

10



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**“IMPACTO ECONÓMICO EN LA ELABORACIÓN DEL
CEMENTO PORTLAND AL OPTIMIZAR LAS
CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LA
HARINA CRUDA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER ÉL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

JONATHAN JIMÉNEZ MARTÍNEZ

ASESORES: DR. EN QUÍMICA JUAN MANUEL ACEVES HERNÁNDEZ
I.Q. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ MARTINES.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

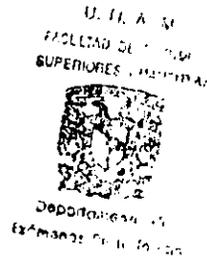
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES



ESTADO NACIONAL
AZTLA
MEXICO

AFIRMO VOTOS APROBATORIOS



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
P R E S E N T E

ATN. Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos:

La tesis: Impacto económico en la elaboración del Cemento Portland al optimizar las características fisicoquímicas de la harina cruda

que presenta el pasante: Jonathán Jiménez Martínez

con número de cuenta: 9561179-4 para obtener el título de:
Ingeniero Químico

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 18 de septiembre de 2000.

PRESIDENTE	Dr. Juan Manuel Aceves Hernández	
VOCAL	L.M. Rafael Sampere Morales	
SECRETARIO	L.O. Ariel Bautista Salgado	
PRIMER SUPLENTE	L.O. Graciela Delgadillo García	
SEGUNDO SUPLENTE	L.O. Gilberto Milano Amaya Ventura	

DEDICATORIA DE LA TESIS.

Dedico esta tesis a todas las personas que me han animado todo este tiempo. En primer lugar, a mis padres, quienes me han dado todo su apoyo para que yo lograra cumplir con mis metas. A mis asesores, que me apoyaron con sus conocimientos y me proporcionaron una gran cantidad de ideas, a mis amigos, que me animaron todo este tiempo y a mis maestros, que me han pasado sus conocimientos.

A mis papas José Ernesto y Alicia, les doy las gracias por el apoyo y el soporte que han sido para mí, durante todos mis años de estudios.

Un agradecimiento especial para mi tío, Francisco Javier Sánchez Martínez, que puso toda su experiencia a mi disposición, y que me orientó durante el tiempo que empleé para desarrollar esta Tesis.

También agradezco el apoyo que me ha proporcionado mi asesor, el Dr. Juan Manuel Aceves Mejía, en la realización de este trabajo.

Un profundo agradecimiento a todos mis amigos, quienes me han echado muchas porras y ánimos durante toda la carrera.

Un agradecimiento enorme a toda la generación de IQ 22, quienes me han dado su apoyo y su amistad durante todo el tiempo de la carrera y durante el tiempo que utilice para escribir esta tesis.

PROLOGO.

México es un país que cuenta con una gran reserva de materias primas, entre las que se cuentan el petróleo, la plata y los minerales necesarios para la elaboración del Cemento.

El Cemento es utilizado en la actualidad para la construcción de las grandes y pequeñas ciudades, y de otras obras arquitectónicas que se han vuelto esenciales en el desarrollo de la vida moderna. Para poder permanecer en este mercado tan competitivo, es necesario ofrecer un Cemento que cumpla con características de resistencia y durabilidad, y que tenga otras características tales que le permitan permanecer sin daño ante el ataque de los compuestos de la atmósfera moderna, como son los carbonatos, los cloruros y la lluvia ácida.

Con el fin de elaborar un Cemento que cumpla con estos requerimientos, es necesario conocer las características con las que se extrae la materia prima, debido a que no todas las formaciones de piedra caliza tienen una aplicación dentro de la Industria cementera, y para poder obtener un producto con las características deseadas a un costo accesible, es menester trabajar con el material adecuado.

Esta tesis está enfocada a los cambios que se deben hacer y a los puntos del proceso que se deben vigilar para disminuir los costos de la producción del Cemento, manteniendo al mismo tiempo las características de calidad con las que debe contar.

El análisis de esta tesis está enfocado en la producción máxima de Clinker en condiciones de estabilidad operativa, los requerimientos necesarios para mantener una continuidad operativa, el consumo de combustible logrado al reducir la cantidad de calor requerido, la estabilidad y continuidad en los requerimientos químicos y mineralógicos, lo que proporciona un aseguramiento de la calidad, una reducción de los costos de mantenimiento en el sistema de calcinación y una notable reducción en las emisiones contaminantes al medio ambiente.

ÍNDICE

Capítulo	Página
◆ Capítulo I: Introducción.	4
◆ Capítulo II: Materias Primas Para la Elaboración del Cemento Portland.	6
1. Caliza.	6
2. Arcilla.	6
3. Mineral o Escoria de Fierro.	7
4. Yeso.	7
5. Materiales Correctores.	7
◆ Capítulo III: Breve Descripción del Proceso de Elaboración de Cemento.	9
1. Explotación de materias primas.	9
2. Trituración.	11
3. Prehomogeneización.	11
4. Preparación de Harina Cruda.	13
5. Homogeneización de la Harina Cruda.	14
6. Calcinación.	15
7. Molienda Final.	18
8. Envase y Embarque.	20
◆ Capítulo IV: Clinker y sus Características Fisicoquímicas.	21
1. Fases del Clinker.	23
2. Procesos de Hidratación.	24
3. Impurezas presentes en las fases del Clinker.	41
4. Cementos que se pueden obtener de los diferentes tipos de Clinker.	46
5. Factores de control de las materias primas para los diferentes tipos de Clinker.	49
◆ Capítulo V: Sistemas de Calcinación.	54
1. Proceso vía húmeda.	55
2. Proceso vía semi-húmeda.	56
3. Proceso vía semi-seca.	57
4. Proceso vía seca.	58
5. Refractarios y zonas del horno.	64
6. Metrología.	73

ÍNDICE

◆ Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.	81
1. Análisis químicos y físicos de la harina cruda alimentada en 15 Plantas cementeras.	82
2. Ecuaciones empíricas de temperatura de combinabilidad del Clinker.	84
3. Influencia de la heterogeneidad de la harina cruda en el potencial de resistencia del Clinker:	86
➤ Cantidad y estabilidad de producción.	
➤ Características químicas del Clinker.	
➤ Características físicas del Clinker.	
4. Ecuación empírica para predicción del desarrollo potencial de resistencia mecánica que tendrá el Clinker.	87
5. Efectos en la molienda de Cemento.	93
6. Pruebas para el aseguramiento de calidad del Cemento.	104
◆ Capítulo VII: Análisis de costos en un Paro de Horno.	112
1. Costos Directos y costos Indirectos.	112
2. Clinker no Producido.	112
3. Costos del Recubrimiento completo del Horno con Refractario.	113
4. Análisis de costos en las zonas del Horno.	117
5. Costos de Especialistas.	118
6. Enfriamiento del Horno.	119
7. Consumo de Combustible.	119
8. Calentamiento del Horno.	120
9. Principales costos Indirectos.	125
◆ Capítulo VIII: Análisis de costos en la molienda de Cemento y producción de Cementos Mezclados.	127
◆ Conclusiones.	132
◆ Bibliografía.	137
◆ Glosario	138

INTRODUCCIÓN.

La época moderna, en lo referente al área de la construcción, se caracteriza por lo monumental y atrevido de sus obras arquitectónicas. Las grandes ciudades crecen hacia arriba.

Concreto, Acero y Vidrio han venido conjugándose para estos grandes desarrollos. Un ejemplo típico se manifiesta en la Isla de Manhattan, al norte de la bahía de Nueva York, con 21.7 Km por 3.6 Km (57 Km cuadrados), en donde se encuentran la Torres Gemelas del Centro Mundial de Comercio, de 411.5 m. de altura, con 110 pisos. En extensión, el mayor conjunto urbanístico integral es el Centro Rockefeller, formado por 15 edificios, entre ellos la notable unidad recreativa de Radio City. Continuando el auge de la construcción se erigieron unos 500 nuevos rascacielos entre los que se cuentan los de Chase Manhattan, Time & Life, General Motors, Burroughs, Pfizer y Woolworth.

Otra característica que en la actualidad se exige para las construcciones, es la durabilidad del concreto en condiciones sanas, requisito indispensable para la perdurabilidad de las obras. Esta condición es cada vez más fuertemente exigida en virtud de la agresividad creciente de la atmósfera, sobre todo en las ciudades donde la contaminación con CO₂, NO_x y SO_x es alarmante. Como una solución, lograda a base de prolongadas y profundas investigaciones, se llega a la aplicación del "Concreto de Alto Comportamiento", al cual se le define como aquel concreto que tiene las propiedades deseadas para la obra específica y uniformidad que no se pueden obtener de forma rutinaria usando sólo los constituyentes tradicionales, con el mezclado, colocación y curado comunes.

Ya rebasamos el año 2000, por lo que el siglo pasado ya se volvió historia y la época actual presenta retos que requieren un cambio de mentalidad, tanto en el productor de Cemento, como en el fabricante de concreto, para poder satisfacer las necesidades particulares de los usuarios tanto en el aspecto de durabilidad de la construcción, como en el plano económico.

Para poder lograr el concreto con las características deseadas es vital contar con el Cemento adecuado. Al decir Cemento adecuado se habla tanto de las características físicas como químicas que debe tener, así como de su estabilidad en ellas (calidad).

Por lo tanto, el productor de Cemento debe entender e integrarse a la cadena de necesidades de la construcción.

Las empresas cementeras necesitan integrar aspectos de: Permanencia en el Mercado Actual y a Futuro, Calidad de Cemento y costos de Producción.

Para poder cumplir con estos objetivos, el desarrollo tecnológico dentro de la industria cementera debe tener un avance continuo.

Capítulo I: Introducción.

En el aspecto Permanencia en el Mercado a Futuro se debe ir satisfaciendo las necesidades del constructor, conforme estas se van presentando.

El aspecto de Calidad del Cemento involucra el cumplimiento de las Normas establecidas y de los acuerdos con el cliente para lograr la producción continua de un Cemento con las características solicitadas.

Los costos de Producción deben minimizarse sin menoscabo de la Calidad del Cemento para ser competitivos.

Es importante la modernización del Equipo Físico de Producción, pero la capacidad del Equipo Humano que labora en una empresa, así como su actitud y profesionalidad, son factores críticos para el logro de la visión y misión establecidos. La empresa debe ser Líder en el mercado que compete.

Siendo el Clinker Portland la base para la producción de Cemento, la atención máxima debe recaer sobre su elaboración, para poder lograr una calidad satisfactoria y costos mínimos de producción. Como una aportación dentro de esta área productiva, realizo el desarrollo del tema: **“Impacto Económico en la Elaboración de Cemento Portland al Optimizar las Características Fisicoquímicas de la Harina Cruda”**.

MATERIAS PRIMAS PARA LA ELABORACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.

En la producción de Cemento se pueden utilizar minerales de origen natural así como subproductos industriales, los cuales deben presentar una mínima σ (desviación estándar) en su composición química. Con esto se busca tener una proporción constante de los principales materiales, los cuales son: caliza, arcilla, mineral de hierro, Yeso, y en casos necesarios, materiales correctores, los cuales van a proporcionar los componentes necesarios para la elaboración del Cemento, es decir, óxido de calcio (CaO), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de silicio (SiO_2) y sulfato de calcio (CaSO_4).

Analizando cada material por separado, se tiene:

CALIZA

Es el aportador de carbonato de calcio, el cual es un componente ampliamente encontrado en la naturaleza. El carbonato de calcio de casi todas las formaciones geológicas está calificado para la producción de Cemento Portland, pero se deben tomar en cuenta sus características mineralógicas, para evitar invertir demasiados recursos en su extracción y molienda.

Es necesario que la caliza tenga un alto contenido de carbonato de calcio y que, de preferencia, se encuentre libre de contaminantes y además que sea lo más baja posible la concentración de óxido de magnesio, debido a los problemas que ocasionaran posteriormente al concreto, si se rebasan límites preestablecidos por las Normas Oficiales; el cuarzo debe evitarse, o permitir una cantidad mínima debido a su abrasividad y a su dificultad de combinación. Es importante explotar piedra caliza cuyo índice de molturabilidad sea alto, es decir, que sea fácil de triturar y moler, pues esto disminuye el consumo de energía eléctrica.

ARCILLA

Es el principal aportador de óxido de silicio y óxido de aluminio en la manufactura del Cemento. Generalmente su formación geológica es por sedimentación y está formada por la erosión de tierras alcalinas que contienen silicatos de aluminio y algunos productos de metamorfosis geológica, como son feldespatos y micas. Su composición química y sus características físicas son muy variables y puede encontrarse en forma de arcillas, lutitas, pizarras, etc.

La composición química de la arcilla puede variar desde la cercana a la arcilla pura, hasta la que contiene una considerable cantidad de compuestos contaminantes, como pueden ser: hidróxido de hierro, arena, sulfuro de hierro, carbonato de calcio, etc. El hidróxido de hierro es el principal agente colorante en las arcillas; También la materia orgánica puede darle diferentes colores. La arcilla

Capítulo II: Materias primas usadas en la elaboración del Cemento Portland.

sin impurezas y con un bajo contenido de óxido férrico es de color blanco y se le conoce como caolín.

Otros de los contaminantes encontrados en las arcillas son: óxido de magnesio, cantidades excesivas e irregulares de cuarzo, altas concentraciones de álcalis, sulfatos, sulfuros, etc.

Una de las características físicas más comunes de la arcilla es su alta capacidad de absorción y retención de agua, confiriéndole una consistencia pastosa y características plásticas y de alta adherencia, lo que dificulta su trituración.

MINERAL O ESCORIA DE FIERRO

Para ajustar la cantidad de óxido de hierro en la harina cruda se dosifican materiales que contengan óxido de hierro en cantidades mayores al 75%. Una fuente utilizada es la escoria de laminación resultante durante la producción de elementos de hierro en la industria respectiva con altos hornos. Esto es debido a su alto contenido en óxido de hierro y a que es fácil de moler y añadir al proceso.

YESO

El Yeso es empleado para controlar el tiempo de fraguado del Cemento y poder tener en el concreto el tiempo necesario para efectuar un correcto mezclado, acarreo, vaciado y terminado. Su composición química es principalmente de sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), denominado Yeso. También puede contener anhidrita, es decir, sulfato de calcio anhidro (CaSO_4). La cantidad Normal de adición de Yeso para la elaboración del Cemento se encuentra en el rango de 4 al 6%.

Su explotación es en canteras. El Yeso, como se le conoce genéricamente, contiene diversas impurezas, entre las que destacan calizas, dolomitas, arcillas, etc. Generalmente se emplea Yeso con bajo contenido de impurezas.

MATERIALES CORRECTORES

Si un componente químico esencial se requiere para mantener constante el porcentaje de determinado óxido dentro del diseño químico del Cemento, entonces se utilizan los materiales correctores.

Estos pueden ser arena sílica, arcilla con alto contenido de óxido de silicio, diatomita, etc., los cuales son utilizados para corregir el porcentaje de óxido de silicio.

Materiales como las cenizas de piritita o el mineral de hierro son utilizados para corregir el porcentaje de óxido de hierro.

Capítulo II: Materias primas usadas en la elaboración del Cemento Portland.

Las bentonitas y subproductos industriales con alto contenido de aluminio, se emplean para corregir el porcentaje de óxido de aluminio.

Existen otros componentes que si sobrepasan un límite pueden provocar expansión volumétrica en el concreto, causándole fracturas y pérdida de resistencia a la estructura arquitectónica; entre estos materiales se encuentran el óxido de Magnesio, óxido de sodio y óxido de potasio; el contenido de estos está controlado por Normas Nacionales y Normas Internacionales relacionadas con la Industria del Cemento.

En años recientes, los hornos para Cemento han sido empleados para utilizar subproductos industriales y para disponer de materiales de desecho industrial, contribuyendo ampliamente con el cuidado de la ecología. Dichos materiales incluyen:

Agentes de Ca	Caliza industrial. Pasta de caliza.	Pasta de carburo. Fango de agua tratada.
Agentes de Si	Arena de fundición.	Vapor de sílica.
Agentes de Fe	Piritas calcinadas. Hematita sintética. Barro rojo.	Escoria delgada. Polvo del colector de chimenea. Restos del molino.
Agentes de Si, Al, Ca	Ceniza volante del carbón. Ceniza del lecho fluidizado.	Escoria de alto horno. Residuos de piedra del trabajo.
Agentes de S	Desulfureso.	
Agentes de F	Pasta filtrada de CaF_2 .	

Las materias primas tomadas de la naturaleza contienen cantidades menores de varios compuestos, como son los óxidos de fósforo, titanio, cromo y manganeso, entre otros.

El uso de materiales de desperdicio para la elaboración del Cemento ha llevado a la incorporación de un amplio rango de elementos en trazas, cuyos efectos están siendo ampliamente estudiados por Departamentos Especializados en los laboratorios de Investigación, tanto de Universidades, como Gubernamentales.

BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE CEMENTO.

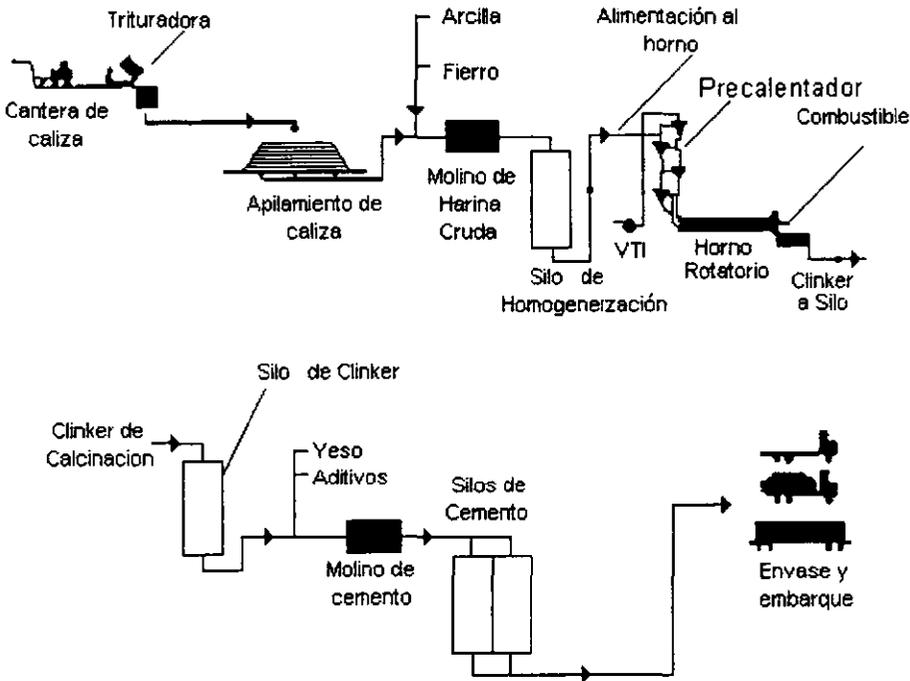


Figura 1: Diagrama esquemático del Proceso de Fabricación de Cemento Portland.

EXPLOTACIÓN Y TRANSPORTE DE MATERIAS PRIMAS.

Las principales materias primas en la elaboración del Cemento Portland son extraídas de grandes yacimientos al aire libre llamados canteras, las cuales generalmente se encuentran cerca de las Plantas Cementeras. El programa de explotación de dichas canteras se encuentra desarrollado para más de 200 años de explotación y se efectúa en forma escalonada para evitar accidentes, y además, proteger el medio ambiente evitando las emisiones de polvo, de ruido y vibraciones.

