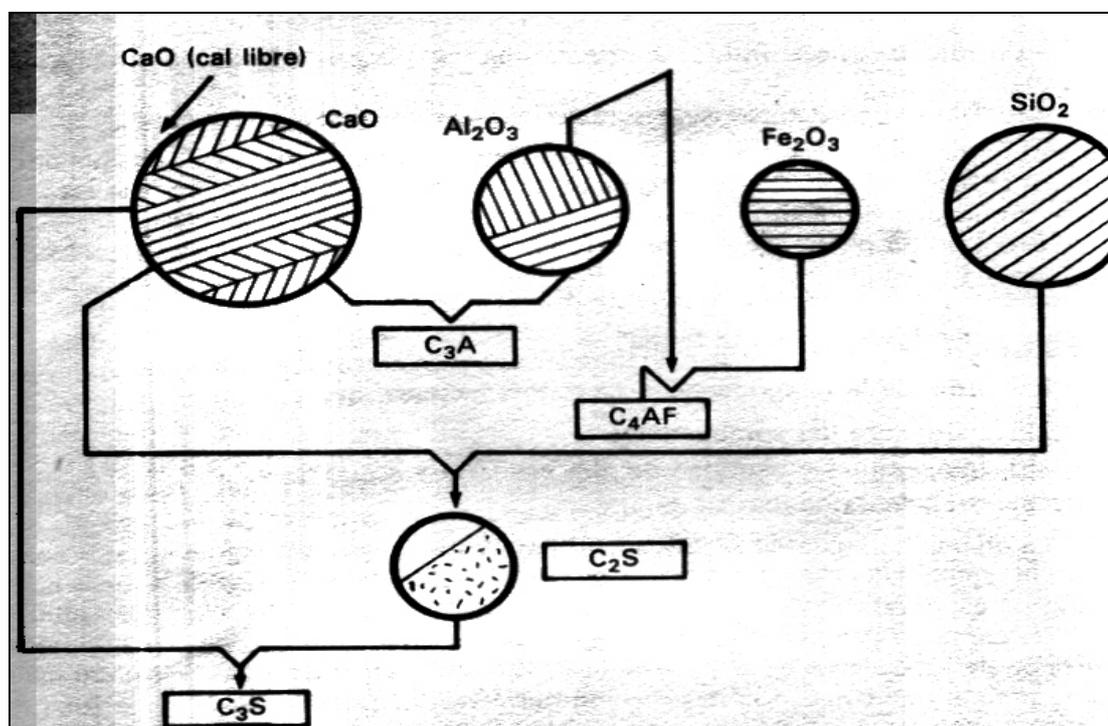


Figura 2.1. Esquema simplificado de la formación de los elementos principales del clínker.

### Control del Clínker

Si la temperatura de calcinación ha sido muy baja, el clínker una vez enfriado será amarillento y de apariencia terrosa: por lo tanto, no ha clinkerizado bien o un

numero de reacciones no han llegado a completarse, Este clínker se llama incocido y probablemente el cemento tendrá poca estabilidad de volumen, debido a la presencia de la cal que ha quedado sin combinarse, y no alcanzara la resistencia normal, pues en realidad es una mezcla cemento incompletamente combinado.

## Porcentaje de silicatos

Las relaciones entre los diferentes silicatos se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Aluminatos y ferritos del clínker.

Clínker	Porcentaje
Silicato	75
Tricalcico	50
Bicalcico	25
Aluminatos y ferritos	20
Aluminato Tricalcico	10
Alumoferrito tetracálcico	10
Resto	5
Total	100

En la tabla 2.2 se muestran los diferentes porcentajes de los restantes componentes del clínker.

Tabla 2.2. Porcentaje de otros componentes del clínker

Resto	Porcentaje
Cal libre	2
Magnesio	2
Compuestos alcalinas	1
Total	5

En la tabla 2.3 se muestran los porcentajes de variación de los componentes del clinker.

Tabla 2.3. Variación del rango de porcentaje de los componentes del clinker.

Clínker	Porcentaje
Silicato tricalcico	30-60
Silicato bicalcico	20-40
Aluminato tricalcico	0-15
Alumoferrito	0-20
Cal libre	0-2
Magnesio	1-4
Compuestos alcalinos	0,5-2,5

Si la temperatura es mas elevada de lo necesario, el clínker estará más fundido y será duro de moler. No hay ninguna ventaja en calcinarlo excesivamente y trae consigo un innecesario gasto de combustible.

Un clínker calcinado como es debido presenta apariencia de bolas pequeñas, irregularmente redondas, de un negro aterciopelado y gris negruzco y muestra muchos cristalitos brillantes.

El horno se carga bajo la vigilancia del hornero. Con la responsabilidad de que la mezcla se calcine adecuadamente, para obtener el máximo rendimiento de un buen clínker.

Se puede obtener el funcionamiento optimo, si regularemos bien la velocidad del horno, la entrada del material, el tiro, el combustible empleado, la entrada del aire y el calor producido.