Primero se realizan estudios exploratorios (barrenación con barrenos de diamante) de gran profundidad para determinar las composiciones de las diferentes capas geológicas y poder realizar el programa de explotación a largo plazo, cubriendo éste el tiempo de vida útil del yacimiento. Para la explotación de la cantera se

Capítulo III: Breve descripción del proceso de elaboración de Cemento.

realizan barrenaciones programadas, consistiendo en perforaciones en sentido vertical con un diámetro de 7.5 a 12 cm, teniendo los barrenos una alineación paralela al frente del banco y una profundidad un poco mayor a la altura del escalón, también llamado banco, que puede ser de 8 a 20 metros. Una vez que se tienen todos los barrenos, se procede a la fase de detonación introduciendo en los barrenos los explosivos y procediendo a una detonación secuencial. De esta forma se obtienen rocas de diferentes tamaños, procurando que el tamaño máximo de roca no exceda de un metro de diámetro medio.

Una vez terminada la detonación, se utiliza un tractor o un cargador frontal para barrer el piso de trabajo para eliminar los fragmentos de roca esparcidos y proteger de esta manera las llantas de las unidades de carga y transporte. Se cargan los camiones con cargadores frontales equipados con cucharones de capacidad adecuada a la producción programada en dicha cantera; los cucharones pueden ser hasta de una capacidad de 16 toneladas. Las grandes unidades de transporte sólo se emplean dentro de la cantera, debido a sus dimensiones y se les conoce como "unidades fuera de carretera". También se utilizan transportes para carretera, los cuales son de menor tamaño, y son llenados con cargadores frontales con cucharones de capacidad máxima de 10 toneladas. Generalmente se utilizan equipos de carga y transporte que hagan "mancuerna", es decir, que mantengan una relación en el tamaño y capacidad. Los transportes son utilizados para llevar el material hasta las trituradoras.

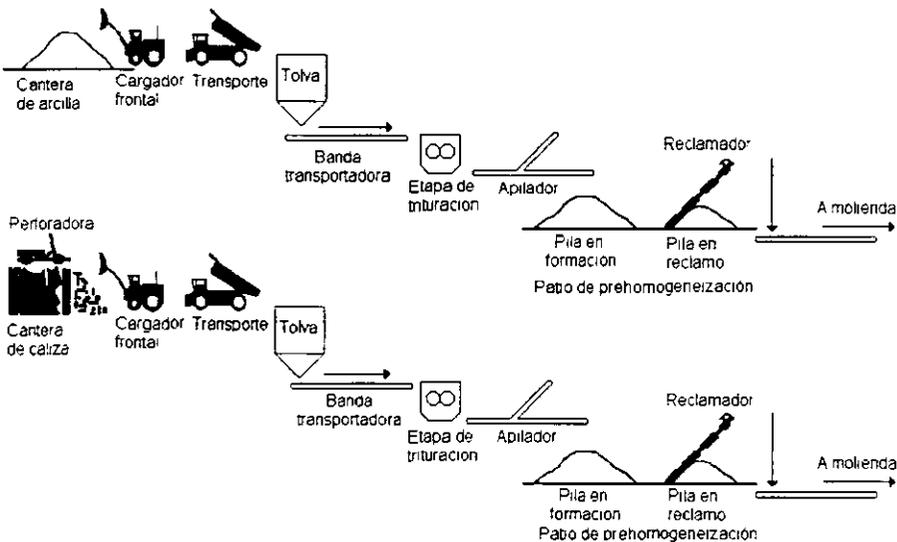


Figura 2: Diagrama esquemático de la operación unitaria de extracción de materias primas de cantera.

Capítulo III: Breve descripción del proceso de elaboración de Cemento.

TRITURACIÓN.

El material proveniente de la cantera debe ser triturado con el propósito de reducir su tamaño y poder transportarlo más fácil y económicamente, además, poder lograr una prehomogeneización que permita reducir las variaciones químicas naturales de las materias primas. Es recomendable que el tamaño máximo del material a la salida de etapa de trituración sea lo más pequeño posible, pero de acuerdo a los requerimientos del sistema de molienda que exista en la Planta. Para ello, la etapa de trituración podría utilizar diferente número de etapas o pasos. La trituradora puede ser, por su tipo: de mandíbulas, de cono, de rodillos, de impacto, de impacto combinado o de martillos-impacto.

El tipo de trituradora a emplear es específico para la cantera en cuestión, ya que las características del material a triturar (dureza, abrasión, tenacidad, capacidad de absorción de agua, plasticidad, etc.) serán quienes lo definan. El número de pasos de trituración será determinado por el tipo de trituradora y la relación de reducción que se requiera; $D(\text{inicial})/d(\text{final})$.

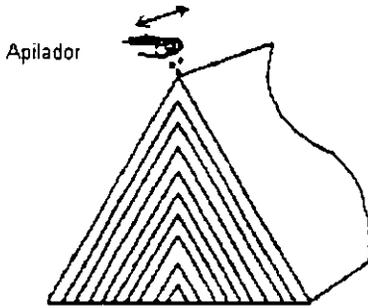
PREHOMOGENEIZACIÓN.

Es un proceso por el cual se reducen las variaciones de composición química en las materias primas y la variación que se genera a causa de la segregación de tamaños originada por la caída libre del material triturado a los patios de almacenamiento. Existen varios tipos de sistemas de prehomogeneización: apilamiento y reclamo circulares, apilamiento longitudinal, apilamiento paralelo longitudinal, etc.

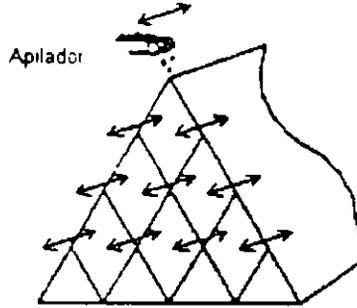
Los más empleados son los sistemas longitudinales. La mecánica operativa es la siguiente: Se lleva a cabo en almacenes rectangulares dotados de equipo adecuado para ir sobreponiendo pequeñas pilas de material hasta formar una gran pila. Estas se pueden realizar de manera longitudinal o transversal al almacén y son hechas por un apilador con recorridos continuos de ida y vuelta a lo largo del almacén, terminando cuando la pila alcanza su nivel de diseño.

La extracción de material se realiza por medio de un equipo llamado reclamador, el cual puede ser de cadena, cangilones o disco. Este toma el material (reclama) de tal manera, que sin importar la forma de apilamiento (Chevron o Windrow), el material que se extraiga contendrá siempre la misma proporción de finos y gruesos, conservando una homogeneidad en composición química y distribución de tamaños. El apilamiento Chevron se realiza colocando una capa de material de ida y vuelta, y elevando el apilador para colocar una nueva capa de material por encima de la primera; esto se realiza hasta que la pila alcanza la altura de diseño. El apilamiento Windrow se colocan pilas de ida y vuelta en forma paralela, y después se colocan nuevas pilas encima de las anteriores hasta que la pila alcanza la altura de diseño. El material reclamado es colocado en una banda transportadora y llevado a las tolvas de alimentación de los molinos para la preparación de harina cruda.

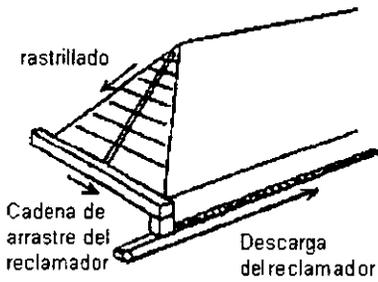
Capítulo III: Breve descripción del proceso de elaboración de Cemento.



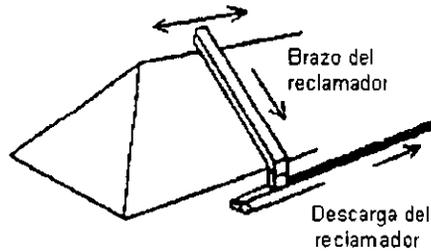
Apilamiento Chevron



Apilamiento Windrow



Reclamo frontal



Reclamo lateral

Figura 3: Tipos de apilamiento y reclamo.

PREPARACIÓN DE LA HARINA CRUDA.

La alimentación de las materias primas a los molinos se realiza mediante básculas dosificadoras ubicadas en la parte inferior de las tolvas de alimentación. Las materias primas, dosificadas, son llevadas a los molinos mediante bandas transportadoras.

Los molinos pueden ser de bolas o verticales de rodillos. En las Plantas modernas se están instalando los molinos verticales de rodillos debido a que presentan ventajas frente a los molinos de bolas, entre las que destacan: los molinos verticales pueden moler materiales con un tamaño hasta 5 veces mayor que los alimentados a los molinos de bolas; Requieren de menor espacio para su instalación; tienen menor consumo específico de energía (Kwh/ton); operativamente es fácil hacer correcciones químicas en el producto final, en virtud de que el tiempo de residencia del material en el interior del molino es menor; tienen el separador integrado en el interior del cuerpo del molino; requieren de menor mantenimiento; su nivel de ruido y de vibraciones es más bajo y pueden trabajar con una combinación en el número de rodillos.

En el molino vertical de rodillos, el material, por medio de una esclusa, es alimentado lateral o verticalmente al centro de la mesa de molienda, la cual gira por un sistema de transmisión motor-reductor, y lleva, por acción de la fuerza centrífuga, el material hasta los rodillos, los cuales pasan sobre él y lo muelen debido a las fuerzas de compresión desarrolladas por el peso propio del rodillo y por el sistema hidroneumático que lo posiciona.

El material cae por el perímetro de la mesa giratoria y es levantado por gases calientes introducidos por la parte inferior del molino y es transportado hasta el separador integrado al cuerpo del molino, donde el material fino de 75 micras o menor sale del molino por la parte superior y es conducido por los gases calientes hasta un sistema de separación, como puede ser: una batería de ciclones, un filtro de bolsas o un filtro electrostático; El material mayor de 75 micras es rechazado y retorna al centro de la mesa giratoria. A la cantidad de material que levanta la corriente de gases se le denomina "circulación interna".

El material grande en tamaño y que por su peso no puede ser levantado por la corriente de gases cae en el fondo del molino, por debajo de la mesa giratoria, y es desplazado mediante unas láminas atornilladas al cuerpo de la mesa giratoria, llamadas rascadores, las cuales llevan el material hasta una salida ubicada a un costado del molino, y por medio de un elevador de cangilones el material es transportado hasta la parte alta del cuerpo del molino y a través de canales o deslizadores es alimentado al separador. El material fino (75 micras o menor) que se encontraba dentro de este material grueso, es arrastrado por la corriente de gases y el material rechazado (mayor de 75 micras) cae al centro de la mesa giratoria. A la cantidad de material que levanta el elevador de cangilones, se le denomina "circulación externa".

Capítulo III: Breve descripción del proceso de elaboración de Cemento.

El material fino (menor de 75 micras) que transportó la corriente de gases y que posteriormente se separó de esta, se le denomina "Harina Cruda".

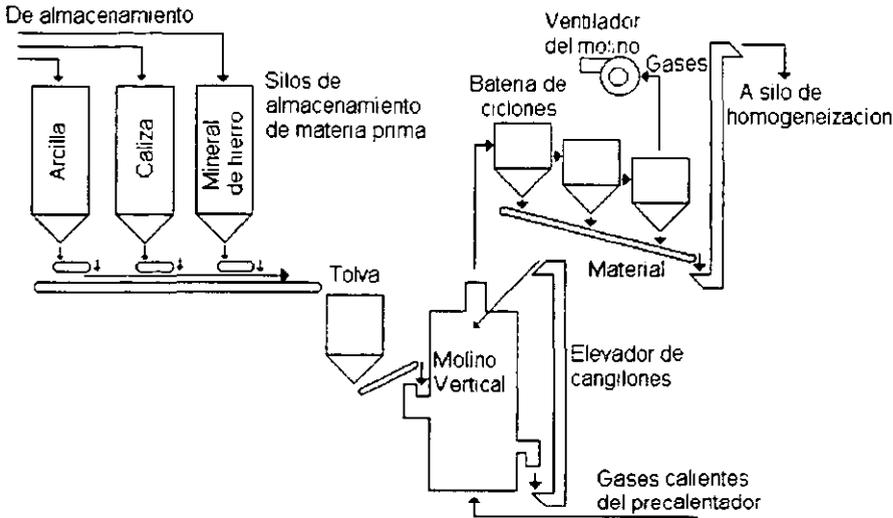


Figura 4: Diagrama esquemático de la operación unitaria de molienda de harina cruda.

HOMOGENEIZACIÓN DE LA HARINA CRUDA.

El propósito principal de la homogeneización es el de minimizar las variaciones físicas y químicas que presenta la harina cruda debido a las variaciones naturales en las materias primas o variaciones operativas dentro del proceso de molienda, así como del cambio de material o de lote utilizado, de forma tal que se entregue al proceso de calcinación una harina cruda uniforme para poder tener en este proceso estabilidad operativa y de calidad constante de producto.

La harina cruda proveniente de los molinos se transporta vía neumática o mecánica y se descarga en la parte superior de los silos de homogeneización, los cuales son grandes cilindros de concreto, equipados con sistemas de inyección de aire a presión por su parte inferior. El fondo del silo está cubierto con cajas de aireación equipadas con placa de material poroso, o bien, con cajas cubiertas en la parte superior con lona.

En algunos silos el fondo se encuentra dividido en 4, 6 u 8 sectores, en los cuales en la mitad del número de sectores se inyecta aire a alta presión (1.5 a 2 kg/cm^2 , denominado: aire de homogeneización) mientras en los otros sectores se inyecta aire a baja presión (0.5 a 1 kg/cm^2 , aire de aireación), y por medio de un mecanismo (válvula de 4 vías) equipado con un timer, cíclicamente se alterna la presión en los sectores, lográndose la homogeneización debido al movimiento del material, de un sector a otro, a causa de las diferentes densidades que adquiere

Capítulo III: Breve descripción del proceso de elaboración de Cemento.

como consecuencia de su contenido de aire. Los silos tienen una capacidad de entre 4 y 6 veces la cantidad de material que se debe alimentar al horno en 24 horas. El proceso puede ser tanto en lotes como continuo.

En los silos modernos de homogeneización la extracción se hace por medio de conos invertidos (6, 8 o 10) distribuidos en el fondo del silo. El material extraído pasa a una tolva central llamada "caja de mezcla". A este tipo de silos se les conoce como silos de "Flujo Controlado".

CALCINACIÓN.

El proceso de calcinación consta de un precalentador, un horno horizontal rotatorio, un enfriador y uno o dos ventiladores (en paralelo) de alta eficiencia.

El precalentador está formado por una serie de ciclones conectados en línea, montados en un edificio vertical. Cada ciclón es una etapa, a excepción de la etapa superior, en que generalmente existen dos ciclones. Existen precalentadores hasta con 6 etapas de ciclones. En los precalentadores se genera un intercambio de calor entre la harina cruda y los gases calientes provenientes del horno; El mayor intercambio de calor (80 a 85 %) se realiza en los ductos de gases que conectan a los ciclones. Los ciclones sirven para separar las partículas sólidas, de los gases calientes y lograr que mientras los gases calientes siguen un camino ascendente, el material sigue un camino descendente, hacia el horno.

El horno rotatorio es un cilindro de chapa de acero de diversos espesores, con un diámetro interior uniforme, encontrándose recubierto completamente con ladrillo refractario que puede tener entre 8 y 10 pulgadas de espesor. Dependiendo de la capacidad nominal de diseño, se tienen hornos (con precalentador) con diámetro interior hasta de 6 metros y una longitud que varía desde 60 hasta 100 metros. Dependiendo de la longitud del horno, este puede estar apoyado sobre 2, 3 o hasta 4 puntos de rodamiento formados por llantas metálicas envolventes al horno y apoyada cada una sobre 2 roles. De acuerdo a su diámetro, diseño y capacidad de producción, el horno gira de 2 a 3.5 rpm. El horno tiene una inclinación de 3% con respecto a la horizontal, y es alimentado por el extremo más alto, con el material procedente del precalentador, mientras que en el otro extremo, bajo o de descarga, se localiza el quemador principal.

Los hornos trabajan por diferentes procesos, en virtud del avance tecnológico de la época de su instalación. Estos procesos son:

- ◆ Sistema húmedo: Se alimenta al horno una pasta con un contenido de humedad que fluctúa entre 30 y 40%.
- ◆ Sistema semi-húmedo: La alimentación al horno consiste de una pasta prensada (galleta) y triturada, cuya humedad fluctúa entre 15 y 20%.

Capítulo III: Breve descripción del proceso de elaboración de Cemento.

- ◆ Sistema semi-seco: Se alimenta al horno nódulos hechos en un plato nodulador, empleando harina cruda y una espesa de agua. La humedad de los nódulos oscila entre 7 y 10%.
- ◆ Sistema seco: El horno se alimenta con harina cruda seca. Los hornos pueden ser sin precalentador o con precalentador. La humedad presente en la harina cruda no excede el 1%. En los procesos con mayor avance tecnológico, el sistema esta equipado con un calcinador, el cual se encuentra en la parte baja del precalentador.

El enfriador es una caja de metal dividida horizontalmente, aproximadamente a la mitad, por una parrilla que está formada por bastidores que sujetan las placas metálicas, las cuales tienen una serie de perforaciones a través de las cuales pasa el aire a presión. Por la parte superior de las placas avanza el Clinker y por la inferior se tiene aire atmosférico a presión. Las líneas de placas están dispuestas de tal manera que una es fija y la siguiente se desplaza en forma recíproca, es decir, tiene un movimiento hacia delante y hacia atrás, haciendo que la cama de Clinker sobre las placas (aproximadamente de 80 centímetros) avance lentamente hacia la descarga o salida del enfriador. El aire debe ser suministrado por una serie de ventiladores para hacer que el Clinker se enfríe rápidamente y lograr el óptimo en las fases cristalográficas del Clinker (ver capítulo IV) y el aire calentado por el intercambio térmico con el Clinker poder emplearlo en el proceso para la combustión del combustible y tener a la vez un ahorro de energéticos, ya que el aire llega a alcanzar una temperatura de 900°C. Cuando se utiliza este aire para la combustión del combustible que alimenta el quemador principal del horno, se le denomina como: aire secundario; y al que se envía para la combustión del combustible en el calcinador, se le denomina como: aire terciario.

El proceso de calcinación se desarrolla de la siguiente forma:

La harina cruda, proveniente del silo, se introduce por la parte alta del precalentador a una temperatura aproximada de 60°C e intercambia calor con los gases calientes provenientes del horno, aumentando la temperatura de la harina cruda hasta los 900°C en la entrada del horno; los gases salen del precalentador con una temperatura cercana a los 330°C y se utilizan para el secado de material en los molinos de harina cruda, posteriormente, los gases pasan por los filtros, que pueden ser: filtros electrostáticos o un colector de bolsas, y después salen limpios a la atmósfera. El polvo recuperado por el filtro se recicla al proceso. La harina cruda sufre una descarbonatación (pasa de CaCO_3 a $\text{CaO} + \text{CO}_2$) a una temperatura aproximada de 900°C, por lo que entra al horno con un grado de descarbonatación de 93 a 96%.

Dentro del horno ocurren los siguientes cambios: a 1300°C se funde el óxido de aluminio y el óxido de hierro (ya que ambos forman una mezcla eutéctica), dando origen a lo que se conoce como fase líquida, la cual de hecho esta formada por aluminatos y ferri-aluminatos de calcio. Cuando la temperatura alcanza los 1400°C, se empieza a dar la formación de silicato dicálcico (C_2S) y a los 1450°C empieza a

Capítulo III: Breve descripción del proceso de elaboración de Cemento.

aparecer el silicato tricálcico (C_3S), el cual es el principal componente hidráulico del Cemento Portland. Cuando el material pasa la zona de alta temperatura del horno y antes de la descarga del mismo, se empieza a enfriar. El producto resultante son nódulos de 3 a 4 cm de tamaño, llamados Clinker, y es de color rojizo brillante al salir del horno, pero una vez fríos son de color gris oscuro.