Las condiciones para obtener el funcionamiento se establecen por observación visual del hornero encargada de atender esta labor, quien observa la temperatura

del clínker en la región mas caliente del horno, por la inspección del clínker frío y por la observación frecuente y continua de los instrumentos de control y los análisis de los gases que salen del horno

### **2.4.3 La molienda del producto calcinado**

En la operación de moler clínker y yeso, se utilizan molinos de bolas: la operación es idéntica a la molienda de crudo y se lleva a cabo en molinos semejantes.

El clínker una vez enfriado, se muele junto con una cantidad de yeso que oscila entre 3 y 5 %. El clínker y el yeso se llevan a los molinos bajo una granulometría de 0 a 25 mm, por alimentadores.

Al clínker se le adiciona una cantidad de yeso y se muelen juntos, hasta lograr la finura deseada. La función que realiza el yeso es controlar el fraguado del clínker hasta el tiempo requerido, para poder trabajarlo en las obras de construcción.

Un cemento que no contenga la cantidad necesaria de yeso, o sea, un cemento producido moliendo clínker solamente, fraguara en pocos minutos, y no permitiría su empleo conveniente en las obras. El yeso no solamente regula el fraguado, sino que tiene un papel importante en la resistencia inicial del cemento, así como en la estabilidad del volumen.

Cuando se utilizan las cantidades optimas, se consiguen las máximas resistencias en el cemento. Cuando al clínker se le adicionan puzolanas molidas conjuntamente, se produce el llamado cemento puzolánico. La puzolana debe estar siempre en una cantidad no menor de 15 % al 40 %.

## **2.5. Descripción de los procesos de hidratación, fraguado y endurecimiento**

Las propiedades de los productos obtenidos por el uso del cemento pueden variar debido a las dosificaciones y el control de los procesos de hidratación, fraguado y endurecimiento.

### **2.5.1 Proceso de Hidratación del cemento**

El apagada de cal consiste en la hidratación del óxido de calcio tratado con agua, la cal viva en terrenos: 950 Kj/Kg. En el proceso de hidratación, los pedazos de cal viva se dispersan espontáneamente, disgregándose en partículas finas de  $\text{Ca(OH)}_2$  con tamaños de unos cuantos micrómetros (más finas que en el cemento). la cal aérea es el único aglomerante que se transforma al estado finamente disperso mediante la dispersión química

### **2.5.2 Proceso de fraguado del cemento**

Fraguado se considera como el proceso físico-químico por el cual la masa inicialmente fluida pasa a más consistente sin variar de forma.

El cemento es una mezcla de sustancias químicas que, en contacto con agua, reaccionan y forman nuevos compuestos que posteriormente se fraguan y endurecen. La mezcla de cemento y agua permanece en estado fluido un cierto tiempo, que depende de varias causas y las principales son: la naturaleza del cemento y la cantidad de agua.

Pasado unos minutos, nunca antes de 45, la pasta empieza solidificarse y es precisamente en este momento, cuando se dice se empieza el fraguado. Cuando la pasta se ha solidificado totalmente y alcanza una cierta consistencia, que se puede determinar en el laboratorio con el auxilio de determinados equipos, por ejemplo, el aparato de Vicat, es cuando se considera que ha terminado el fraguado y este deberá ocurrir entre las 10 y 12 h de amasado.

### **2.5.3 Endurecimiento**

En esta fase el cemento aumenta su resistencia mecánica. El endurecimiento inicial es producido por la reacción del agua, yeso y aluminato tricalcico, formando una estructura cristalina de calcio-aluminio-hidrato, estrigita y monosulfato. El sucesivo endurecimiento y el desarrollo de fuerzas internas de tensión derivan de la reacción más lenta del agua con el silicato de tricalcio formando una estructura

amorfa llamada calcio-silicato-hidrato. En ambos casos, las estructuras que se forman envuelven y fijan los granos de los materiales presentes en la mezcla. Una última reacción produce el gel de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Los procesos son energéticamente exotérmicos.

### **Conclusiones parciales**

De acuerdo a los análisis del capítulo se observó:

- La elección de la vía tecnológica depende de la humedad de la materia prima en la cantera.
- La finalidad del proceso de preparación de las materias primas es convertirlas en un polvo y homogeneizar.

## **CAPITULO III.**

### **ANALISIS Y DISCUSION DE LAS TECNOLOGIAS DE PRODUCCION DEL CEMENTO.**

#### **Introducción**

Según el análisis de la información compilada sobre los procesos tecnológicos de la producción de cemento, se hace una comparación lógica desde el punto de vista técnico-económico de algunas de las operaciones fundamentales de la producción de cemento. Estos resultados son relevantes a los procesos de preparación de la materia prima, la calcinación, módulos de la dosificación y la molienda para el producto final.

#### **3.2 Resultados de la determinación de la calcinación.**

Temperatura de calcinación, duración del proceso, tipos del horno, zonas de Calcinación.

La siguiente etapa es la cocción de la materia prima. En el método por vía seca, la harina almacenada en los silos de homogenización se lleva a una torre de precalentamiento, que tiene una temperatura entre 900 y 1 000 °C. El calor proviene de los gases producidos por la combustión del combustible del horno, el cual puede ser carbón, gas o aceites combustibles. El objetivo del precalentamiento es el de ahorrar energía, ya que se aprovecha el calor emanado por los hornos. En el método de vía húmeda no se precalienta la pasta, sino que ésta es transportada por bombas centrífugas a los hornos.

En ambos casos se lleva el material a un horno, el cual es un largo cilindro de acero revestido interiormente con ladrillos refractarios, y que gira alrededor de su eje longitudinal, con una pequeña pendiente descendente.

La velocidad de rotación varía de 0 a 150 revoluciones por hora, y a través de ese movimiento el material experimenta sus reacciones químicas para formar los compuestos del clínker.

En el horno se distinguen las siguientes etapas, las cuales son: secado, calcinación, clinkerización y enfriamiento.

#### El secado:

Se presenta en el material proveniente del método de vía húmeda.

#### Calcinación:

En esta zona de calcinación los carbonatos de calcio y de magnesio se disocian en óxido de calcio y magnesio respectivamente.

#### Clinkerización:

En la etapa de clinkerización es donde se producen las reacciones químicas más complejas del proceso, transformándose la materia prima en un nuevo material llamado clínker, que tiene la forma de pelet verde-grisáceos de unos 12 mm de diámetro.

### **3.3 Resultados de la molienda del cemento**

La fabricación del cemento, requiere del Clínker fabricado en los hornos. Además del yeso que permite regular el fraguado de la mezcla de cemento con agua y adiciones como Puzolana y cenizas de centrales térmicas, que dan propiedades hidráulicas especiales al producto final.

Todos estos materiales son dosificados y posteriormente mezclados y molidos en dos grandes molinos de bolas de dos cámaras y diafragma intermedio, que permiten reducir el tamaño de los componentes hasta polvo fino.

El circuito de molienda consta además de separadores de última generación y filtros de mangas, que permiten separar el producto de la corriente de aire de ventilación.

La calidad y propiedades del cemento, quedan determinadas por la participación de cada uno de estos componentes, así como de la fineza final del producto.

### **3.4 Propuesta de la dosificación de la materia prima para el cemento.**

Para obtener una materia prima con la proporción adecuada de cada uno de los componentes, con el fin de conseguir un clínker de características determinadas, se han ideado muchos sistemas. Desde que se introdujeron los métodos de cálculo de Bogue para la constitución del clínker, se ha intentado caracterizar un cemento por la relación de los grupos ácidos y los grupos básicos. Se llama "**Índice**" a la relación grupo ácido/grupo básico y "**Módulo**" a la inversa, grupo básico/grupo ácido.

**Índice Hidráulico:**

$$I = \frac{S + A + F \text{ (arcilla)}}{C + M \text{ (caliza)}}$$

Este índice es teórico, pues inciden otras variables en el poder hidráulico, tales como la composición, la temperatura de cocción, entre otras. El valor del Índice Hidráulico varía entre 0,5 y 0,4 para los cementos Pórtland.

**Módulo Hidráulico:**

$$MH = \frac{C}{S + F + A}$$

Su valor viene dado en normas muy antiguas; en la práctica, el valor óptimo está comprendido entre 1,7 y 2,2. Cuando el MH es inferior a 1,7 el cemento tiene resistencias muy bajas y cuando el valor es superior a 2,2 el cemento, una vez puesto en obra, sufre a los pocos días o semanas un fenómeno de agrietamiento; las grietas aparecen centrífugas.

**Módulo de Silicatos:**

$$MS = \frac{S}{F + A}$$

Cuanto mayor es el valor de este módulo, mayor es el contenido de silicatos del clínker y menor el de aluminatos. A mayor valor del MS, mayores resistencias, dentro de los límites comprendidos entre 1,5 y 3,5, pudiendo llegar a 4,0 pero da lugar a dificultades en la cocción.

**Módulo de Fundentes:**

$$MF = \frac{A}{F}$$

Su valor es indiferente en cuanto a resistencias, pero sí tiene gran importancia con la mayor o menor facilidad de cocción de los crudos. Este módulo es interesante para la obtención de cementos resistentes a los sulfatos. La norma vigente limita el C<sub>3</sub>A en los cementos con las características especiales de resistentes a los sulfatos y al agua de mar.

**Módulo "Standard de Cal":**

$$Kst = \frac{C}{2.8 S + 1.1 A + 0.7 F}$$

Empleado hoy día para el cálculo del contenido óptimo de cal. Un contenido alto de cal en el crudo da propiedades más favorables, principalmente en lo que se refiere a resistencias del cemento. Si existiese un exceso de cal no combinada en el clínker (CaO, cal libre) ésta daría lugar a expansiones. El contenido de cal debe ser, pues, alto pero no excesivo. Para formar el *crudo* es necesario determinar las proporciones en que intervienen las distintas materias primas (es decir, la dosificación). Será necesario conocer la composición química de cada uno de los componentes y comprobar si sus módulos de silicatos y de fundentes se encuentran dentro de los límites normales. Si no fuese así, habría que pensar en aportar correctores de composición de la materia prima que compensen esas deficiencias.

Entre los **métodos de dosificación de crudos** cabe citar:

**Regla de los Carbonatos.** Es un procedimiento rápido para preparar un crudo con un contenido de carbonato cálcico determinado, conociendo el contenido de carbonato cálcico de cada uno de los componentes.