El Clinker se descarga del horno aproximadamente a $1200^{\circ}C$ y cae en la parrilla del enfriador donde se utiliza aire atmosférico a presión para enfriarlo rápidamente. El aire más caliente (aproximadamente $900^{\circ}C$) se emplea como aire secundario y aire terciario, mientras que el aire excedente (con aproximadamente $240^{\circ}C$) se emplea para el secado de materiales. El Clinker sale del enfriador a una temperatura que oscila entre 80 y $100^{\circ}C$ y es llevado por medio de un transportador de placas metálicas a un silo de almacenamiento. En el silo de almacenamiento se evita que el Clinker pierda sus propiedades fisicoquímicas por el efecto de la lluvia o de la humedad ambiental.

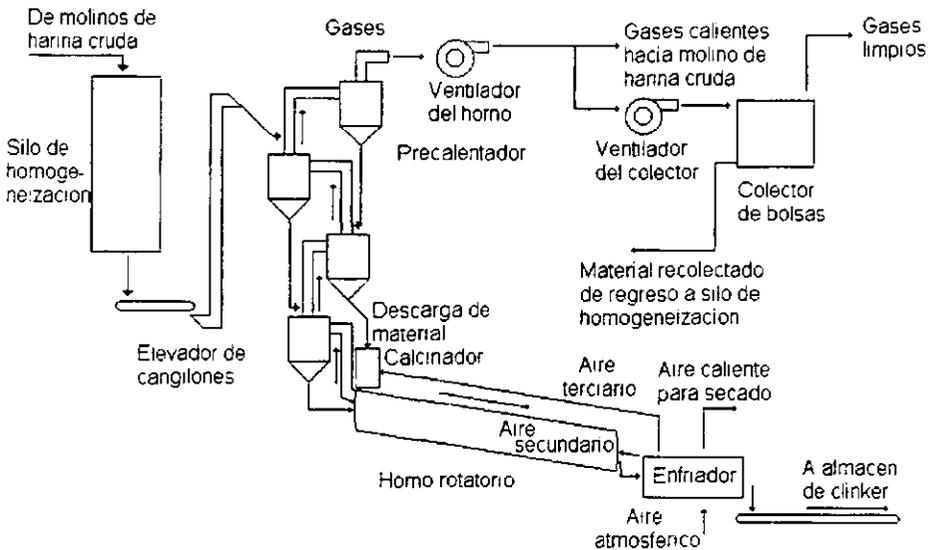


Figura 5: Diagrama esquemático de la operación unitaria de calcinación.

Capítulo III: Breve descripción del proceso de elaboración de Cemento.

MOLIENDA FINAL.

Para la obtención de Cemento Portland se utiliza Clinker y Yeso; en algunos casos se pueden añadir algunos materiales, como son las puzoianas o escoria granulada de alto horno, para la obtención de un Cemento con características definidas, así como obtener algunas características específicas. Generalmente se utiliza 94 a 95% de Clinker y se completa con Yeso para los Cementos en los que no se utilizan aditivos; mientras que, cuando se agregan aditivos tales como la puzolana, suele tenerse una dosificación del orden: Clinker 78%, puzolana 17% y Yeso 5%.

La molienda del Cemento se efectúa generalmente en molinos de bolas.

El molino de bolas es un cilindro de acero en posición horizontal, dividido en dos cámaras, con recubrimientos interiores llamados "blindajes", cuya función es, en la primera cámara, generar una caída con efecto en la bola para tener una mejor eficiencia en el grado de reducción de tamaño, por impacto, ya que lo que se busca es triturar el material hasta un tamaño máximo de 7 mm; mientras que en la segunda cámara la función del blindaje es la de clasificar la bola por tamaño para que el material que entra en la cámara se encuentre con la bola de mayor tamaño (25 mm), y conforme avanza y disminuye su tamaño, disminuya gradualmente el tamaño de bola (18mm); en ésta cámara se busca dar finura al material. El blindaje puede ser cambiado fácilmente cuando se desgasta, evitando daño al cuerpo del molino.

Los cuerpos molidores están constituidos por bolas de acero cuyos diámetros varían desde 90 hasta 18 mm, y ocupan, como grado de llenado óptimo, el 33% del volumen interior del molino. El interior del molino está dividido en dos secciones o cámaras. Las cámaras del molino están separadas por una pared llamada diafragma intermedio, el cual tiene una serie de ranuras de 7 mm y está diseñado para solo permitir el paso de material menor a ese tamaño, manteniendo al mismo tiempo a los cuerpos molidores y a las partículas más grandes en la primera cámara.

El material al salir del molino es transportado por medio de un elevador de cangilones hasta un separador dinámico, cuya función es clasificar las partículas que cumplen con el tamaño requerido (45 micras y menores), las cuales son conducidas por la corriente de aire a un colector de bolsas, donde se separa el Cemento de la corriente de aire y el aire limpio es retornado a la atmósfera. El material grueso rechazado por el separador (que tiene un tamaño mayor de 45 micras), es retornado a la alimentación del molino, para ser remolido, formándose lo que se conoce como "circuito cerrado de molienda".

El material fino (llamado Cemento) recuperado por el colector, es transportado por medio de una banda de hule o a través de un sistema neumático, a los silos de almacenamiento de Cemento.

Capítulo III: Breve descripción del proceso de elaboración de Cemento.

En el barrido interno del molino se utiliza aire atmosférico para mantener un control sobre la temperatura del material, el cual no debe sobrepasar de 120°C para evitar la deshidratación del Yeso. Estos molinos cuentan con equipos de inyección de agua en cada extremo, para ser utilizados en casos extremos con el propósito de mantener la temperatura del Cemento dentro de los parámetros establecidos.

Para el Aseguramiento de Calidad del Cemento, se toman periódicamente muestras de Cemento a la descarga del colector o bien en un punto específico en el transporte a los silos de Cemento para la realización de pruebas tanto físicas como químicas: determinación de la finura y la superficie específica, contenido de Yeso, resistencia a la compresión a las edades de 24 horas, 3, 7 y 28 días, tiempo de fraguado inicial y final, determinación del calor de hidratación, análisis químicos y determinación de componentes potenciales, etc.

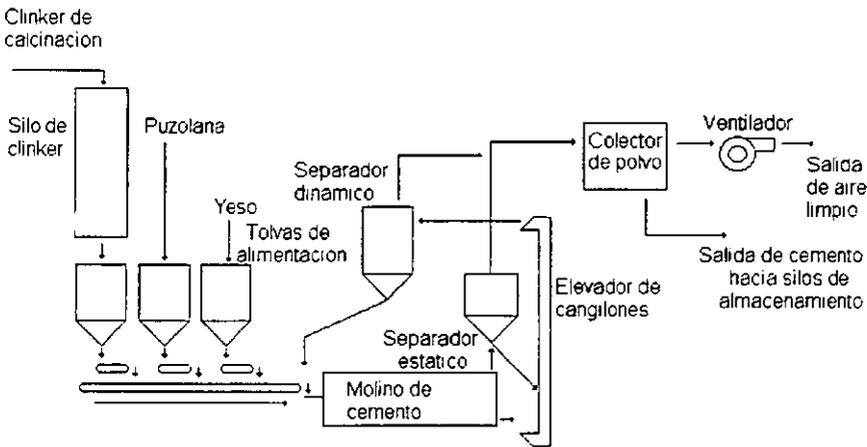


Figura 6: Diagrama esquemático de la operación unitaria de molienda de Cemento.

Capítulo III: Breve descripción del proceso de elaboración de Cemento.

ENVASE Y EMBARQUE.

Los silos de almacenamiento de Cemento cuentan con sistemas de inyección de aire en el fondo, con el propósito de mantener aireado el Cemento y evitar que este se compacte y dificulte su extracción y manejo. De estos silos, el Cemento se transporta a las ensacadoras. Las ensacadoras cumplen con el objetivo de llenar los sacos con el peso de Cemento especificado, contando por lo tanto con un sistema de pesaje (en las ensacadoras modernas es electrónico y autocalibrable).

El despacho de Cemento se realiza en varias presentaciones, siendo estas: Cemento ensacado (en sacos de papel) con presentaciones de 25 y 50 Kg. Cemento a Granel, el cual se embarca directamente del silo a tolvas de ferrocarril con capacidad hasta de 50 toneladas, o bien en carros-pipa con capacidad de 30 toneladas, para ser transportado por carretera. Cemento a Semi-Granel, el cual se ensaca en bolsas de polietileno-poliéster, con capacidad de 1.5, 2 y 2.5 toneladas.

CLINKER Y SUS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS.

En el proceso de elaboración del Cemento Portland, el Clinker es el producto obtenido de la operación unitaria de calcinación. Normalmente (cuando esta a temperatura ambiente) es de color gris oscuro y se obtiene en forma de nódulos de 3 a 4 centímetros de tamaño máximo. Está compuesto por fases hidráulicas de silicatos cálcicos, los cuales le confieren sus características fisicoquímicas para el desarrollo de resistencia mecánica y de fases de aluminatos y ferrialuminatos cálcicos, que infieren características especiales.

El Clinker tiene impurezas en sus fases debido a la presencia de elementos que se presentan a nivel de trazas (debido a la formación geológica) en las materias primas empleadas en la preparación de la harina cruda. Entre las impurezas que se presentan se encuentran el óxido de magnesio, óxido de fósforo, óxido de sodio, óxido de potasio, etc.

Los componentes presentes en las fases del Clinker se pueden determinar mediante la utilización de diversos métodos, tanto de tipo químico, como el análisis complejométrico con EDTA, o con instrumentos que pueden medir algunas características físicas, como el fotómetro de flama, el método de plasma inducido o el análisis por medio de Rayos X; aunque estos métodos son efectivos en la determinación cualitativa y cuantitativa de los componentes del Clinker, son métodos caros y deben utilizarse en forma combinada, por lo que, generalmente, en la Industria generalmente se aplican métodos de microscopía para determinar las características mineralógicas del Clinker.

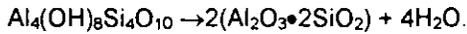
Los principales componentes (y sus abreviaturas empleadas dentro de lo que se llama, de manera particular, química dentro de la industria cementera) del Clinker son:

- ◆ CaO (C)
- ◆ Al₂O₃ (A)
- ◆ Fe₂O₃ (F)
- ◆ SiO₂ (S)
- ◆ H₂O (H)
- ◆ SO₃ (S̄)
- ◆ CO₂ (C̄)

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

La formación del Clinker se da por etapas, según el avance del material en la operación de calcinación, de acuerdo a la temperatura que alcance la harina cruda:

- ◆ A temperaturas menores de 100°C se tiene el secado o eliminación del agua libre del material alimentado.
- ◆ Entre 100 y 400°C: La eliminación del agua de cristalización absorbida en la arcilla.
- ◆ Entre 400 y 600°C: Se inicia la eliminación del agua de cristalización de la arcilla, y la formación de la metacaolinita.



- ◆ Entre 600 y 900°C: Empieza la descomposición de la metacaolinita y otros compuestos con formación de una mezcla de óxidos reactivos.
- ◆ Entre 600 y 1000°C: Se empieza la descarbonatación de la caliza y la formación de metacompuestos, tales como. CS y CA.
- ◆ Entre 800 y 1300°C: Empieza la fijación de la cal por el CS y el CA con formación de C₂S, C₃A y C₄AF.
- ◆ Entre 1200 y 1450°C: Existe una nueva fijación de cal por el C₂S para formar el C₃S.

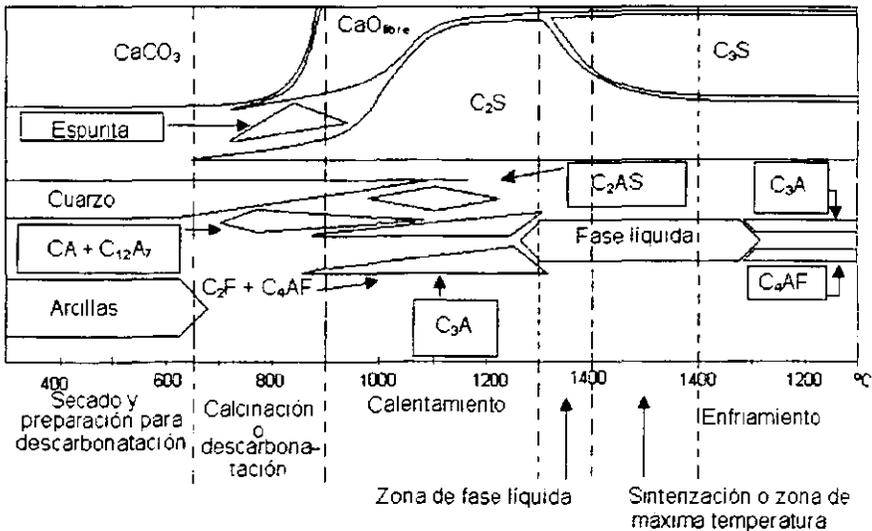


Figura 7: Zonas de formación en la operación de calcinación.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

Las principales fases componentes del Clinker son:

- ♦ **ALITA (C_3S):** Es el principal componente hidráulico del Cemento Portland; tiene una velocidad de hidratación rápida, es el aportador de la resistencia mecánica a la compresión a temprana edad y tiene un calor de hidratación menor que el de la fase de aluminato cálcico.

Puede presentar como impurezas óxidos de magnesio, aluminio, fierro y de los elementos que se presentan en trazas.

Su color es blanco y su forma es un cristal hexagonal bien definido (tamaño, forma y reactividad hidráulica dependen de la temperatura y tiempo de residencia a alta temperatura a la cual se formó). Su porcentaje (de acuerdo al Tipo de Clinker) está entre el 40 y el 70%.

- ♦ **BELITA (C_2S):** Es el componente hidráulico del Cemento que genera la resistencia a la compresión a edades tardías (dependiendo de las condiciones de humedad relativa y temperatura del concreto), en general se considera reacción de hidratación después de los 20 días. Su calor de hidratación es bajo, lo mismo que su velocidad de generación.

Entre sus principales impurezas se encuentran los álcalis, los óxidos de aluminio, fósforo y compuestos de flúor.

Es un cristal redondo, con bordes lisos o con lamelas (de acuerdo a la temperatura máxima y tiempo de residencia a alta temperatura), de color blanco. Se encuentra presente dentro de las fases del Clinker, en una proporción entre el 15 y 30% (de acuerdo al Tipo de Clinker).

- ♦ **FASE DE ALUMINATO TRICÁLCICO (C_3A):** Es uno de los componentes de la fase líquida junto con la fase de ferrialuminato tetracálcico. Cristaliza durante la etapa de enfriamiento, y el tamaño de sus cristales determina la velocidad de esta etapa.

Presenta una muy rápida hidratación y su calor de hidratación es mucho más alto que el generado por la Alita. Presenta una retracción durante la hidratación y es altamente reactivo con los sulfatos.

Las impurezas que se encuentran en esta fase son, principalmente, álcalis, óxidos de fierro, magnesio y silicio.

Son cristales cúbicos de color blanco y se encuentra en una proporción dentro de las fases del Clinker, del 11 al 15% (de acuerdo al Tipo de Clinker).

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

- ♦ **FASE DE FERRIALUMINATO TETRACÁLCICO (C₄AF):** Es el otro componente de la fase líquida. Tiene una hidratación lenta y regular, contribuye poco al desarrollo de resistencia, tiene el calor de hidratación más bajo que el aluminato tricálcico y el silicato tricálcico, pero mayor que el del silicato dicálcico. Por el óxido férrico que contiene, es el componente que le da color al Cemento.

Presenta como impurezas a los óxidos de silicio, magnesio y titanio. Es de color pardo oscuro y se encuentra en una proporción del 8 al 15% (de acuerdo al Tipo de Clinker).

Una de las principales características que se buscan en el Clinker es el desarrollo de resistencia de sus fases, la cual depende del proceso de hidratación que sufren, por lo que es necesario conocer como se desarrollan dichos procesos, analizándolos para cada fase por separado, debido a la complejidad del estudio de la hidratación de las fases en conjunto.

Entre los compuestos hidratados que se forman durante la hidratación del Cemento se encuentran:

- ♦ El símbolo C-S-H, el cual es conocido como "fase Hidratada de silicatos"; es utilizado para representar el hidrato amorfo de silicato cálcico, el cual no está representado estequiométricamente.
- ♦ La Etringita (Hidrato de trisulfoaluminato de calcio), la cual es formada por el C₃A con el Yeso, tiene como fórmula C₃A • 3C \bar{S} • H₃₂, y la formada por el C₄AF es C₃A_{0,5}F_{0,5} • 3C \bar{S} • H₃₂; cuando reaccionan con el sulfato de calcio durante la hidratación, también se le denomina fase AFt donde la A indica la fase aluminato (es decir: Al₂O₃), la F indica la fase ferrito (Fe₂O₃) y la t indica la fase Trisulfato (3C \bar{S} o 3CaSO₄).
- ♦ El Monosulfato (hidrato de monosulfato de calcio) esta expresado como: C₃A • C \bar{S} • H₁₂ o C₄A \bar{S} H₁₂; tanto el generado por la fase de aluminato tricálcico, como el generado por la fase de ferrialuminato tetracálcico se encuentran en solución sólida y se denominan solo como monosulfato, también se les conoce como fase AFm, donde la A indica la fase aluminato (Al₂O₃), la F indica la fase ferrito (Fe₂O₃) y la m indica la fase monosulfato (C \bar{S} o CaSO₄).

En la hidratación de las cuatro fases principales del Cemento, las investigaciones han encontrado que se comportan de la manera siguiente: las fases sílicas generan altas resistencias, el hidrato del C₃S manifiesta la resistencia inicial más alta, mientras que el hidrato del 2 - C₂S genera la resistencia a mayor tiempo. Las fases de aluminio y aluminoferritas virtualmente no desarrollan resistencia durante la hidratación.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

Otras investigaciones han encontrado que las fases aluminoferritas tienen una contribución mínima a la resistencia; también mostraron que existen diferentes relaciones de contribución a la resistencia durante los primeros días de hidratación.

Los diferentes estados de hidratación del Cemento y, por lo tanto, de desarrollo de resistencia se determinan de mejor manera midiendo la evolución de calor por conducción calorimétrica, cuando se mezcla el Cemento con el agua.

Existen 3 periodos arbitrarios conocidos que muestran la relación entre el calor de hidratación y el tiempo:

- ◆ Regulación del fraguado: Es el período que comprende desde el mezclado con agua hasta el inicio de una significativa pérdida de movilidad de la mezcla, previa al fraguado.

Este es el período de "trabajabilidad", es decir, el periodo en el cual tiene lugar el mezclado, transportación y colocación de pastas de Cemento, morteros o concretos.

Cuando se adiciona agua al Cemento hay una generación muy alta de calor, la cual decrece posteriormente teniéndose un período de reposo, el cual se conoce como "período de inactividad", el cual implica una reactividad química relativamente baja.

- ◆ Período de fraguado: Es en este período en el cual la pasta de Cemento pierde su movilidad y queda definido arbitrariamente con la determinación del "tiempo de fraguado inicial" y "tiempo de fraguado final", es decir, se tiene el final del período de trabajabilidad y el inicio de un significativo desarrollo de resistencia a la compresión.

La generación de calor se incrementa notoriamente pero sin llegar a la cantidad de calor generado al inicio de la mezcla del agua con el Cemento.