- **Cálculo basado en el contenido de cal.** Se basa en la obtención de un contenido de cal, previamente fijado, en el clínker.
- **Cálculo basado en el Módulo Hidráulico.** Relaciona la cal que le falta a la arcilla con la que le sobra a la caliza.
- **Cálculo basado en la saturación en cal.** Se obtiene la relación necesaria entre la cal y la arcilla para que se saturen todos los componentes ácidos presentes en el crudo.

### **Conclusiones parciales.**

- Los procesos tecnológicos de la producción de cemento, desde el punto de vista técnico-económico están relacionados directamente con la preparación de la materia prima, la calcinación, módulos de la dosificación y la molienda para el producto final.

## **CAPITULO IV**

### **IMPACTO MEDIOAMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL**

#### **Introducción.**

Las instalaciones con hornos que emplean el proceso húmedo o seco para producir cemento de piedra caliza, y las que emplean agregado liviano para producirlo a partir de esquisto o pizarra utilizan hornos giratorios que elevan los materiales a temperaturas de 1 400 °C, y utilizan materias primas como: piedra caliza, arena sílice, arcilla, esquisto, marga y óxidos de calcio. Estas materias primas se reciben y se almacenan a granel. Usualmente, las plantas de cemento se ubican cerca de las canteras de piedra caliza a fin de reducir los costos de transporte de materia prima. Sea que están yuxtapuestos o no, los impactos ambientales de la operación de la cantera deben ser considerados durante la evaluación de los impactos del proceso de fabricación del cemento

El proceso de producción de cemento es uno de los que más afectan el medio ambiente y ponen en riesgo el ecosistema. Por lo tanto, aquí se explica en detalles su impacto medioambiental y se indica una propuesta de captación de polvos y purificación de los gases para reducir los índices de contaminación ambiental.

#### **4.1 Impacto medioambiental.**

Las plantas de cemento pueden tener impactos ambientales en lo que se relaciona con el manejo de los desechos, la tecnología y el proceso productivo que son muy apropiados para la reutilización o destrucción de una variedad de materiales residuales, incluyendo algunos desperdicios peligrosos. Asimismo, el polvo del horno que no se puede reciclar en la planta sirve para tratar los suelos, neutralizar los efluentes ácidos de las minas, estabilizar los desechos peligrosos o como relleno para el asfalto.

## **4.1.1 Impacto medioambiental en la industria del cemento.**

### **4.1.1.1 Impactos negativos - Medidas de atenuación.**

Los impactos ambientales negativos de las operaciones de cemento ocurren en las siguientes áreas del proceso: manejo y almacenamiento de los materiales, molienda, y emisiones durante el enfriamiento del horno y la escoria (partículas o "polvo del horno", gases de combustión que contienen CO y CO<sub>2</sub>, hidrocarburos, aldehídos, cetonas, y óxidos de azufre y nitrógeno). Los contaminantes hídricos se encuentran en los derrames del material de alimentación del horno (alto pH, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, principalmente potasio y sulfatos), y el agua de enfriamiento del proceso (calor residual). El escurrimiento y el líquido lixiviado de las áreas de almacenamiento de los materiales y de eliminación de los desechos puede ser una fuente de contaminantes para las aguas superficiales y freáticas.

El polvo, especialmente la sílice libre, constituye un riesgo importante para la salud de los empleados de la planta cuya exposición provoca la silicosis. Algunos de los impactos mencionados pueden ser evitados completamente, o atenuados más exitosamente, si se escoge el sitio de la planta con cuidado.

A continuación se cita los impactos ambientales y las medidas de atenuación recomendadas a seguir en la industria del cemento.

Entre los impactos negativos directos tenemos la selección del sitio, para lo que se proponen las siguientes medidas de atenuación:

- Ubicar la planta en un área industrial, de ser posible, a fin de reducir o concentrar la carga sobre los servicios ambientales locales y facilitar el monitoreo de los efluentes.
- Integrar la participación de las agencias de los recursos naturales en el proceso de la selección del sitio, a fin de estudiar las alternativas.

- El proceso de la selección del sitio debe examinar las alternativas que reducen los efectos ambientales y no excluyan el uso beneficioso de la extensión de agua.
- Las plantas que reduzcan descargas líquidas, no deben ubicarse en ningún río que no tenga la capacidad adecuada para absorber los desechos.

Ubicarla en un área que no está sujeta a inversiones o “atropamiento” de los contaminantes, y donde los vientos predominantes se dirijan hacia las áreas relativamente despobladas.

La selección del sitio debe evaluar la ubicación según los siguientes lineamientos:

- O el lote debe ser de un tamaño suficiente que permita eliminar los desechos en el sitio;
- O la planta debe estar cerca de un depósito para la eliminación de desechos;
- O la ubicación debe ser conveniente para que los contratistas públicos privados puedan recolectar y transportar los desechos sólidos al sitio donde serán eliminados definitivamente;

El análisis de laboratorio de los efluentes debe incluir los sólidos totales disueltos, los sólidos totales suspendidos, las sales, la alcalinidad, el potasio, los sulfatos y el monitoreo in-situ del pH y la temperatura.