- ◆ Período de endurecimiento: Es en este período cuando hay un desarrollo de resistencias muy notorio en la pasta de Cemento. La resistencia final a la compresión puede tomar varios años para alcanzarse, pero para propósitos prácticos se usa como indicador la resistencia alcanzada a la edad de hidratación de 28 días, en virtud de que a esa edad su desarrollo de resistencia es del orden de 90% total.

Es en este período cuando la generación de calor decrece paulatinamente y en forma proporcional a la cantidad de componentes mineralógicos sin hidratar.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

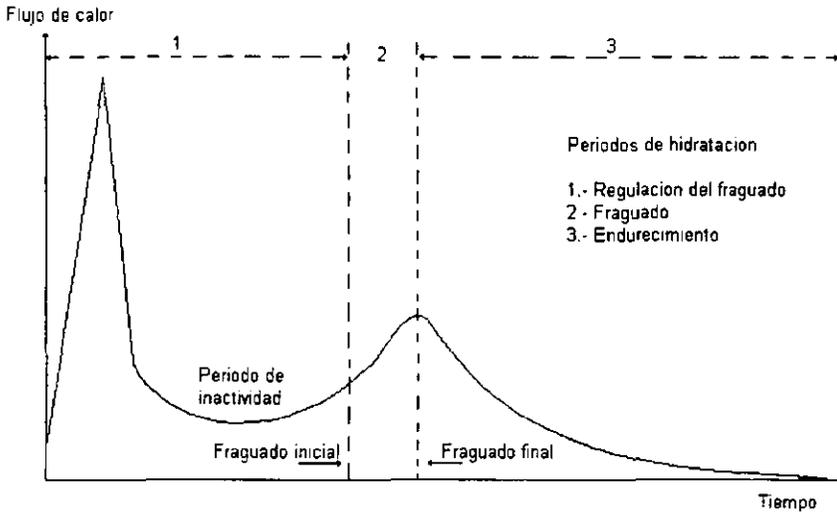


Figura 8: Conducción calorimétrica durante la hidratación del Cemento Portland.

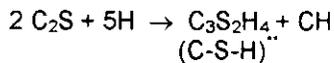
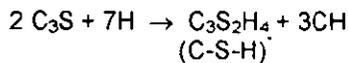
Se debe tomar en cuenta que las principales reacciones de hidratación no son simples procesos de disolución y precipitación, sino que son, en esencia, reacciones de estado sólido. Estas ocurren topoquímicamente en las superficies respectivas de los Silicatos, Aluminatos y AluminoFerritos, los cuales son raramente solubles en agua. Los demás iones presentes en las reacciones químicas (SO_4^{-2} , Ca^{+2} , Na^+ , OH^- , etc.), son transportados en solución a estas superficies.

Para el caso de los minerales del Clinker, denominados como Silicatos de calcio, los cuales son:

- Silicato Tricálcico: C_3S
- Silicato dicálcico: $\text{B} - \text{C}_2\text{S}$

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

Para los diferentes tipos de Cemento Portland la suma de estos dos minerales se encuentra en el rango de 70 a 75% en peso. Las ecuaciones estequiométricas utilizadas con regularidad son:



Tanto el (C-S-H)' como el (C-S-H)'' son generalizaciones de los diferentes hidratos que pueden formar tanto el C₃S como el C₂S.

Por su morfología, el (C-S-H)' y el (C-S-H)'' son inicialmente "dimer" no estequiométrico, y algunos de estos "dimer" polimerizan a 5, 8 y 11 cadenas condensadas.

El (C-S-H)' causa fraguado y un desarrollo temprano de resistencia.

El (C-S-H)'' causa el desarrollo de resistencia posterior a los 28 días.

La morfología del CH (hidróxido de calcio) es de cristales en placas hexagonales (llamados Portlandita), aunque unos pocos son amorfos.

El CH contribuye poco al fraguado de la mezcla y genera un pequeño desarrollo de resistencia mecánica.

El C₃S reacciona rápidamente con el agua, formándose el C-S-H y una solución sobresaturada de CH. La formación del C-S-H se inicia después de solo 1 a 3 minutos de haberse adicionado el agua. De acuerdo a las investigaciones más recientes, la hidratación del C₃S se divide en 5 períodos:

- ◆ **Período Inductivo:** Se tiene una reacción rápida y breve directamente después de la mezcla. Hay una rápida evolución de calor que cesa después de aproximadamente 15 minutos.
- ◆ **Período inactivo:** Hay una reacción muy lenta. Durante este período la pasta de Cemento tiene una consistencia plástica, lo que permite trabajarla. La cantidad de calor generada en este período es mínima.
- ◆ **Período de aceleración:** Después de un período de 2 a 3 horas de la adición de agua, se inicia una reacción muy fuerte y la solidificación de la pasta de Cemento (fraguado inicial). El C₃S empieza a hidratarse rápidamente y llega a un máximo que corresponde con el de la evolución de calor.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

- ◆ **Periodo máximo:** En este período la velocidad de reacción decrece cuando se ha pasado el punto máximo. Tanto la velocidad de reacción como la generación de calor decrecen gradualmente.
- ◆ **Periodo final:** Es en el período en el cual se alcanza un 97% o más de hidratación del C_3S .

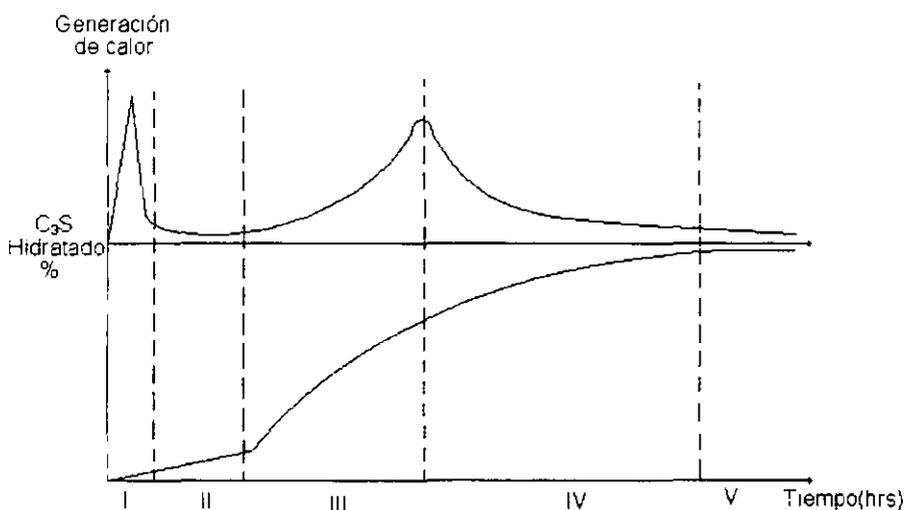


Figura 9: Mecanismo de hidratación del C_3S

En el proceso de hidratación del C_3S se producen 5 diferentes tipos de hidratos de silicato de calcio (C-S-H) a diferente tiempo y bajo condiciones diferentes. 4

- ◆ Gel de C-S-H en forma de agujas circundando a granos de C_3S aun no hidratados. Esto ocurre al inicio de la reacción.
- ◆ α -C-S-H circundando radialmente al gel de C-S-H previamente formado.
- ◆ Partículas curvas de β -C-S-H que crecen epitaxialmente con CH y/o γ -C-S-H y δ -C-S-H. Epitaxialmente, se aplica cuando un material cristalino crece arriba de otro cristal.
- ◆ γ -C-S-H crece epitaxialmente con CH y δ -C-S-H.
- ◆ δ -C-S-H crece epitaxialmente con β -C-S-H, γ -C-S-H y CH.

Todos estos hidratos tienen diferentes relaciones CaO / SiO_2 , (C/S).

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

Los procesos químicos que ocurren en cada período del proceso de hidratación se explican en la secuencia siguiente:

- ♦ **Período inductivo:** Dada la alta superficie específica del C_3S , cuando hay contacto entre el C_3S y el agua, hay una reacción rápida de hidrólisis, con lo que se tiene una liberación inmediata de iones de Ca^{2+} y OH^- , cuyo efecto es aumentar el valor del pH a un valor de 12 o poco mayor, en pocos minutos. Este valor indica una solución muy alcalina, y es la explicación del alto desarrollo de calor presente en este período. Los granos de C_3S presentarán en su superficie una cubierta de agujas de gel de C-S-H.
- ♦ **Período inactivo:** La reacción de hidrólisis decrece rápidamente debido a que la cubierta de gel de C-S-H formada en los granos de C_3S la inhibe.

Esta cubierta detiene el flujo a contracorriente de agua y CH, además de que la solución se va saturando rápidamente con CH soluble en agua, de forma tal que la velocidad de difusión del CH que se va formando es lenta. La cubierta de gel de C-S-H aumenta lentamente.

Este período continúa hasta el momento en que se tiene una solución sobresaturada de hidróxido de calcio (CH), alcanzando valores tales que el CH empieza a cristalizar desde la solución, de tal manera que en ese momento, cuando disminuye la concentración de CH en solución, se rompe ese equilibrio y se continúa de manera muy rápida la hidratación del C_3S con una alta velocidad de difusión del CH.

Cuando los iones en solución alcanzan tal concentración que se cristalizan formando núcleos que facilitan el crecimiento del producto de la hidratación, se le conoce como "control de nucleación". El control de nucleación en este período es lento.

- ♦ **Período de aceleración:** Con la cristalización del CH desde la solución, fuera de la cubierta de C-S-H que cubre los granos de C_3S , crece la velocidad de difusión del CH desde el interior de la cubierta de C-S-H por lo que en consecuencia crece la velocidad de difusión del agua hacia el interior de la cubierta, originándose un incremento en la velocidad de difusión y, por lo tanto, en la velocidad de reacción, hasta alcanzar un máximo.

La generación de calor de hidratación se desarrolla paralelamente a la velocidad de reacción o velocidad de hidratación.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

- ◆ **Período máximo:** Una vez que se alcanza la máxima velocidad de reacción, el grosor de la cubierta de C-S-H es tal que forma una barrera para la difusión del agua hacia el interior con lo que se dificulta el continuar hidratando el C_3S y la difusión de los iones de Ca^{+2} y OH^- hacia el exterior para que continúen cristalizando.

El control de la velocidad de reacción queda establecido por la velocidad de difusión. Conforme crece el espesor de la cubierta de C-S-H se hace más lenta la velocidad de difusión, por lo tanto, la hidratación va decreciendo paulatinamente.

- ◆ **Período final:** La velocidad de hidratación es muy lenta debido a que la difusión también lo es. Este proceso continua hasta alcanzar la hidratación del 100% del C_3S , o hasta que se tenga la cantidad de agua disponible y las condiciones para continuar la hidratación.

El C_2S tiene una reacción lenta con el agua para formar una solución saturada de hidróxido de calcio (CH). Algunas investigaciones describen la reacción del C_2S con agua como una sedimentación. La solución en esta mezcla sólo se satura con hidróxido de calcio (CH) después de aproximadamente 24 horas. Mientras no ocurra la sobresaturación, el núcleo de tobermorita como producto no será formado. De acuerdo con otras investigaciones, la lentitud de las reacciones iniciales está basada en la formación de iones complejos de:



El grado de hidratación del C_3S y del C_2S , en solución de hidróxido de calcio, como una función del tiempo, se muestra en la figura 10.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

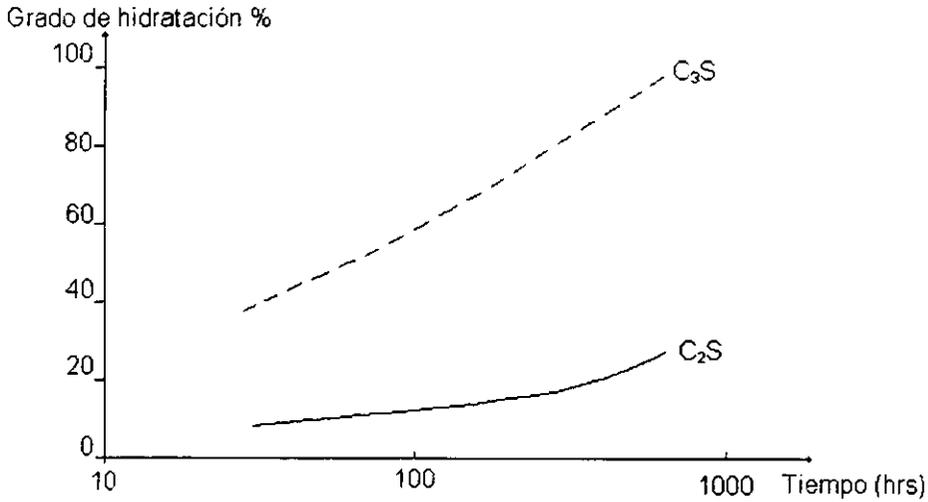


Figura 10: Grado de hidratación del C₃S y C₂S en función del tiempo de hidratación.

En el caso de la fase de aluminato tricálcico (C₃A), el cual es el más reactivo de los minerales del Clinker, es la fase que muestra la más alta velocidad de reacción al contacto con el agua.

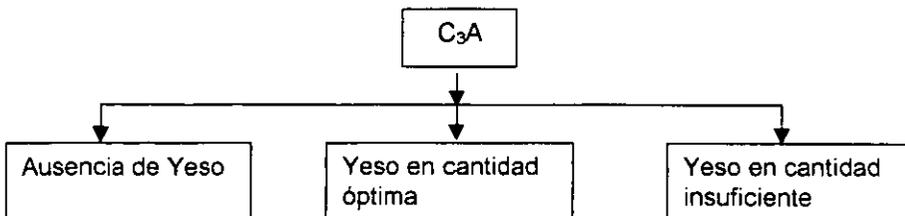
La reacción básica que describe la hidratación del C₃A en presencia de Yeso es:



Al hidrato se le conoce como Etringita y se puede escribir en las siguientes formas:



El desarrollo de esta reacción depende de la cantidad de Yeso (CaSO₄•2H₂O), por lo que se pueden tener 3 diferentes casos:

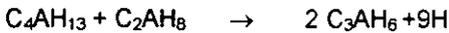


Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

- ♦ **Hidratación del C₃A en ausencia de Yeso** La reacción de hidratación es muy rápida y con una gran generación de calor, ya que se forman rápidamente los hidratos de aluminato de calcio



Dado que estos hidratos son inestables, se convierten rápidamente a su forma estable:



A una temperatura mayor a 30°C la conversión de los hidratos inestables al hidrato estable se da muy rápidamente. El hidrato C₄AH₁₃ es un cristal de forma hexagonal, rico en agua y calcio. El hidrato estable C₃AH₆ es un cristal cúbico.

Cuando se han formado núcleos de cristales de C₃AH₆, estos crecen rápidamente aun a temperaturas menores a 20°C.

A la temperatura de 80 °C o superiores, el cristal de C₃AH₆ se forma de manera directa.



La hidratación del C₃A en ausencia de Yeso va a originar "fraguado rápido" en el Cemento. La adición de Yeso al Cemento tiene como objeto retardar precisamente esta reacción.

- ♦ **Hidratación del C₃A en presencia de una cantidad óptima de Yeso:** Después de la adición de agua, durante los primeros 10 minutos se tiene la formación de la Etringita: C₆A \bar{S} ₃H₃₂.



Conforme hay una formación de Etringita, la concentración de iones SO₄⁻² va disminuyendo, y mientras la concentración de sulfatos se mantenga arriba de 0.889 gramos de SO₃ por gramo de C₃A se tendrá estabilidad en la Etringita. Al momento que esta concentración es menor, la Etringita es inestable y se convierte en monosulfato.



De forma tal que la reacción total de hidratación se escribe:



Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

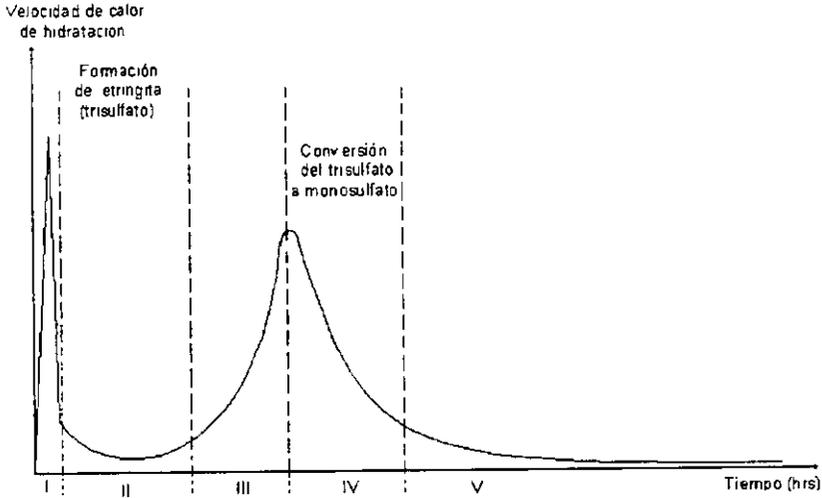


Figura 11: Desarrollo de fases durante la hidratación del C₃A en presencia de una cantidad óptima de Yeso.

Cada uno de los períodos se desarrolla de la siguiente forma:

I Período Inductivo: Hay una evolución rápida de calor causada por una hidratación directa sobre la superficie de las partículas de C₃A y la formación de Etringita sobre su superficie.

II Período Inactivo: La Etringita formada sobre la superficie de los cristales de C₃A impide la difusión de los iones sulfato e hidroxilo hacia la superficie del C₃A sin hidratar. La velocidad de reacción es muy lenta por ser una función de la velocidad de difusión. El tiempo de este período es proporcional a la cantidad de iones SO₄⁻² presentes en la solución, debido a que la Etringita formada solo es estable mientras haya en la solución una cantidad adecuada de iones sulfato.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

III Período de aceleración: Cuando la cantidad de iones sulfato en la solución disminuye, la Etringita se vuelve inestable y empieza a reaccionar con el C_3A sobre el que está formada para generar el monosulfato ($C_4A \bar{S} H_{12}$).

Conforme la Etringita se convierte en monosulfato, la velocidad de difusión de los iones sulfato e hidroxilo aumenta, lo que hace que la velocidad de hidratación del C_3A se incremente con rapidez, hasta que alcanza un máximo. Después de que el monosulfato se forma, la reacción de hidratación del C_3A vuelve a empezar, dando los hidratos correspondientes, y entrando en solución sólida con el monosulfato.

IV Período máximo: La reacción entre el C_3A sin hidratar y los iones de sulfato en solución va disminuyendo su velocidad debido a que la cantidad, tanto de C_3A como de iones de sulfato, va disminuyendo, por lo que la reacción decrece de forma significativa.

V Período final: Como la velocidad de reacción decrece, se hace asintótica al eje de las abscisas (tiempo) hasta que todo el C_3A haya reaccionado.

- ♦ **Hidratación del C_3A en presencia de una cantidad insuficiente de Yeso:** Si la concentración de iones sulfato está por debajo de la relación de 0.296 gramos de SO_3 por gramo de C_3A , el cual es requerido estequiométricamente para la formación de monosulfato, se tendrá aún C_3A sin reaccionar para cuando la Etringita formada se convierta a monosulfato, o bien, durante los primeros minutos se tendrá $C_4A \bar{S}_3 H_{12}$ e hidratos de aluminato cálcico (C_4AH_{13} y C_2AH_8), también se pueden formar pequeñas cantidades de C_3AH_6 .