Es necesario el cumplimiento de las siguientes reglas para todas las plantas:

- No debe haber ninguna descarga de agua de enfriamiento. Si no es factible reciclarla, se puede descargar el agua de enfriamiento, siempre que la temperatura del agua que la recibe no suba más de 3 °C;
- No debe haber ninguna descarga del agua de lavado, ni los derrames del tanque de la lechada;
- Mantener el pH del efluente entre 6, 0 y 9, 0

Para las plantas que no realizan lixiviación deben cumplir con los siguientes parámetros:

- Sólidos totales suspendidos < 5 g/t de producto
- Sólidos totales disueltos, su concentración no debe ser mayor que la del agua que ingresa a la planta.

Las Plantas que realizan lixiviación deben cumplir con los siguientes parámetros:

- Sólidos Totales Suspendidos < 150 g/t de producto
- Sólidos Totales Disueltos < 1.5 Kg. /t de producto.

Las Pilas de acopio de materiales deben considerar:

- Reducir al mínimo la cantidad de lluvia que se filtra por los montones y se escurra de manera incontrolada.
- Revestir las áreas de almacenamiento

Para el lavado de equipos, caminos y otros se tomara en cuenta que:

- < 150 g/t de producto durante el lavado de los equipos o durante los períodos de lluvia.
- Los procedimientos de limpieza de la planta deberán reflejar el nivel deseado de mitigación.

Para el control de emisiones de partículas:

- Controlar las partículas con filtros recolectores de tela
- Controlar las emisiones de partículas del horno con recolectores precipitadores electroestáticos de polvo, y emplear acondicionamiento con agua en las operaciones secas del proceso.

- Las partículas se deben controlar de la siguiente manera:
- Para el horno, 150 g/t de materia prima;
- Para el enfriador de escoria, 50 g/t de escoria;
- A nivel de la tierra fuera del perímetro de la planta, 80 mg/m<sup>3</sup>; Descarga de la chimenea.
- Las medidas de control incluyen: tratamiento de los caminos; rociado de agua en las pilas; el uso de una aspiradora industrial; el límite de velocidad de 20 km/h;
- El control con la acción natural de limpieza, que hacen los materiales alcalinos, mejorada mediante el uso de los hornos de precalentamiento, y los gases de escape, para secar la materia prima durante la molienda.
- Si se analiza la materia prima durante la etapa de factibilidad del proyecto, se puede determinar su contenido de azufre; de esta manera se puede diseñar correctamente los equipos que controlan las emisiones.

Dentro de la cerca de la planta se debe considerar los siguientes parámetros:

- Media aritmética anual: 100 mg/m<sup>3</sup>.
- Valor tope durante 24 horas 100 mg/m<sup>3</sup>.

Fuera del perímetro de la planta se debe considerar los siguientes parámetros:

- Media aritmética anual: 100 mg/m<sup>3</sup>.
- Valor tope durante 24 horas 600 mg/m<sup>3</sup>.

De ser posible, se debe efectuar la puesta en marcha en un momento en que el viento no esté soplando hacia las áreas pobladas, o ecológicamente frágiles.

Se debe diseñar el precipitador con cámaras paralelas a fin de utilizar una parte del equipo cuando la otra esté en reparación.

Si el precipitador está completamente fuera de servicio es necesario exigir la paralización del horno.

No obstante, los estudios han demostrado que la mayoría de los materiales orgánicos se destruyen con una eficiencia del 99.99 % y que el polvo del cemento absorbe los metales, los mismos que se acumulan luego en el sistema que controla la contaminación atmosférica por cuanto se considera que:

La incidencia de los accidentes es mayor que lo normal debido al nivel de experiencia de los trabajadores por lo que se debe tener cuidado y asegurarse que, (a) los desechos y aceites peligrosos se analicen antes de aprobarlos para la incineración, y (b) que se mantenga la eficiencia de combustión del horno. Así como también se deben introducir los desechos en el extremo “caliente” del horno.

Al diseñar los procedimientos de manejo de los desechos peligrosos y los planes de contingencia. Se debe controlar la filtración de agua lluvia y el escurrimiento desde las pilas de acopio de los materiales sólidos, del combustible y de los desechos, si se los cubre y/o emplea contención para prevenir su filtración hacia las aguas superficiales o subterráneas.

El tamaño de las áreas represadas debe ser suficiente para contener una lluvia normal de 24 horas.

La instalación debe implementar un Programa de Seguridad y Salud que incluya la identificación, evaluación, monitoreo y control de los peligros para la seguridad y la salud con un nivel específico de detalle, así como también considerar los peligros para la salud y seguridad de los trabajadores, proponer los procedimientos necesarios para proteger a los empleados y dar capacitación de seguridad al personal.

Es necesario planificar las áreas adecuadas para la eliminación en el sitio, o emplear el polvo del horno u otros subproductos como material de relleno local, luego de verificar si el líquido lixiviado tiene características peligrosas.

La selección del sitio puede atenuar algunos de estos problemas:

- Se deben preparar estudios especiales del sector de transporte durante el estudio de factibilidad del proyecto para seleccionar las mejores rutas y reducir los impactos.
- Reglamentar a los transportistas y diseñar planes de contingencia de emergencia para reducir el riesgo de accidentes durante el transporte de los combustibles residuales.

Impactos negativos.