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

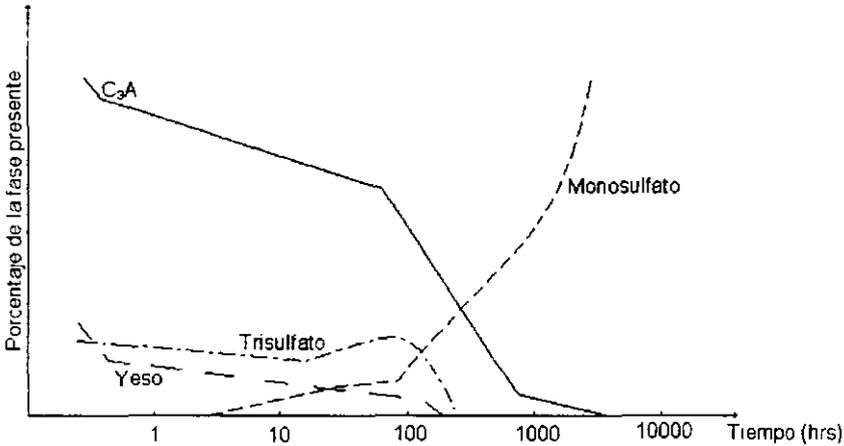


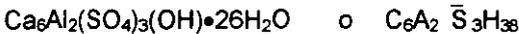
Figura 12: Desarrollo de las fases durante la hidratación de C_3A con una cantidad insuficiente de Yeso.

Cuando el monosulfato se encuentra en presencia de una nueva fuente de iones sulfato se puede formar nuevamente Etringita.



Esta reacción explica el efecto que causa una corriente de agua conteniendo sulfatos solubles, al entrar en contacto con un concreto endurecido; este efecto es tan fuerte que causa agrietamiento en el concreto.

El nombre Etringita es utilizado debido a que se da el mismo nombre a un mineral natural que tiene una composición química similar:



Este mineral es incoloro, transparente y con una cristalografía hexagonal, tiene una densidad específica de 1.77 g/cm^3 y una dureza de 2.0 a 2.5 en la escala de Mohs.

El grupo de la Etringita pertenece al grupo de las fases AFt, donde Al_2O_3 puede ser remplazado por Fe_2O_3 , de manera total o parcial y el ion SO_4^{-2} puede ser sustituido por otros aniones.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

Para el caso particular de la Etringita generada por la hidratación del C_3A en presencia de Yeso, se usa este término como sinónimo de la fase AFt, la cual es inicialmente amorfa, luego cristalina con prismas pseudo hexagonales.

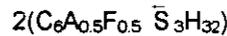
La contribución de la fase C_3A es la siguiente:

- ♦ La fase de aluminato tricálcico tiene influencia sobre la cantidad de agua en la consistencia de la pasta de Cemento.
- ♦ Esta fase causa un "fraguado rápido" si no hay Yeso en el Cemento o una cantidad insuficiente de Yeso para el control de hidratación del C_3A .
- ♦ Tiene una mínima contribución a la resistencia mecánica a la compresión.
- ♦ Genera un alto desarrollo de calor en su reacción de hidratación.

La fase de ferrialuminato tetracálcico (C_4AF) tiene reacciones de hidratación similares a las de la fase de aluminato tricálcico (C_3A). Las ecuaciones estequiométricas que representan su proceso de hidratación son las siguientes:



O en su forma simplificada:



El hidrato resultante corresponde a la fase AFt y puede escribirse $C_6(A,F) \bar{S}_3H_{32}$, indicando que Al_2O_3 y Fe_2O_3 , son intercambiables en este compuesto y la relación A/F no es necesariamente la misma que en el compuesto indicado. A este hidrato también se le denomina "Etringita", puesto que corresponde al mismo grupo y su comportamiento es exactamente igual al de la Etringita formada con el C_3A : $C_6A \bar{S}_3H_{32}$.

La hidratación del C_4AF en ausencia de Yeso es igual a la del C_3A , pero su velocidad de hidratación es bastante más lenta y con una evolución de calor mucho menor.



Por la inestabilidad de los hidratos, estos se convierten rápidamente a la forma estable:



Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

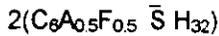
Esta reacción no es tan rápida como para causar fraguado rápido en el Cemento. Las modificaciones que sufra la fase de ferrialuminato tetracálcico en su composición sólo afectan la velocidad de la reacción de hidratación. Queda establecido que conforme la proporción de ferrito se incrementa, la velocidad de la reacción de hidratación disminuye.

En presencia de Yeso, la hidratación del C_4AF es igual que la del C_3A , solo que su velocidad de hidratación es más lenta y la evolución de calor es menor.

Las reacciones que se desarrollan son:



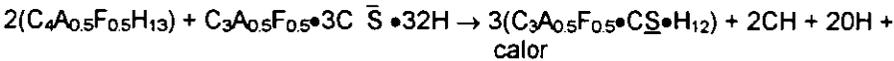
o bien:



de forma simultánea se da la siguiente reacción:



Con lo que se genera la reacción:



o bien:



Siendo: $C_6A_{0.5}F_{0.5} \bar{S} H_{32}$ la Etringita en la fase AFt y $C_4A_{0.5}F_{0.5} \bar{S} H_{12}$ el monosulfato en la fase AFm.

La morfología de la Etringita ($C_6A_{0.5}F_{0.5} \bar{S} H_{32}$) generada por la hidratación de la fase C_4AF se explica de la siguiente forma: Durante el proceso de hidratación, los productos análogos formados del aluminato y del ferrialuminato entran rápidamente en solución sólida unos con otros. La Etringita, el monosulfato y el hidrato formados de aluminato y de ferrita, son respectivamente indistinguibles y forman masas continuas de Etringita, monosulfato y del hidrato.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

La contribución de la fase de ferrialuminato tetracálcico (C_4AF) al proceso es:

- ♦ La influencia que tiene la fase C_4AF es menor que la de la fase C_3A sobre la cantidad de agua en la consistencia normal de la pasta de Cemento.
- ♦ Podría originar, en algunos casos, algo de "fraguado rápido", siempre que el Cemento no tuviese Yeso.
- ♦ Genera una mínima contribución a la resistencia mecánica a la compresión.
- ♦ Es mejor que el C_3A para tener un Cemento con buena trabajabilidad.

El grado de hidratación de las fases de C_3A y C_4AF en solución de $Ca(OH)_2$, a una temperatura igual como una función del tiempo se muestra en la figura 13.

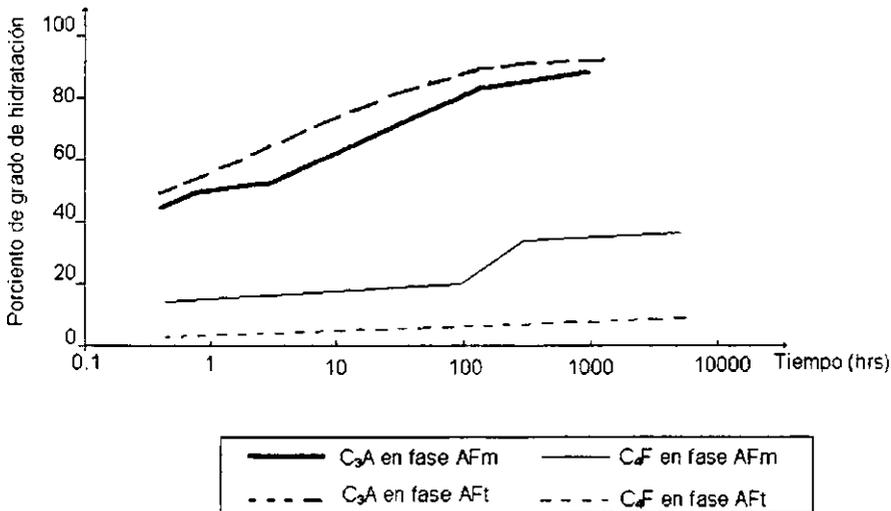


Figura 13: Comparación del grado de hidratación del C_3A y C_4AF en solución de hidróxido de calcio, en función del tiempo.

Comparando el grado de hidratación de los minerales: C_3S , β - C_2S , C_3A y C_4AF en función del tiempo tenemos:

El grado de hidratación que tiene el C_3S es substancialmente mayor que el del β - C_2S ; después de 2 días de hidratación el grado que presenta el C_3S es aproximadamente 7 veces mayor que el del β - C_2S , pero a los 28 días el grado de hidratación que presenta el C_3S es solo 3.7 veces mayor que el del β - C_2S .

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

Para el caso del C_3A y del C_4AF , si se comparan ambos en fase AFm (cuando hay poco Yeso presente) el grado de hidratación del C_3A es mayor 1.6 veces, y en fase AFt (cuando hay suficiente Yeso presente), el grado de hidratación del C_3A es mayor 2.6 veces.

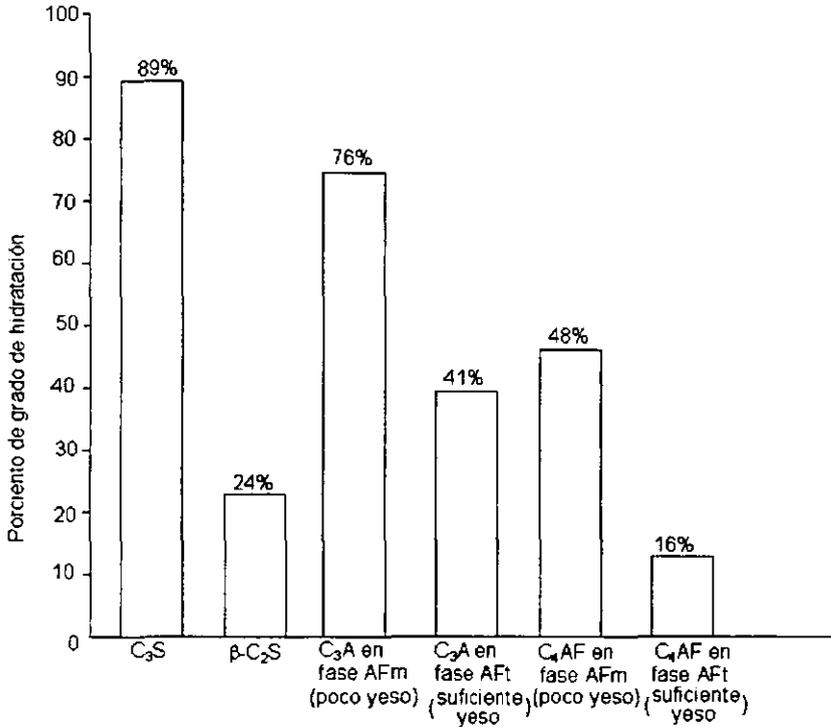


Figura 14: Comparación del grado de hidratación de las cuatro fases del Clinker a la edad de 28 días, en una solución de $Ca(OH)_2$.

Tomando en cuenta el tiempo de hidratación de las diferentes fases del Clinker, se tiene que la fase de C_3A es la fase que requiere más hidratación, seguida por la fase de C_3S ; las fases de C_4AF y C_2S son las que tienen menor grado de hidratación, como se muestra en la figura 15:

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

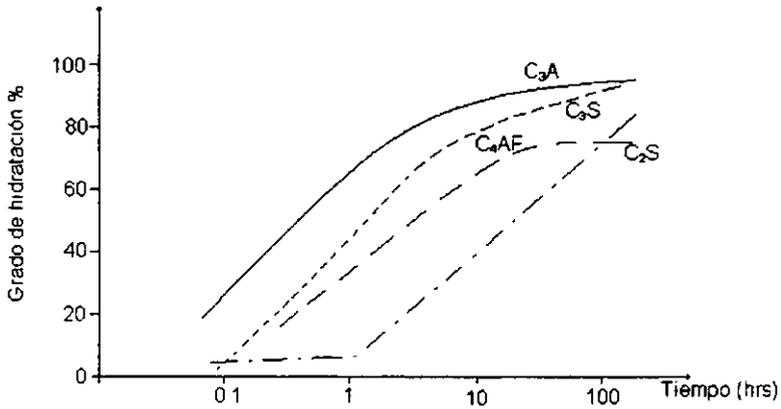


Figura 15: Comparación del grado de hidratación de las diferentes fases del Clinker, en función del tiempo.

IMPUREZAS PRESENTES EN LAS FASES DEL CLINKER.

Tanto las Normas Nacionales como las Internacionales limitan el porcentaje de impurezas presentes en las fases del Clinker por los diversos problemas que su presencia ocasiona:

- ♦ **Óxido de silicio libre:** El óxido de silicio libre (SiO_2) que se encuentra presente en forma no combinada con otros óxidos (en forma de cuarzo) presentará dificultades al ser procesado, ya que entre mayor sea su cantidad:

1.- Aumentará el consumo de combustible en el horno, ya que será necesario tener una temperatura más alta para acelerar el proceso de reacción y permitir la adecuada combinación de este óxido.

2.- El incremento de óxido de silicio libre provocará que la fase líquida dentro del horno tenga una viscosidad menor, con lo que se dificultará la formación de la costra, reduciéndose la vida del ladrillo refractario y aumentando la radiación en la coraza.

3.- Debido a las dificultades que presenta para combinarse con el óxido de calcio, se producirá cal libre (óxido de calcio no unido a óxido de silicio), con lo que el Cemento producirá expansión en el concreto endurecido, causando fracturas.

- ♦ **Óxido de Magnesio:** Generalmente el óxido de magnesio proviene de calizas dolomíticas y de algunas arcillas, y compite con el óxido de calcio en el proceso de Clinkerización, ya que actúa en forma similar al óxido de calcio y tiende a formar silicatos de magnesio. Entre mayor sea su contenido:

1.- La viscosidad y la tensión superficial de la fase líquida se reducirá, lo que aumenta las reacciones de Clinkerizado.

2.- Debido a su competencia con el CaO , cuando se encuentra por arriba del 2%, al reaccionar a temperaturas altas, favorece la formación rápida de C_3S .

3.- Los cambios en las características de la fase líquida hacia el lado líquido (es decir, poco viscoso), provocará boleo en el Clinker en la zona de Clinkerizado.

4.- Los silicatos cálcicos aceptan cierta cantidad de magnesio en solución sólida, pero si este rebasa el 2%, la formación de cristales de periclasa (MgO) provocará una expansión tardía en el Cemento hidratado.

5.- Cuando el contenido total de MgO en el Clinker es inferior al 2%, se incrementará la formación de C_3S sin afectar el contenido del C_2S .

6.- La competencia del magnesio con el calcio no solo será para la formación de silicatos, sino que también se reflejará en la fase líquida, generando un incremento en la cantidad formada.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

- ◆ **Óxido de Titanio:** El óxido de titanio proveniente de los materiales arcillosos puede influenciar el comportamiento local de los materiales durante la etapa de Clinkerizado si alcanza cantidades altas. Su presencia en la mezcla puede ocasionar:

1.- Una brusca reducción de la formación del C_3S y un incremento en la formación del C_2S .

2.- Al incluirse en la fase líquida provocará una reducción en la viscosidad y en la tensión superficial.

3.- La formación de C_4AF en forma preferencial sobre la de C_3A , debido a que en el proceso participa en forma similar al óxido de hierro; Su presencia en el C_4AF provocará que el Clinker sea de color más oscuro y provocará que el Cemento retarde ligeramente su fraguado, y que el desarrollo de resistencia mecánica a edades tempranas sea menor.

- ◆ **Óxido de Manganeso:** El óxido de manganeso, al igual que el óxido de titanio, se encuentra en algunos materiales arcillosos, y puede alterar el comportamiento local de la reacción de Clinkerizado. Los efectos que presenta, al aumentar su concentración, son:

1.- Una menor viscosidad de la fase líquida, debido a que su comportamiento es similar al del óxido de hierro.

2.- Producirá cristales de menor tamaño, debido a que al generar una fase líquida más fluida (de menor viscosidad), el tiempo de residencia del material en la zona de Clinkerización será menor.

3.-El Cemento tendrá un desarrollo de resistencia mecánica menor debido a la formación preferencial de C_4AF sobre C_3A .

- ◆ **Óxido de Estroncio:** Generalmente el óxido de estroncio proviene de los materiales arcillosos y compite con el óxido de calcio en la Clinkerización. Los efectos que causa, conforme aumenta su concentración son:

1.-Acelera la reacción de combinación del CaO en la fase sólida.

2.- Permite un decremento en la viscosidad de la fase líquida.

3.- En presencia del óxido de estroncio, el C_3S formado presenta poca estabilidad, la tendencia a la liberación de CaO por la destrucción del C_3S es alta, lo que provoca los problemas generalmente asociados con la presencia de cal libre. Esta destrucción causará una reducción en la resistencia mecánica a la compresión del Cemento.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

♦ **Óxido de Cromo:** El óxido de cromo proviene del material refractario del horno y pasa en mayor o menor medida a formar parte del Clinker. el aumento de concentración en el Clinker genera:

- 1.- Una reducción en la viscosidad y en la tensión superficial de la fase líquida, ya que actúa como el óxido de hierro.
- 2.- La formación de Alita se verá altamente favorecida, lo que incrementará el número de cristales presentes.
- 3.- El cromo que haya logrado pasar a formar parte de la solución sólida con el C_3S provocará su descomposición en C_2S y CaO .
- 4.- El C_3S no destruido presentará una mayor reactividad hidráulica a edades tempranas, pero será difícil asegurar la calidad del producto final bajo estas condiciones.
- 5.- Se puede generar cromo soluble en el Clinker, el cual resulta dañino al contacto.

♦ **Álcalis (Na_2O , K_2O):** Los óxidos alcalinos, provenientes de los materiales arcillosos, tienen una presencia que puede resultar importante en el proceso de Clinkerización debido a la formación de ciclos internos de fusión-vaporización-solidificación en el interior del horno, que modifican la formación del Clinker. El aumento de su concentración puede generar:

- 1.- Como estos forman parte de la fase líquida a las temperaturas de Clinkerizado, el incremento de esta fase facilitará la formación de costra.
- 2.- El incremento de la fase líquida facilitará la Clinkerización a temperaturas menores.
- 3.- Los ciclos internos generados pueden provocar problemas en la operación si la condensación y la solidificación de estos se presenta en zonas de baja velocidad del material.
- 4.- Si su contenido en el Clinker es superior al 6% generan problemas de expansión en el concreto, por reacciones con algunos agregados.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

- ◆ **Azufre:** El azufre generalmente entra en el proceso junto con el combustible, y en algunos casos, con la materia prima, como la pirita o el Yeso; afecta el proceso de Clinkerizado, ya que junto con los álcalis, participa en los ciclos internos que modifican las cantidades y calidades de las fases presentes. El aumento de la concentración del azufre puede generar:

- 1.- Una reducción de la temperatura de aparición de la fase líquida (casi 100°C), y la modificación de algunas de sus características, como son: una menor viscosidad y tensión superficial.
- 2.- Cuando se encuentra en exceso con respecto a los álcalis presentes, modifica el ciclo de álcalis y azufre, con lo que se forman compuestos menos volátiles, capaces de salir con el producto final.
- 3.- Facilita la descomposición del C₃S en el proceso de enfriamiento, si la cantidad de sulfatos es alta.
- 4.- Cuando se encuentra en exceso forma Sulfatos de calcio en sustitución del óxido de calcio.
- 5.- Debido a los efectos que presenta sobre la fase líquida, mejora la quemabilidad del material a baja temperatura.

- ◆ **Pentóxido de fósforo:** Proviene de los materiales arcillosos utilizados y generalmente se presenta en pequeñas cantidades. En exceso, puede causar:

- 1.- Una aceleración en la reacción de Clinkerización, debido a que actúa como catalizador en la formación de los silicatos cálcicos.
- 2.- El C₃S formado presenta tendencia a descomponerse en el enfriamiento, por lo que se reduce el contenido real de este en el Clinker.

- ◆ **Fluoruros:** Estos son difíciles de encontrar en las materias primas para Cemento, pero algunas arcillas lo contienen en trazas. Su presencia en el Clinker está normalmente relacionada con el uso de materiales en el Clinkerizado (uso de fluorita: CaF₂). Cuando aumenta su concentración se observa:

- 1.- Se reduce la temperatura de formación del C₃S entre 150 y 200°C.
- 2.- No afecta de manera notable el ciclo interno del horno.
- 3.- Tiene tendencia a reducir la resistencia mecánicas de los componentes del Cemento, debido a la posible destrucción de los minerales formados.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

♦ **Cloruros:** El cloro proviene de las materias primas. En algunos procesos con alto contenido de álcalis se ha utilizado el CaCl_2 para incrementar su volatilidad y reducir su contenido en el Clinker. Cuando se incrementa su contenido:

- 1.- Se incrementa la volatilización de los álcalis, incrementando el ciclo interno y permitiendo la aparición de problemas operacionales. Cuando se tienen problemas de estabilidad térmica en el interior del horno provocará la aparición de anillos.
- 2.- Se incrementa la formación de la fase líquida, variando la temperatura de aparición de ésta en forma drástica.

CEMENTOS QUE SE PUEDEN OBTENER DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CLINKER.

Dependiendo de las características operativas del proceso, así como de las diferencias en las materias primas alimentadas, o de las necesidades de Cemento que se requieran, se pueden producir diferentes Cementos a partir de las variaciones en las composiciones de las fases del Clinker:

- ◆ **Cemento Portland Normal, Tipo I:** Es utilizado en aplicaciones que no requieren otro tipo que tenga características especiales. La mayoría de las estructuras, pavimentos y depósitos de agua se construyen con este tipo de Cemento.
- ◆ **Cemento Portland modificado Tipo II:** Genera menos calor al hidratarse y es más resistente al ataque por sulfatos que el tipo I. Este Cemento se utiliza en estructuras que tienen secciones grandes, tales como estribos de gran tamaño y muros gruesos de retención. También se pueden utilizar en drenajes en donde exista una concentración moderada de sulfato.
- ◆ **Cemento Portland de rápida generación de alta resistencia Tipo III:** Se usa cuando se requiere generar una alta resistencia en pocos días. El uso de la alta resistencia rápida permite descimbrar (retirar las formas o moldes) más pronto y períodos más cortos de curado.
- ◆ **Cemento Portland de bajo calor de hidratación Tipo IV:** Genera menos calor durante la hidratación que el tipo II y se utiliza para construcciones masivas de concreto, tales como las cortinas para presas grandes en donde un aumento grande en la temperatura ocasionaría fracturas. El Cemento tipo IV adquiere resistencia con mayor lentitud que el tipo I. El contenido de C_3A está limitado a un máximo de 7%.
- ◆ **Cemento Portland resistente a los sulfatos Tipo V:** Es un Cemento especial, que no siempre está disponible y se utiliza cuando el concreto está expuesto a ataques severos por sulfatos. El Cemento tipo V adquiere resistencia con más lentitud que el tipo I. El contenido de C_3A está limitado a un máximo de 5%.
- ◆ **Cemento Portland aligerados (o que arrastran aire):** Son aquellos en que se producen, de forma intencional, burbujas diminutas de aire, muy cercanas entre sí. El aire arrastrado hace que el concreto sea más resistente a los efectos del congelamiento y descongelamiento repetido así como de los agentes para disolver el hielo utilizados en los pavimentos. Para obtener estos Cementos se agregan productos químicos inclusores de aire al Clinker durante la manufactura. Los tipos I a III se pueden obtener como Cementos aligerados y se designan como tipo IA, IIA y IIIA en la Norma C-175 de la ASTM.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

- ◆ **Cemento de endurecimiento rápido:** Tiene una alta superficie específica (blaine) por lo cual presenta una hidratación acelerada, debido a que una mayor cantidad de Clinker presenta un contacto con el agua. En la molienda final debe añadirse un alto porcentaje de Yeso para regular el fraguado.
- ◆ **Cemento de endurecimiento ultrarrápido:** Este presenta una hidratación considerablemente acelerada debido a su mayor contenido de las fases de C_3S y C_3A y una alta superficie específica (blaine). Es esencial un alto contenido de Yeso para controlar el tiempo de fraguado inicial. La demanda de agua es muy alta debido a su alta área superficial.
- ◆ **Cemento Blanco:** Se forma menos cantidad de Etringita durante la hidratación inicial cuando su contenido de álcalis es bajo, debido al fuerte quemado del Clinker durante la manufactura, es similar al Cemento bajo en contenido de álcalis.
- ◆ **Cemento con bajo contenido en álcalis:** se forma menor cantidad de Etringita durante la hidratación inicial. El bajo nivel de álcalis incrementa la solubilidad del CaO y a su vez disminuye la solubilidad del SO_4^{2-} , por lo tanto, disminuye la propensión para la formación de la Etringita.
- ◆ **Cemento de alta resistencia a los sulfatos:** Tiene menor formación de Etringita en la hidratación inicial, ya que la formada proviene de la fase de ferrialuminato tetracálcico, la cual es menos reactiva que el C_3A .
- ◆ **Cemento de albañilería o mortero:** Tienen como aditivos caliza o pizarra finamente molidos, los cuales tienen alguna reacción química con el C_3A y con el C_4AF para entrar en las fases de Etringita y monosulfato.
- ◆ **Cemento con alto contenido de Belita:** Este tipo de Cemento tiene una baja relación de formación de C-S-H, así como una menor producción de $Ca(OH)_2$.
- ◆ **Cemento de alta resistencia inicial:** la resistencia inicial rápida se da como consecuencia de la mineralización causada por la reacción rápida de los cristales de Alita con una actividad hidráulica. Esto intensifica la formación de C-S-H y $Ca(OH)_2$ formado durante la hidratación original.
- ◆ **Cemento hidrofóbico:** Este tipo de Cemento requiere de una cantidad mayor de agua, para poder romper el sello hidrofóbico, y el fraguado aparece retardado. Se utiliza, a veces, cuando es particularmente deseable un concreto o mortero repelente al agua. Es Cemento molido con ciertos jabones y aceites. Su efectividad está limitada a la presión de una columna de agua de 3 o 4 pies.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

La determinación de la composición de las fases del Clinker se puede efectuar, en forma teórica, utilizando las ecuaciones de Bogue, aunque estas solo toman en cuenta la cantidad de óxidos alimentados, por lo que los resultados obtenidos son solo estequiométricos (no se toman en cuenta factores como la cantidad de impurezas, la temperatura de cocción y la velocidad de aumento de la temperatura):

Cuando la relación de los porcentajes del óxido de aluminio y el óxido de hierro es de 0.64 o mayor, los porcentajes de C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF pueden calcularse a partir de los análisis químicos como sigue:

$$C_3S = (4.071x\%CaO) - (7.600x\%SiO_2) - (6.718x\%Al_2O_3) - (1.430x\%Fe_2O_3) - (2.852x\%SO_3)$$

$$C_2S = (2.867x\%SiO_2) - (0.7544x\%C_3S)$$

$$C_3A = (2.650x\%Al_2O_3) - (1.692x\%Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3.043 \times \%Fe_2O_3$$

Cuando la relación entre los óxidos de hierro y aluminio es menor de 0.64, una solución sólida de aluminoferrita cálcica (expresada como $C_4AF + C_2F$) se forma. Los contenidos de esta solución y los de silicato tricálcico (C_3S), se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$(C_4AF + C_2F) = (2.100x\%Al_2O_3) + (1.702x\%Fe_2O_3)$$

$$C_3S = (4.071x\%CaO) - (7.600x\%SiO_2) - (4.479x\%Al_2O_3) - (2.859x\%Fe_2O_3) - (2.852x\%SO_3)$$

No existe la presencia de C_3A bajo estas composiciones. El C_2S debe ser calculado como se mostró previamente.

En el cálculo del C_3A , los valores de Al_2O_3 y de Fe_2O_3 determinados cercanos a 0.01% deben ser utilizados. En los cálculos de otros compuestos los óxidos determinados cercanos a 0.1% deben ser utilizados.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

FACTORES DE CONTROL DE LAS MATERIAS PRIMAS.

La materia prima alimentada a los hornos para la obtención del Clinker (llamada harina cruda), es un sistema multicomponente de gran complejidad, dividido para su estudio en "componentes mayores", que son los componentes que se encuentran en mayor porcentaje, tales como: el carbonato de calcio, y los óxidos de silicio, aluminio y hierro, y "componentes menores" que son los que se encuentran en trazas, tales como los óxidos de magnesio, azufre, sodio, potasio, etc.

Las fases del Clinker están formadas por los componentes mayores de la harina cruda, por lo que se acepta comúnmente que el efecto químico de su presencia es de importancia para la formación del Clinker.

Ya que la mezcla para la formación de la harina cruda se realiza con minerales de composición variable que contienen los componentes necesarios, y que generalmente estos no se encuentran en forma de óxidos, es bastante difícil predecir los resultados que se obtendrán analizando los componentes por separado. Considerando esto, se utilizan parámetros de control que relacionan la presencia de los componentes principales que forman las fases del Clinker y que permiten predecir la operación de calcinación con mayor precisión que el análisis de la composición mineralógica por sí misma.

Para establecer este control, se utilizan 3 parámetros empíricos, bastante comunes en la industria del Cemento, los cuales son conocidos como:

- ◆ **Factor de Cal de Saturación:** **FCS**
- ◆ **Módulo de Sílice:** **MS**
- ◆ **Módulo de Alúmina y Hierro:** **MA**

El Factor de Cal de Saturación es una ecuación matemática que permite el cálculo óptimo del contenido de óxido de calcio en la harina cruda. Tiene como objetivo proporcionar al que lo analiza, una forma de calcular la cantidad máxima de óxido de calcio que pueda combinarse con los tres óxidos principales para formar las fases cristalográficas del Clinker.

La justificación científica del FCS se inicia en el análisis del diagrama de fases del sistema cuaternario de los óxidos involucrados, y poder obtener una relación matemática que explique su comportamiento en equilibrio.

Se han desarrollado varias investigaciones para obtener una ecuación que describa esta relación, tales como los factores de saturación I, II y III de Kuhl, el Módulo hidráulico y algunas otras ecuaciones empíricas, pero actualmente se utiliza con mayor regularidad la siguiente ecuación:

Capitulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

$$FCS = \frac{\%CaO}{2.8 \times (\%SiO_2) + 1.18 \times (\%Al_2O_3) + 0.65 \times (\%Fe_2O_3)}$$

Se busca que el valor que se obtenga con esta ecuación sea igual, o ligeramente inferior a 1.

Si FCS es igual a 1.00, se obtendrá la máxima combinación posible del óxido de calcio con los óxidos de sílice, aluminio y hierro. El Clinker que teóricamente se encuentre bien quemado, solo formaría las fases C_3S , C_3A y C_4AF . El silicato dicálcico (C_2S) no se formaría, debido a que está presente la cantidad estequiométricamente requerida de calcio para formar el silicato tricálcico (C_3S).

Cuando el factor cal de saturación es menor de 1.00 se tendrá una deficiencia de calcio para poder lograr la máxima combinación posible de la sílice para únicamente formar C_3S , por lo que mientras disminuye el contenido de la fase C_3S se incrementa el de la fase C_2S . La formación de las fases C_3A y C_4AF no varía por la deficiencia de calcio, ya que no es factible obtener compuestos de aluminio y hierro con un menor contenido de calcio que puedan coexistir en equilibrio con las fases de silicatos cálcicos del sistema cuaternario del Cemento.

Cuando el factor cal de saturación está por encima de 1.00 se tiene un exceso de calcio disponible para efectuar la reacción de formación de C_3S , C_3A y C_4AF , por lo que se tendrá un exceso de óxido de calcio. Una harina cruda con un factor cal de saturación superior a 1.00 producirá cal libre al ser calcinada en el horno, independientemente de la temperatura y del tiempo de residencia a alta temperatura a la que se haga el quemado.

Debe tomarse en cuenta que, si bien, el aumento en el valor del FCS tendrá como resultado un incremento en el contenido esperado de la fase de C_3S en el Clinker, dicho valor no indica el porcentaje de C_3S que se obtendrá realmente en el Clinker con respecto al máximo posible, puesto que es un proceso industrial.

Generalmente, la operación de calcinación se realiza con una alimentación al horno con un valor de FCS que este entre 0.92 y 1.00, para asegurar que no exista cal libre entre las fases del Clinker.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

Un incremento en el valor del FCS tendrá los siguientes efectos:

- La harina cruda será más difícil de calcinar, debido a que al aumentar el valor del FCS, se tendrá mayor cantidad de cal libre para combinar con la misma cantidad de sílice, aluminio y hierro.
- Se tiene la posibilidad de crear un problema de expansión debido a cal libre alta. Una cantidad elevada de calcio dificulta su combinación, por lo que las partículas que no hayan reaccionado para formar las fases del Clinker producirán expansión.
- El contenido de la fase C_3S aumentará como resultado de disponer de una mayor cantidad de calcio.
- El Clinker resultante presentará un incremento en el desarrollo de resistencias en el Cemento como resultado del incremento de la fase de C_3S .
- Según datos experimentales, el incremento de 0.01 unidades en el valor del FCS tendrá como consecuencia un aumento de $20^{\circ}C$ en la temperatura de Clinkerización.

El Módulo de Sílice es la relación matemática que correlaciona a las fases sólidas y líquidas presentes en la zona de Clinkerizado. Esta relación tiene como objetivo proporcionar la información necesaria para poder predecir el comportamiento de la mezcla sólido-líquido en el interior del horno, independientemente de la cantidad y calidad del líquido en disposición.

Este Módulo es la relación entre el óxido de sílice y los óxidos de aluminio y hierro, y se expresa con la ecuación:

$$MS = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}$$

El Módulo de sílice caracteriza la relación de sólidos a líquidos en la zona de Clinkerización, debido a que a estas temperaturas el óxido de sílice se encuentra presente primordialmente en fases sólidas (C_3S , C_2S y óxidos de sílice), mientras que los óxidos de aluminio y hierro se encuentran presentes en la fase líquida. La difusión del óxido de sílice, que se encuentra en la fase sólida, hacia la fase líquida del Clinker y la contradifusión del óxido de aluminio y del óxido de hierro presentes en la fase líquida hacia la fase sólida es casi nula, por lo que se justifica el asumir esta relación "sólido/líquido".

Debido a que el óxido de calcio coexiste en ambas fases bajo estas características, formando diferentes compuestos con los componentes presentes, no se toma en cuenta para establecer esta relación.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

Al contrario que en el Factor Cal de Saturación, en el caso del Módulo de Sílice no se tiene justificación de tipo estequiométrico para establecer la relación matemática utilizada, pero la experiencia a arrojado suficiente información para permitir establecer parámetros de control adecuados y poder predecir el comportamiento de la mezcla sólido-líquido en el interior del horno rotatorio de Cemento.

El aumento del valor del Módulo de Sílice genera:

- Un quemado difícil debido a la alta relación de sólido/líquido, lo que dificulta la transferencia de fase sólida en la fase líquida, por lo que para quemar adecuadamente el material se tendrá un alto consumo de combustible.
- Debido a la dificultad que se presenta para completar la combinabilidad, se puede presentar cal libre en el producto, lo que generará expansión en la hidratación del Cemento.
- Debido a la poca cohesividad de una mezcla con muchos sólidos, se dificultará la formación de la costra, lo que traerá como consecuencia una alta radiación al cuerpo del horno debido a la ausencia de la costra como aislante.
- La mala formación de la costra también repercutirá en un deterioro gradual del material refractario.
- Si el Módulo de silicio es incrementado a valores cercanos a los del Módulo de A/F, se requerirá mayor temperatura de Clinkerización para obtener la misma calidad del producto.

El tercer Módulo utilizado para el control del proceso es el Módulo de Alúmina y Hierro (MA A/F), el cual es un parámetro de control que establece la relación que existe entre el Al_2O_3 y el Fe_2O_3 , como se muestra en la ecuación:

$$MA = A/F = \frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

El valor de este Módulo define la fase líquida que se va a producir en el sistema. El control de este Módulo permite conocer la viscosidad de la fase líquida que se encuentra presente en el horno. Si el valor de A/F se incrementa, el líquido producido tendrá una mayor viscosidad, independientemente de la cantidad formada.

Este parámetro sirve para poder determinar el punto eutéctico de la mezcla, que es el punto en el cual la mezcla o aleación de 2 componentes presenta un punto de fusión inferior al punto de fusión de cada uno de los componentes de forma individual, el cual, para la máxima cantidad de fase líquida a la mínima temperatura, se obtiene cuando la relación A/F tiene un valor de 1.38.

Para poder obtener una nodulación adecuada, el porcentaje de la fase líquida total que se forma debe de estar entre 20 y 25% en peso.

Capítulo IV: Clinker y sus características fisicoquímicas.

Para poder determinar la cantidad de fase líquida total se pueden emplear ecuaciones experimentales tales como:

- Cuando $MA > 1.38$
fase Líquida (1338°C) = $6.1 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) + \text{SO}_3$
- Cuando $MA < 1.38$
fase Líquida (1338°C) = $8.5 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 5.22 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{SO}_3$
- Cuando $MA > 0.64$
fase Líquida (1440°C) = $2.95 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 2.2 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{SO}_3$
- Cuando $MA < 0.64$
fase Líquida (1450°C) = $3.0 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 2.25 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{SO}_3$

Estas ecuaciones tienen como limitante que el valor del MgO debe estar por debajo del 2% para poder ser utilizadas.

Generalmente a temperaturas del orden de los 1400°C se origina una mayor formación de fase líquida y la viscosidad de ésta puede ser reducida por el efecto de los álcalis naturales de la harina cruda o por la dosificación de una mayor cantidad de Fe_2O_3 .

En la operación, un incremento del Módulo de Alúmina y Fierro resultará en:

- Un aumento en la viscosidad de la fase líquida, lo que provocará que el material sea más difícil de quemar. El incremento en viscosidad puede contrarrestarse incrementando la temperatura, pero esto provocará un mayor consumo de combustible.
- La mayor presencia de aluminio provocará la formación preferencial de la fase de C_3A , por lo que se incrementará la proporción $\text{C}_3\text{A}/\text{C}_4\text{AF}$.
- Manteniendo el valor del Módulo de sílice constante, conforme el valor del Módulo de Alúmina y Fierro se aleja de 1.38 (ya sea hacia arriba o hacia abajo), habrá una mayor dificultad para la formación de la costra (con las consecuencias de esto), debido a la variación en la cantidad de fase líquida eutéctica presente a diferentes temperaturas.
- Cuando el MS es de valor bajo y el MA A/F aumenta, la fase líquida aumenta su viscosidad y el material será pegajoso, por lo que el Clinker presentará un "boleo" alto.

SISTEMAS DE CALCINACIÓN.

Los sistemas de calcinación para el proceso de elaboración de Cemento Portland han variado con el transcurso de los años, para ser más eficientes en el consumo de energéticos, producir menos contaminación atmosférica y ofrecer un Cemento de mayor calidad.