- Planificar el uso de la piedra caliza, tomando en cuenta su disponibilidad e imponer restricciones sobre el trabajo realizado en la cantera.
- Coordinar con la agencia responsable, un estudio de las opciones de rescate una vez que la instalación salga del servicio.
- Planificar la restauración de la mina de piedra caliza.

#### **4.1.1.2 Emisiones de partículas a la atmósfera**

La fabricación de cemento incluye el transporte de materiales polvorientos o pulverizados desde la cantera de piedra caliza, hasta el embarque del producto terminado para su venta. Las partículas son la causa más importante del impacto ambiental negativo. Los precipitadores electrostáticos, o los filtros de manga, constituyen un requerimiento rutinario para controlar las emisiones de partículas de los hornos. El control del polvo que resulta del transporte de los materiales es uno de los desafíos más difíciles; las bandas transportadoras, pilas de acopio, y camiones de la planta, pueden ser las causas más importantes de degradación de la calidad del aire, que las emisiones del molino y el horno. Se deben emplear recolectores mecánicos de polvo donde sea práctico, por ejemplo, en los trituradores, transportadores y el sistema de carga. En la mayoría de los casos, el polvo recolectado puede ser reciclado, reduciendo el costo y disminuyendo la producción de desechos sólidos. Se puede mantener limpios los camiones de la planta con aspiradoras y/o rociadores, a fin de eliminar el polvo atmosférico causado por el tráfico y el viento. Deben ser cubiertas las pilas de acopio tanto

como sea posible. Los camiones que transportan materiales a la planta y fuera de ésta deben tener carpas y límites de velocidad.

#### **4.2.1 Uso de los hornos de cemento para reciclar o eliminar los desechos.**

Los desechos de aceite, solventes, residuos de pintura y otros desperdicios inflamables, han sido utilizados como combustibles suplementarios para los hornos de cemento. Esta práctica comenzó en los Estados Unidos en 1979, para conservar energía y reducir los costos de combustible, y ha sido satisfactorio en términos, tanto de la calidad del producto, como el impacto ambiental. Además, algunos desechos sólidos pueden ser utilizados como combustibles, tal como las llantas gastadas. Los requerimientos de materia prima pueden ser satisfechos, parcialmente, con los desperdicios (rutinariamente usados) de otras industrias: yeso de las plantas de ácido fosfórico, piritas cocinadas de la producción de ácido sulfúrico, escoria de los altos hornos, y ceniza de las plantas termoeléctricas a carbón.

#### **4.2.2 Combustibles Alternativos.**

Los hornos de cemento pueden ser calentados con carbón, petróleo o gas, o una combinación de estos. Los desechos pueden servir como combustible suplementario. Además, estas decisiones tienen implicaciones para la calidad ambiental y la magnitud de la inversión que se requerirá para controlar la contaminación.

##### **(a) Control de la contaminación atmosférica**

Alternativas para captar el polvo del horno:

1. precipitadores electrostáticos
2. filtro

Alternativas para captar el polvo del enfriador de la escoria:

1. filtro de cama granular;
2. precipitador
3. filtro

Alternativas para controlar el polvo de las otras operaciones:

1. Cubrir o encerrar los transportadores, trituradores, puntos de transferencia de los materiales, áreas de almacenamiento;
2. Instalar colectores mecánicos de polvo y/o filtros donde sean necesarios;
3. Pavimentar los caminos de la planta;
4. Emplear aspiradoras para limpiar las calles de la planta;
5. Rociadores para los caminos y pilas de acopio de la planta,
6. Emplear el rociado de látex para estabilizar las pilas de acopio.

#### **(b) Control de la contaminación del agua**

1. Reciclar el agua residual del proceso húmedo por el horno;
2. Torres y piscinas de enfriamiento;
3. Controlar con diques el escurrimiento de las pilas de desechos y materia prima;
4. Controlar con forros la infiltración de las pilas de desechos y materia prima.

## **4.2 Seguridad industrial.**

Atendiendo a su papel en las entidades industriales, la seguridad industrial es entendida como la protección ante el riesgo, la higiene del trabajo y la seguridad técnica, siendo prioritaria con relación a todas las demás consideraciones de las actividades laborales.

Por tanto la seguridad industrial, constituye un sistema, siendo sus objetivos los siguientes:

### **Objetivos del sistema de seguridad industrial.**

- Formar una alta cultura de seguridad industrial en todo el personal obrero, técnico y dirigente.
- Mantener los niveles de riesgo tan bajos como pueda razonablemente alcanzarse, teniendo en cuenta factores económicos y sociales.
- Minimizar los accidentes, enfermedades y sus consecuencias para la industria y la sociedad.
- Determinar las responsabilidades de los dirigentes y mandos intermedios en la organización y ejecución de cada una de las actividades relacionadas con la seguridad industrial.