En un proceso moderno, la operación de calcinación requiere los pasos mostrados en la figura 16:

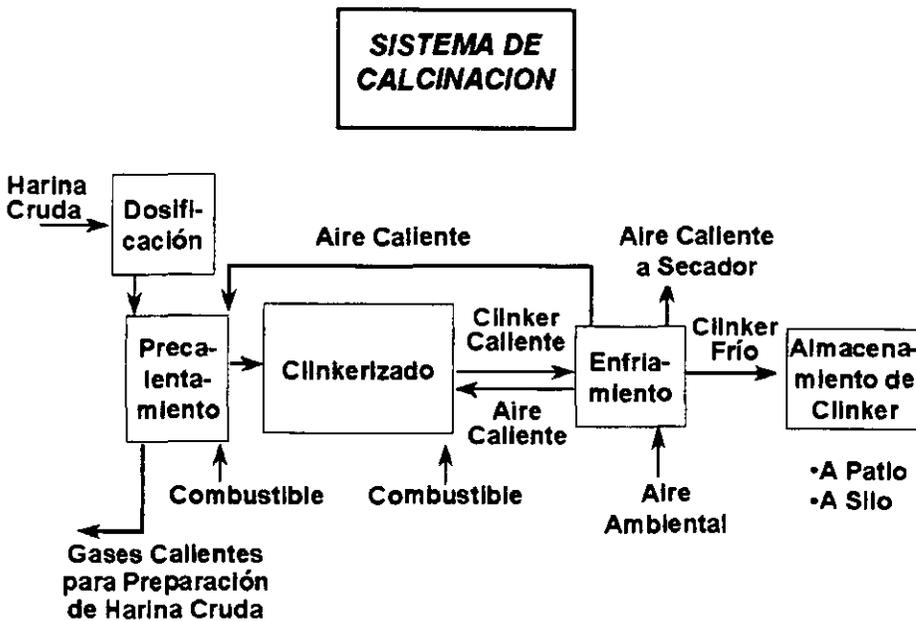


Figura 16: Diagrama de Bloques de la operación de Calcinación.

Los diferentes sistemas de calcinación han evolucionado desde los de sistemas húmedos, en los que se alimentaba la pasta con una humedad de 30 a 40% al horno, pasando por los sistemas semi-húmedos en los que la pasta se prensaba para extraer humedad y se alimentaba al horno con un 15 a 20%, los sistemas semi-secos en los que se utilizó un plato nodulador para alimentar una harina cruda al horno con un porcentaje de humedad de 9 a 12% y, actualmente, los sistemas secos, en los que se utiliza un sistema de precalentamiento con ciclones y un calcinador, ya sea en línea o fuera de línea, para introducir al sistema una harina cruda con un contenido de humedad máximo de 0.5%.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

El grado de evolución de los equipos permite trabajar un proceso más eficiente: hornos de menor longitud al tener un mejor intercambio térmico en el precalentador, con lo que el consumo de energía eléctrica y de combustible disminuye, y la eliminación de equipos con movimientos mecánicos, lo que disminuye la necesidad de paros no programados para efectuar mantenimientos de emergencia.

Las medidas habituales para los hornos en función del proceso de producción (con su relación longitud/diámetro, L/D), son:

- ◆ Hornos de proceso húmedo: 160 a 180 metros (L/D = 25).
- ◆ Hornos de proceso semi-húmedo: 120 a 140 metros (L/D = 20).
- ◆ Hornos de proceso semi-seco: 100 a 120 metros (L/D = 17).
- ◆ Hornos de proceso seco: 60 a 80 metros (L/D = 10).

Las dimensiones del horno son también un factor a considerar, ya que su recubrimiento interior con ladrillo refractario es demasiado costoso.

Los primeros procesos utilizados para la elaboración del Cemento Portland no contaban con una tecnología de secado, por lo que resultaba más fácil para el sistema de molienda producir una pasta, razón por la cual el proceso se llama de vía húmeda.

Se ha manejado la teoría de que el Clinker producido por el sistema de vía húmeda es de mejor calidad, debido a la homogeneidad lograda en la pasta cruda alimentada al horno. Actualmente también se conoce el hecho de que la zona de secado de los hornos de sistema húmedo provoca un efecto en los cristales de las materias primas, haciendo que la formación del Clinker sea más rápida y generando una cristalografía que permitirá la producción de un Cemento de mejor calidad.

El material alimentado al horno era una pasta con un contenido de humedad de 30 a 40%, por lo que el horno era de una longitud bastante grande, necesaria para la eliminación de la humedad de la pasta y para la calcinación de esta, por lo que el costo en combustible y energía eléctrica era bastante elevado, así como el cambio en el recubrimiento del horno. Actualmente se continúan utilizando estos tipos de hornos en algunos países, debido a que cuentan con energéticos de bajo costo.

El proceso vía húmeda tiene como gran desventaja la baja producción de Clinker en relación con su tamaño. Estos hornos no pueden producir más de 600 a 700 toneladas por día y su longitud alcanza los 170 metros. Desde el punto de vista mecánico, para tener que soportar en forma alineada la coraza del horno era necesario tener un gran número de soportes rodantes, lo que implicaba una supervisión continua y de personal experto; de no ser así, se presentaban frecuentemente daños tanto a los roles soporte como a las soldaduras de la coraza. Este sistema casi no se emplea en la actualidad.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

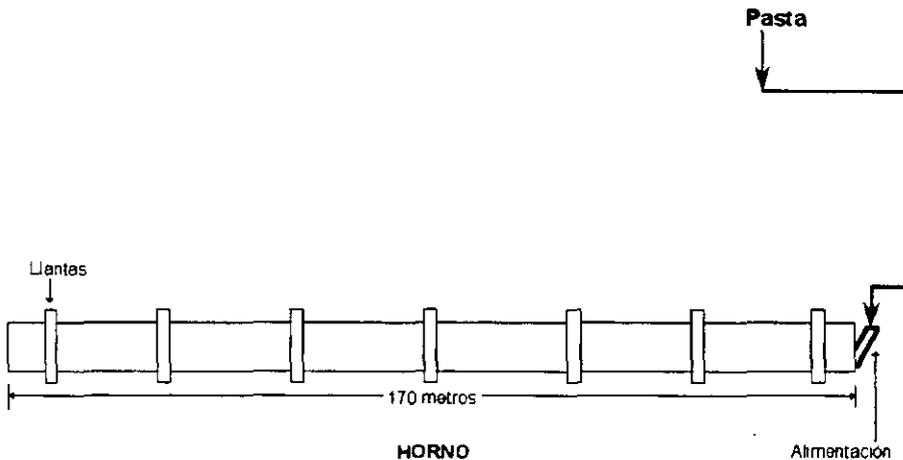


Figura 17: Horno vía húmeda con alimentación de pasta.

Después se implementó el uso de un tambor secador para reducir la humedad de la pasta, y así poder disminuir la longitud del horno. A este proceso se le conoce como proceso de vía semi-húmeda. La pasta se alimenta al horno con una cantidad de humedad que va de 15 a 20%, y la longitud del horno es significativamente menor a la del horno vía húmeda, por lo que se tiene menor gasto tanto en combustible como en energía eléctrica. La desventaja de este sistema es que la continuidad del horno depende de la operación del tambor, además son dos equipos en movimiento a los cuales debe dárseles supervisión y mantenimiento.

Actualmente ya no se emplea este sistema.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

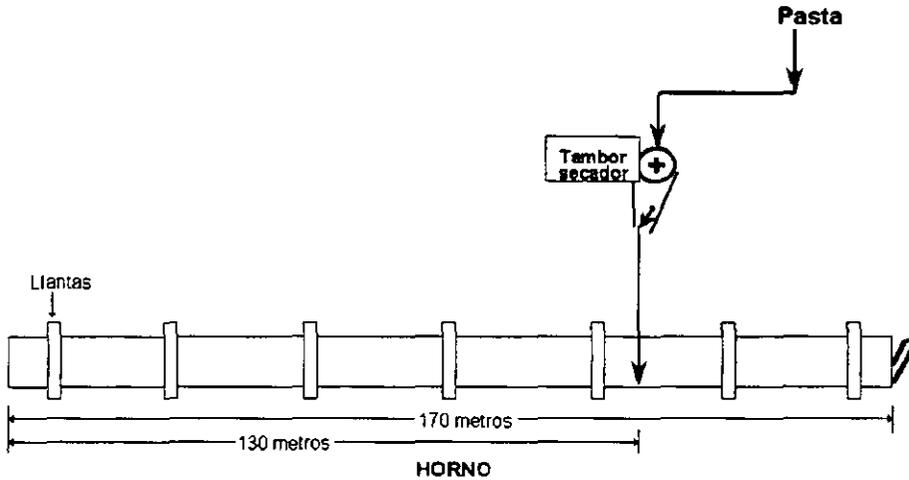


Figura 18: Longitud de Horno vía semi-húmeda, con tambor secador. (Comparativo a horno vía húmeda).

El siguiente paso tecnológico para mejorar el sistema de producción del Clinker, fue la introducción de un filtro prensa en el sistema. El filtro prensa es un equipo que introduce la pasta entre dos placas porosas, las cuales sirven para compactarlo, con lo que disminuye la cantidad de humedad presente en el material, el cual es llamado "galleta"; este equipo cuenta con 6 o 7 diferentes cámaras para el prensado de material, por lo que, aunque el proceso se desarrolla por lotes, la entrada y salida de material se efectúa en un proceso continuo. La galleta es triturada e introducida en una parrilla Lepol para su secado.

La parrilla Lepol, llamada así por su descubridor y la casa que adquirió la patente, consiste de una banda metálica perforada dentro de una caja metálica, con un avance hacia la alimentación del horno. Esta parrilla se alimenta con el material triturado, el cual forma un lecho de entre 15 y 20 cm, con un 5 a 7% de humedad.

Este sistema permitió que la longitud del horno fuera menor, debido a que la pasta alimentada al horno tiene menor humedad.

Debido a que tanto el filtro prensa como la parrilla Lepol cuentan con partes mecánicas en movimiento, y el proceso de alimentación de material al horno depende completamente de una óptima operación de estos equipos, la inversión requerida para que el proceso se desarrolle en condiciones estables es alta, ya que se requiere tener un equipo auxiliar para los paros de mantenimiento, ya sean programados o de emergencia. Una falla de estos equipos hace que la producción de Clinker se pare, y debido a la cantidad de partes mecánicas que pueden fallar por desgaste, el tiempo de paro es indefinido.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Actualmente ya no se emplea este sistema.

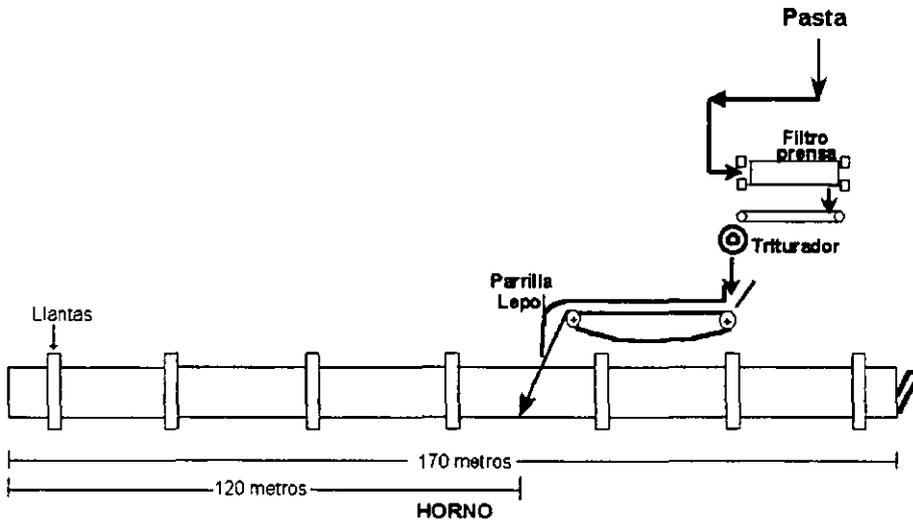


Figura 19: Horno vía semi-húmeda con filtro prensa y parrilla Lepol. (Comparativo a horno vía húmeda).

El siguiente avance tecnológico fue la introducción de la harina cruda, que es un material que no necesita de un secado en el interior del horno, es decir, que se alimenta al horno con un contenido de humedad mínimo, debido a la aplicación de métodos de secado previos, generalmente en los molinos de materia prima mediante el uso de los gases calientes residuales provenientes del horno. Las dimensiones del horno aumentaron con la introducción de la harina cruda sin tratamiento previo, pero fueron menores que las de los hornos vía húmeda.

A pesar del inconveniente de la longitud del horno, este método no tiene otros equipos en movimiento, por lo que las revisiones están limitadas al cuerpo del horno y, principalmente, a las llantas y los roles.

Este sistema tiene como problema principal el arrastre de polvo por los gases calientes, ya que debido a la forma de alimentación, el material carece casi por completo de cohesión y es fácilmente levantado por los gases calientes.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

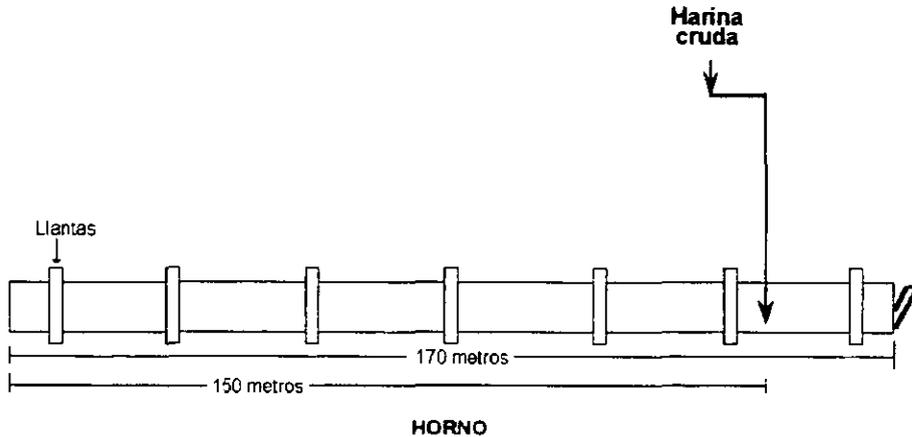


Figura 20: Horno vía semi-seca con alimentación de harina cruda. (Comparativo a horno vía húmeda).

El siguiente paso fue la introducción de un equipo para prevenir el arrastre de polvo, por lo que se introdujo al horno un material nodulado, con cierta cantidad de humedad, pero con las características de la harina cruda.

La harina cruda se deja caer en un plato circular, el cual gira sobre su centro y además lo hace con cierto grado de inclinación, mientras se le rocía agua con una espina, de esta forma, el material forma nódulos, que caen por efecto de la fuerza centrífuga. Posteriormente, el material se introduce en una parrilla Lepol para su secado e introducción al horno.

El plato giratorio presenta también problemas mecánicos frecuentes debido a la presencia de partes en movimiento, las cuales sufren desgaste y pueden generar un paro de operación.

Las características plásticas de la arcilla empleada en la preparación de la harina cruda también tienen gran influencia en la operación de la parrilla Lepol, si la arcilla es arenosa, los nódulos sufren un gran desgaste durante su avance por la parrilla Lepol, generando una gran cantidad de polvo y si la arcilla es muy plástica, los nódulos explotan y se fragmentan por efecto de la presión interna en el nódulo, generada por el vapor de agua.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

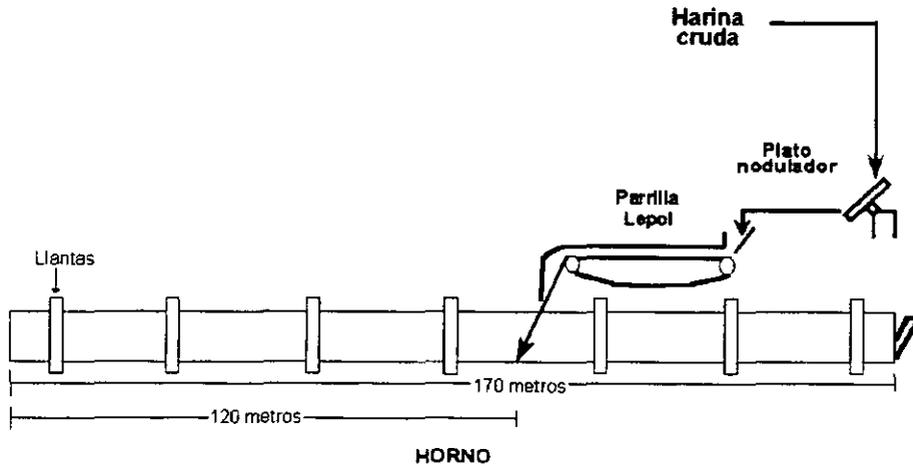


Figura 21: Horno vía semi-seca con alimentación de harina cruda en un plato nodulador y una parrilla Lepol. (Comparativo a horno vía húmeda).

La introducción del sistema de precalentador de ciclones en la operación de calcinación da como resultado un gran avance tecnológico. La harina cruda se introduce primero en un sistema de precalentadores por ciclones, en el cual sufre una descarbonatación parcial y pérdida de humedad, así como un aumento de temperatura. Como resultado, la longitud del horno es menor y el consumo de energéticos disminuye.

En este sistema, aparte del horno y de los ventiladores de tiro inducido, no existen otros equipos mecánicos que deban ser reemplazados cuando su uso rebasa su vida útil o que tengan un constante mantenimiento como resultado de un movimiento mecánico, ya que los ciclones son equipos en los que se introduce una corriente de gases calientes que arrastran la harina cruda.

La tecnología aplicada actualmente a los procesos de homogeneización de la harina cruda permite tener prácticamente la misma homogeneidad que se tiene en las pastas.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

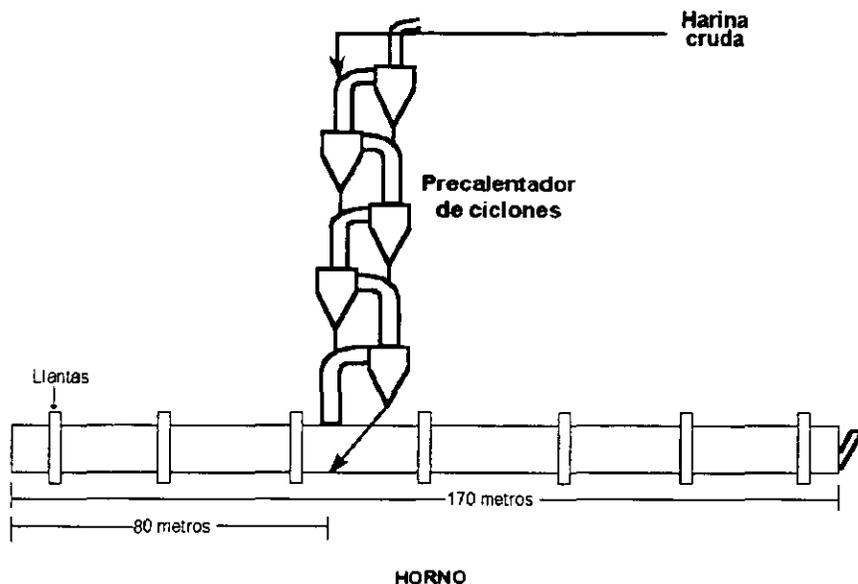


Figura 22: Horno vía seca con precalentador. (Comparativo a horno vía húmeda).

La implementación de los calcinadores en el sistema de calcinación, permitió que la longitud del horno disminuyera, y que se tuviera un aumento en la producción de Clinker.

Como la transferencia de calor en el sistema de precalentamiento es de alta eficiencia, debido a que las partículas de crudo se encuentran suspendidas en los gases calientes, se implementó una cámara de calcinación instantánea, en la que se logra que la diferencia de temperaturas entre los gases y la materia sea mínima. El desarrollo de esta implementación está basado en la idea de que el horno solo sirve como intercambiador de calor económico en la zona de sinterización, lugar en el que la transmisión térmica es principalmente por radiación.

La transmisión térmica empleada en la descarbonatación resulta económica, debido a que para la combustión del combustible que se quema en el calcinador se realiza con aire caliente (alrededor de 200°C) proveniente del enfriamiento del Clinker.