#### **Requisitos de la seguridad industrial.**

- Sustitución de métodos secos por húmedos en los procesos con producción de polvo.
- Sustitución de sistemas de calentamiento con llamas abiertas por el sistema eléctrico y de combustibles sólidos o líquidos por gaseosos.
- Limitar impurezas de sustancias nocivas en los productos iniciales y finales.
- Empleo de tecnologías de producciones modernas, que excluyan la posibilidad de contacto del trabajador con las sustancias nocivas.
- Selección adecuada del medio de trabajo e instalaciones tecnológicas que no permitan las emanaciones de las sustancias nocivas al aire de la zona de trabajo.
- Planificación racional de las instalaciones industriales, edificios y otros.
- Empleo de sistemas adecuados para captar, recuperar, purificar y utilizar las sustancias emanadas del proceso tecnológico y neutralización de los residuales sólidos, líquidos y gaseosos.
- Empleo de medios técnicos y automáticos para la protección contra incendios, explosiones y control de sustancias nocivas.
- Empleo de instalaciones de ventilación, alcantarillados, canalización etc.

- Control de concentraciones de sustancias nocivas en el aire de trabajo según los requisitos normativos establecidos.
- Incluir las características toxicológicas de las sustancias nocivas en las normas e instrucciones.
- Empleo de los medios de protección individual.
- Elaborar las reglas de protección e higiene en cada puesto de trabajo donde se usan sustancias nocivas.
- Realizar exámenes médicos preempleo y periódicos al personal expuesto a sustancias nocivas.
- Elaborar las contraindicaciones médicas para el trabajo con sustancias nocivas.

### **4.3 Propuesta de un esquema de captación de polvos y purificación de gases.**

#### **Sistema de desempolvado y clasificación de partículas.**

En todos los centros industriales donde haya presencia de polvos, producto de proceso de producción, deben existir sistemas de desempolvado, tales como: filtros de mangas, electrofiltros y ciclones.

Estos sistemas garantizan, en primer lugar, que la atmósfera se encuentre libre de contaminación, beneficiando las condiciones de trabajo de los obreros, así como las molestias a la población, en caso que la industria se encuentre cerca de la ciudad.

En segunda lugar, el desprendimiento de polvo origina pérdida de materia no despreciables que pueden recuperar con estos sistemas de desempolvado.

También existen sistemas de clasificación de partículas, que consiste en utilizar la fuerza de gravedad y la fuerza de centrifuga, por medio neumáticos. Los equipos de estos sistemas son: separadores neumáticos de tipo estático y tipo dinámico.

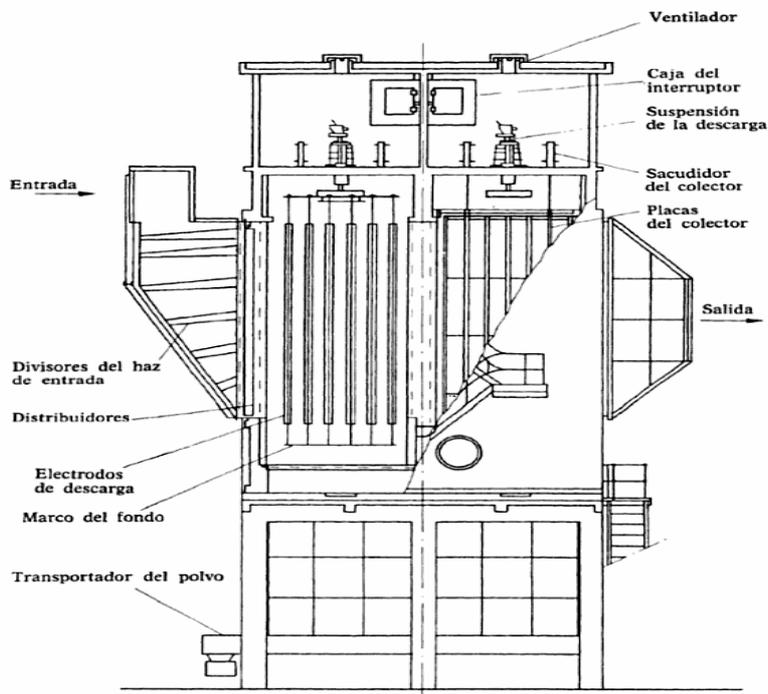


FIG. 8.18. Electrofiltro típico de proceso seco.

Se representa un dibujo seccionado de un precipitador tipo seco, es decir, un precipitador en que el polvo se deposita en estado seco y se transfiere a las tolvas mediante sacudida o vibración de los electrodos. En el extremo de entrada de la envoltura hay un sistema de distribución de gas, formado por diversos triangulares, que hacen girar el gas a través desde la vertical a la horizontal y ayudan a mantener uniforme la velocidad del gas a través de la superficie total de los electrodos. A continuación de los distribuidores triangulares, el gas atraviesa los distribuidores de orificio, que tienen un efecto final de alisamiento del flujo de gas. El diseño de estos sistemas de distribución está determinado por los modelos de flujos obtenidos utilizando técnicas estándares de túnel de viento, para asegurar que el gas que entra en el campo eléctrico se halla dentro del 25 % del valor promedio. Esto se acepta generalmente como el límite práctico de lo posible, y constituye una mejora sobre los viejos sistemas, que comprendían placas perforadas que se suponía controlaban bien el flujo.

## **Conclusiones.**

- La materia prima esencial para la producción de cemento es la caliza y la arcilla, estos se diferencian por la composición química, características mecánicas, por su comportamiento durante la hidratación, fraguado y endurecimiento. Los cementos se endurecen por evaporación de los líquidos y otra parte de ellos debido a la reacción con el oxígeno y el dióxido de carbono de la atmósfera.
- La elección de la vía tecnológica depende de la humedad de la materia prima en la cantera y la finalidad del proceso de preparación de las materias primas es convertirlas en un polvo y homogeneizado.
- Los procesos tecnológicos de la producción de cemento, desde el punto de vista técnico-económico están relacionados directamente con la preparación de la materia prima, la calcinación, módulos de la dosificación y la molienda para el producto final.

## **Recomendaciones**

- Continuar la investigación ó compilación de la información existente respecto a la producción de cemento a escala mundial y realizar la comparación con los métodos y las condiciones de producción de cemento en Uganda, aspecto este que no pudo ser tratado en este trabajo por no poder contar con la información necesaria de mi país de origen.
- Mantener los vínculos con el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa como vía para recibir su asesoría ante las situaciones que puedan presentarse

## **Bibliografía**

1. LABAHN, OTTO, Portuario del cemento, 3ra. ED., Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona, 1966.
2. PAPADAKIS, M. y M. VENUAT, Fabricación, características y aplicaciones de los diversos tipos de cementos.1ra. ed., Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona, 1968.
3. DE ASSUMPCAO, SANTOS, Fabricación de cemento.” Vía seca o via húmedo”, en la revista técnica Cemento Hormigón, No. 434, Barcelona, 1970.
4. TORRES, TRIANA, A., Tecnología de los refractarios, Ediciones de ciencia y Técnica, La habana, 1971.
5. United States Environmental Protection Agency. 1974. Development Document for Effluent Limitations, Guidelines. New Source Performance Standards for the Cement Manufacturing Point Source Category. Document No. EPAJ440/1 74 005a. Washington D.C.
6. ARREDONDO VERDÚ, FRANCISCO y otros, Aridos en la construcción, Ed.Científico-Técnica, La Habana, 1975.
7. CASTRO, MANUEL, ”Operación de un horno intercambiador,” en la revista Técnica Cemento hormigón, no. 498, Barcelona, 1975.
8. Organizaci6n de las Naciones Unidas para Desarrollo Industrial. 1977. Information Sources on the Cement and Concrete Industry. Guides to Information Sources, No. 2. New York.
9. World Bank. 1984. Cement Manufacturing Guidelines for Disposal of Waste. Office of Environmental Affairs, Washington D.C.: World Bank
10. Occupational Safety and Health Association. 1984. Industrial Hygiene Technical Manual, Occupational Safety and Health Administration Instructions, Washington D.C.: General Printing Office.

11. Beers, A. 1987. Hazardous Waste Incineration: The Cement Kiln Option. New York: State Legislative Commission on Toxic Substances and Hazardous Waste.
12. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias de Medio Ambiente. Prevención de la Contaminación en la pequeña y mediana empresa, [2003-05-10]. Disponible en: <http://www.cepis.opsoms.org/eswww/fulltext/epa/pcpeqind/pcpindic.html>
13. Curso de medicina del trabajo. MINSAP, La Habana: Editorial Orbe, 1971.
14. CORNEJO SUMA, JAIME. Gestión ambiental para desechos peligrosos o tóxicos, [2003-05-10]. Disponible en: <http://lauca.usach.cl/ima/hazard-w.htm>
15. Enfermedades profesionales. C.E.T.S.S. La Habana, 1977
16. GARCÍA, J. Riesgos de los productos químicos corrosivos. Mapfre seguridad, 1993 Año 13. (50): 3-13
17. GARCÍA, J. Plan de emergencia contra derrames y fugas de productos químicos peligrosos. Mapfre seguridad, 1999. Año 19 (75): 3-13
18. GARCÍA, J. Parámetros útiles para la caracterización del riesgo químico. Mapfre seguridad., 1995. Año 15. (57):-----
19. GARCÍA, J: Seguridad en la manipulación de productos químicos en el laboratorio. Mapfre seguridad. 1991 Año 11 (41): 11-20
20. GLASSTONE. S. 1968. Tratado de Química Física. Edición Revolucionaria. La Habana, 1180 p.
21. GUERASIMOV, Y. A. 1971. Curso de Química Física. Moscú: Editorial Mir. 2t.
22. Ingeniero Ambiental.com, [2003-06-10]. Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com>
23. ISO 14001:98. Sistemas de gestión ambiental. especificación y directrices para su uso.
24. MATOS, R Y R HING. Fundamentos de Química Física. La Habana: Editorial Pueblo y Educación., 1988.
25. PANREAC. (España). Catálogo de reactivos químicos. 1995
26. Problemas de toxicología. CAME, Moscú, 1982

27. SAXI, *Propiedades peligrosas de los materiales industriales*. Edición Revolucionaria. La Habana, 1971.

28. Seguridad industrial: Capítulo 05. En: *Manual para la organización y dirección técnica de la producción*, MINBAS, 1998:

### **Referencias**

Libro de Consulta para Evaluación Ambiental (Volumen I; II y III).

Trabajos Técnicos del Departamento de Medio Ambiente del Banco Mundial

.Malgarejo, Joan-Carles, Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada. Ed. Universidad de Barcelona.

.<http://www.google.com/portland-cemento>.

<http://www.wikipedia/Cemento.xhtml>.