Este sistema, al igual que el de precalentador de ciclones, carece de partes mecánicas en movimiento, por lo que su mantenimiento es económico.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

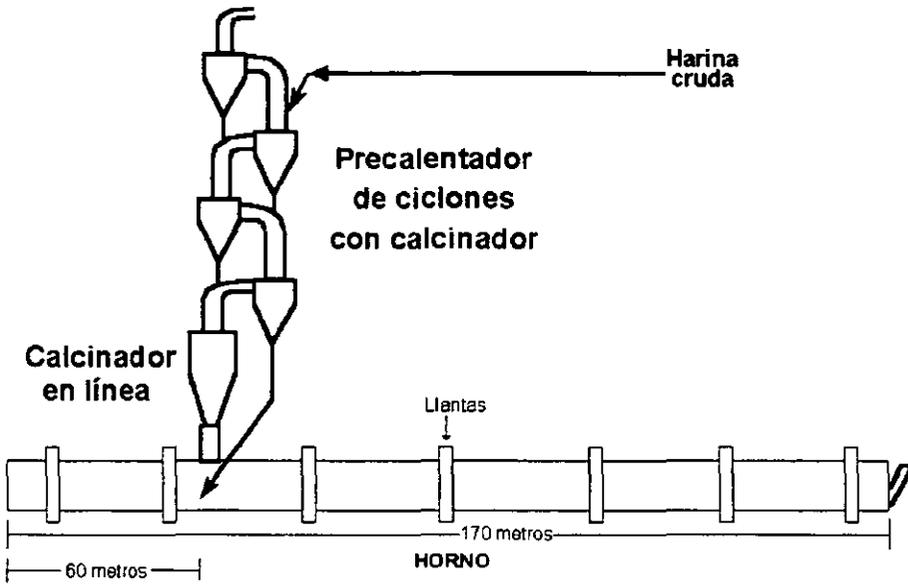


Figura 23: Horno vía seca para harina cruda con precalentador de ciclones con calcinador en línea. (Comparativo a horno vía húmeda).

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

En la operación de calcinación, las reacciones que se efectúan tienen lugar cuando se alcanzan determinadas temperaturas, desde que la harina cruda se dosifica en el precalentador, hasta que el Clinker se enfría a la salida del horno, como se muestra en la figura 24.

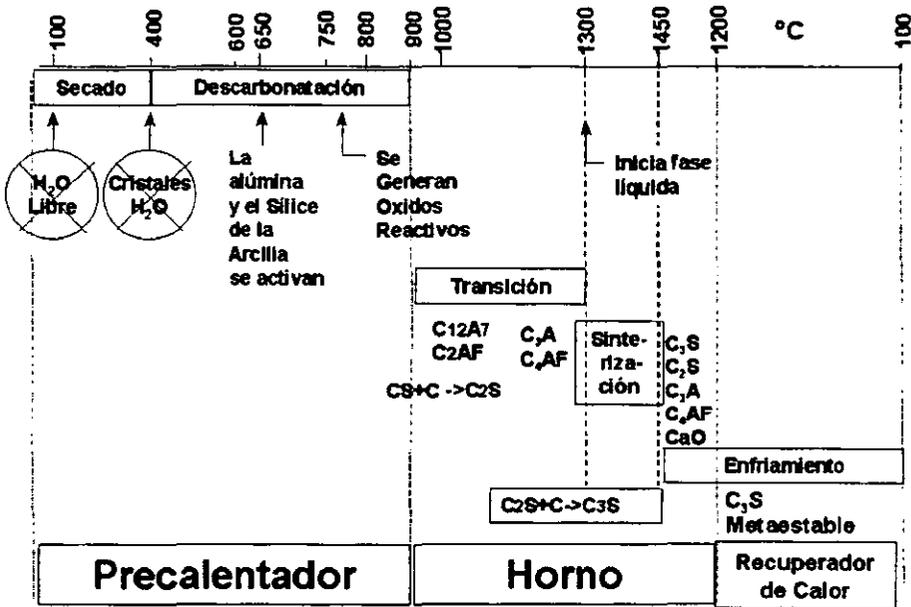


Figura 24: Diagrama esquemático de las reacciones que se efectúan en la operación de calcinación.

El avance tecnológico se ha dado también en los equipos de enfriamiento, permitiendo que estos tengan una mayor recuperación del calor, el cual es utilizado para el quemado del combustible. Estos avances han permitido el desarrollo de hornos rotatorios de menor longitud y con grandes capacidades de producción y bajo consumo de energía, tanto térmica como eléctrica. La disminución en la longitud del horno representa también un ahorro en el gasto del ladrillo refractario utilizado para el recubrimiento interno.

En la operación unitaria de calcinación, se tienen diversas reacciones químicas para obtener las diferentes fases que componen el Clinker. Dichas reacciones químicas se dan por temperatura, y se localizan en el horno por zonas.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Para proteger el cuerpo del horno de la abrasión, de la temperatura y de las reacciones químicas que se generan en el interior, se recubre con ladrillo refractario, de diversas características, espesores y composiciones según su posición en el horno.

Los ladrillos refractarios están fabricados con compuestos minerales no metálicos, resistentes a las altas temperaturas, a condiciones de abrasión, erosión, compresión y ataque químico. Los materiales que se utilizan en la fabricación de los ladrillos refractarios deben cumplir con las siguientes características:

- Resistir la destrucción por abrasión.
- Soportar el ataque de la escoria.
- Resistir el ataque por metales y sales fundidas.
- Ser resistentes al choque térmico.
- Ser resistentes a los esfuerzos mecánicos y estructurales.
- Resistir la temperatura.
- Conservar o guardar el calor.
- Formar una costra protectora con el material fundido.

De acuerdo a la aplicación de que son objeto, los materiales para la elaboración de los ladrillos refractarios se clasifican en grupos o tipos de acuerdo a los materiales usados en su elaboración, y a la composición química de la mezcla.

Desde el punto de vista de los materiales que intervienen en su elaboración, estos se clasifican en dos grupos principales:

- Productos refractarios con forma (como: ladrillos y piezas especiales)
- Productos refractarios sin forma (llamados: mezclas especiales)

Los ladrillos pueden ser de 5 diferentes tipos y seis especialidades, los cuales pueden ser: ácido, básico y neutro:

Ladrillos		Especialidades	
1	Arcilla (silico-aluminosos)	1	Morteros
2	Sílice	2	Plásticos
3	Alta alúmina	3	Apisonables
4	Básicos	4	Concretos densos y aislantes
5	aislantes	5	Proyectables
		6	Inyectables

Todos los materiales refractarios tienen como compuestos principales óxidos de alto punto de fusión, entre los que se encuentran: la alúmina (Al_2O_3), la sílice (SiO_2), el óxido de magnesio (MgO), el óxido de cromo (Cr_2O_3), y su composición puede ser de uno de estos compuestos individualmente o formando mezclas. Esta composición puede utilizarse en ladrillos y en especialidades refractarias.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Entre los óxidos especiales constituyentes de los diversos materiales refractarios se tienen:

silicato de aluminio	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$ (cianita, silimanita, andalucita)
Alúmina	Al_2O_3
Magnesita	$MgCO_3$
Cromita	$FeO \cdot Cr_2O_3$
Olivina	$(FeO \cdot MgO)_2 SiO_2$
Dumortienita	$8 Al_2O_3 \cdot B_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$
Circonia	ZrO_2
Titanio	TiO_2
silicatos de magnesio Hidratos talco	$3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$
Carborundo	SiC
Mulita	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$

En la industria del Cemento, los ladrillos de mayor importancia y aplicación son los de tipo silico-aluminoso, los de alta alúmina y los ladrillos básicos.

Por su composición química, los ladrillos refractarios se clasifican en:

Clase	Nomenclatura	Composición química básica	Tipos	Zonas de utilización, características más importantes
Á C I D O S	Arcillosos		Calidad superior, alta, inferior, baja, semisilica, resistencia ácida	
	Silico aluminoso	$30\% < Al_2O_3 < 45\%$	Calidad superior, regular resistencia al choque térmico	Pre calentadores, zonas de entrada al horno Resistencia a la abrasión
	Aluminosos	$45\% < Al_2O_3 < 56\%$		Zonas de seguridad, precalentamiento Zonas donde se requiere resistencia al ataque de los álcalis
	Alta alúmina	$Al_2O_3 > 56\%$		Zonas de seguridad, zonas de descarga Resistencia a cambios de temperatura

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Clase	Nomenclatura	Composición química básica	Tipos	Zonas de utilización, características más importantes.
B Á S I C O S	Ladrillos de Magnesita (Magnesita)	MgO>80%		Zonas de sinterización
	Ladrillos de Magnesita-cromo	55%<MgO<80%		Resistencia al choque térmico (menor rigidez)
	Ladrillos de cromo Magnesita	25%<MgO<55%		No son tan importantes en la industria del Cemento
	Ladrillos de cromo (cromíticos)	Cr ₂ O ₃ >25%		
	Ladrillos de forsterita			Gran estabilidad de volumen y resistencia a temperaturas elevadas
	Ladrillos dolomíticos	CaO, MgO		Libres de cromo, adecuados para zonas de sinterización con costra estable, buena formación de costra
	Liga espinela	MgO, Al ₂ O ₃		Zonas de sinterización, zonas de costra estable, zonas de transición Alta y Baja. Libres de cromo, resistencia a choques térmicos
Productos Especiales	Carburo de silicio			Labios-zona de descarga de homos Alta resistencia a la abrasión
	Dióxido de zirconio			Util para evitar incrustamientos en precalentadores
	Aislantes			Para evitar pérdidas de calor en ciclones, enfriadores, etc

Los ladrillos refractarios silico aluminosos que contienen más del 45% de alúmina son conocidos como ladrillos refractarios de "alta alúmina". Estos se fabrican con contenidos variables que van desde aproximadamente 50% hasta 90%. Los ladrillos refractarios especiales de alta alúmina, hechos con mulita, tienen una composición intermedia de alúmina que está entre 60 y 71%.

Los ladrillos refractarios de alta alúmina, conforme aumenta su contenido de alúmina, van cubriendo gradualmente refractabilidades superiores, con lo que pueden cubrir un rango de temperaturas de ablandamiento de aproximadamente 200°C. Estos son refractarios de varios usos empleados para una temperatura de servicio de aproximadamente 1892°C.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Estos ladrillos son muy resistentes al ataque químico de varias escorias y gases, y generalmente tienen mayor resistencia al choque térmico.

Para los ladrillos refractarios con contenido de alúmina entre 50 y 90%, se tiene una tolerancia en el porcentaje de alúmina de $\pm 5\%$. El modo de elaboración de los ladrillos de alta alúmina es por prensado en seco.

Los refractarios de mulita, están fabricados con un mineral de forma cristalina llamado mulita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$). Este mineral tiene un contenido de alúmina de aproximadamente 71.8%. Estos ladrillos se hacían de minerales como la silimanita o la cianita, pero en la actualidad se elaboran de mulita sintética.

Los ladrillos básicos incluyen productos manufacturados a partir de Magnesita sometida a fuerte calcinación, cromita, olivina y dolomita.

Para los ladrillos básicos, uno de los principales componentes es la Magnesita fuertemente quemada, la cual es principalmente MgO como Periclasa mineral.

Están clasificados en: Magnesita-Cromo, Cromo-Magnesita, Forsferita, Magnesita ligada con Alquitrán y de Magnesita-Dolomita. En los ladrillos con dos nombres, el primer componente predomina sobre el segundo componente.

Los ladrillos básicos disponibles, se clasifican según su liga, y pueden ser:

- Liga química
- Liga cerámica o silicosa
- Liga directa
- Impregnada
- Liga de alquitrán
- Magnesita carbón

Los ladrillos de Magnesita pueden ser de diferentes tipos:

- Ladrillos fabricados con Magnesita de alta pureza, con más de un 93% de MgO y cuyo componente principal es la periclasa mineral (Magnesita cristalina).
- Los ladrillos convencionales de Magnesita, que son aquellos que contienen entre 83 y 87% de MgO, y en los cuales el principal componente es la periclasa.
- Los ladrillos de espinela y de liga con forsterita-Magnesita. Este tipo de ladrillos contiene aproximadamente 90% de MgO.

Los ladrillos de cromo Magnesita y los de Magnesita cromo se fabrican con varias modificaciones, de acuerdo a usos específicos, como pueden ser: resistencia a altas temperaturas, estabilidad de volumen o resistencia a la disgregación.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Los ladrillos de forsterita son fabricados con olivina y magnesia. Pueden tener diversas modificaciones y sus características principales son: tienen estabilidad de volumen y resistencia a temperaturas elevadas.

Los ladrillos de Magnesita ligados con alquitrán y los ladrillos de Magnesita-dolomita son usados principalmente en los procesos de convertidores de oxígeno para aceración.

En su mayoría, los ladrillos básicos son elaborados por el método de prensado en seco de materias primas previamente molidas y cribadas, y se les adicionan agentes plastificantes o de liga.

Los ladrillos básicos tienen como características generales:

- Una gran resistencia al ataque químico por escorias y óxidos básicos.
- Tienen un punto de fusión alto.
- Tienen una expansión térmica relativamente alta, aunque uniforme (2 a 3 veces más que los ladrillos de arcilla).
- Tienen un peso alto, que varía de acuerdo a la composición, entre 4.5 y 5.5 kg.
- Tienen una conductividad térmica alta.

Existen otros tipos de ladrillos refractarios, tales como los de arcillas-grafito, los de carburo de silicio, los de circón, los de óxido de circonio o los electrofundidos, que son utilizados en menor proporción que los ladrillos antes mencionados. Los ladrillos refractarios de arcilla-grafito, por ejemplo, son usados en hornos expuestos a una abrasión mecánica severa, tales como los hornos de recalentamiento donde son usados rieles de carburo de silicio. Es usado generalmente en lugares donde se requiere que soporte una alta conductividad térmica y tenga una alta resistencia.

Los ladrillos refractarios electrofundidos se hacen con una gran variedad de composiciones, las cuales incluyen: alúmina, mulita, óxido de circonio y cromo-Magnesita. Se utilizan principalmente en la industria del vidrio y, en cantidades mínimas, los de cromo-Magnesita son utilizados en la industria siderúrgica.

Los ladrillos refractarios aislantes son ladrillos de bajo peso, porosos y con una conductividad térmica mucho menor que los refractarios comunes, y una capacidad de retención de calor superior a cualquier refractario de composición similar. Son fabricados en materiales tales como: tierra diatomácea, vermiculita, perlita, arcillas refractarias, burbuja de alúmina calcinada, etc.

Los ladrillos refractarios son utilizados para recubrir las diferentes zonas del horno, de acuerdo a las necesidades de protección que se tengan. Las zonas de un horno son:

- Zona de calcinación.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

- Zona de calentamiento.
- Zona de fase líquida.
- Zona de temperatura más alta (zona de sinterización)
- Zona de enfriamiento (la cual está dividida en 3 regiones: zona de transición baja, zona de enfriamiento y zona de descarga del horno).

La zona de calcinación se encuentra sometida a una abrasión considerable. Normalmente se recubre con concreto refractario con 40 a 60% de Al_2O_3 en la zona de entrada del horno. Generalmente se tiene una temperatura de operación de 1000 a 1100°C cuando se cuenta con un precalentador.

La zona de precalentamiento se recubre con un ladrillo que tenga un contenido de alúmina de 36 a 42%, para prevenir los diferentes tipos de ataques que se tiene en la operación, aunque se pueden emplear ladrillos con un contenido de alúmina de hasta 70%.

La zona de calentamiento comienza a operar cuando se alcanzan temperaturas del orden de 1200°C, y se utilizan ladrillos con un contenido de alúmina de 70%. También puede utilizarse ladrillo de liga especial, que son resistentes a la abrasión y a los cambios de temperatura.

En la zona de fase líquida comienzan a aparecer las fases del Clinker y existe una fuerte abrasión del material. Es en esta zona donde se tienen las condiciones más severas por temperatura (1300-1350°C), fuerte abrasión e impacto. La costra no existe, o es inestable.

Es en esta zona donde se utilizan ladrillos básicos con más de 70% de MgO y ladrillos de periclasa Espinela, los cuales pueden soportar estas condiciones de trabajo.

La zona de temperatura más alta o zona de sinterización es importante tener una formación de costra, y que tenga la mayor estabilidad posible, por lo que el ladrillo debe tener capacidad para mantener la costra y debe tener buena refractabilidad.

En esta zona son utilizados los ladrillos básicos de Magnesita-cromo, dolomíticos o de espinela. La temperatura de operación se encuentra entre 1400 y 1450°C.

En la zona de enfriamiento se presenta una alta abrasión por el Clinker formado, combinado con las altas temperaturas y una costra inestable. En esta zona se utilizan ladrillos de alta alúmina (70-85%). En la zona de descarga se pueden utilizar concreto con un 90% de alúmina o concreto con bajo contenido de Cemento.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Las diferentes zonas dentro del horno están delimitadas por los cambios físicos y químicos del material en estas. Las principales reacciones que ocurren en estas zonas son:

Temperatura °C	Proceso	Transformación química
De la temperatura ambiente hasta los 400°C	Secado. Eliminación del agua libre. Eliminación del agua absorbida. Eliminación del agua de cristalización.	$H_2O(l) \rightarrow H_2O(g)$
Entre 400 y 700°C	Descomposición de la arcilla con formación de metacaolinita.	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10} \rightarrow 2(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + 4H_2O$
Entre 600 y 900°C	Descomposición de la metacaolinita y otros compuestos con formación de una mezcla de óxidos reactivos.	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$
Entre 600 y 1000°C	Descomposición de la caliza con formación de CS y CA.	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ $3CaO + 2SiO_2 + Al_2O_3 \rightarrow 2(CaO \cdot SiO_2) + CaO \cdot Al_2O_3$
Entre 800 y 1300°C	Fijación de cal por CS y CA, con formación de C ₂ S, C ₃ A y C ₄ AF.	$CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 2CaO \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 3CaO + Fe_2O_3 \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3Fe_2O_3$
Entre 1200 y 1450°C	Nueva fijación de cal por C ₂ S con formación de C ₃ S.	$2CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2$

Para seleccionar el ladrillo refractario con el que se recubrirá el horno, se debe buscar aquel que ofrezca las propiedades que se requieren según el sistema que se trabaje. Se debe contar con el historial de operación del horno para hacer la selección. Se debe tomar en cuenta la disponibilidad de materiales, el costo, el servicio técnico ofrecido por el proveedor y que los ladrillos tengan uniformidad y calidad en sus dimensiones.

Para seleccionar el ladrillo refractario para las zonas de calentamiento, de fase líquida y de sinterización, deben tomarse en cuenta las variables: Química del producto, el tipo de flama, el régimen de producción, la formación de costra (longitud, espesor, estabilidad) y el tipo de proceso.

El ladrillo refractario debe tener una buena resistencia a la fractura, a la desintegración, a la abrasión y debe tener cierta plasticidad a los esfuerzos

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

mecánicos. Además debe tener la capacidad para formar y sostener una costra estable de material, debido a que esto disminuye el desgaste del ladrillo. El ladrillo debe también trabajar bajo condiciones severas de costra inestable y debe tenerse en cuenta la conductividad térmica, especialmente en las zonas donde se colocan los rodamientos. También se debe tener muy en cuenta el ladrillo que se instalará en las zonas de transición.

Entre los esfuerzos mecánicos que debe resistir el ladrillo se tiene: el rápido calentamiento o enfriamiento, las flexiones de la coraza, el impacto del Clinker o de la costra cayendo y las inadecuadas juntas de expansión en el tabique.

Para un horno en condiciones de operación Normales, se pueden utilizar ladrillos de las siguientes características:

- Para la zona de calcinación se puede utilizar un ladrillo de alta alúmina.
- Para la zona de calentamiento un ladrillo con un 48 a 52% de alúmina y un 40 a 44% de sílica.
- Para la zona de fase líquida un ladrillo con 80 a 85% de MgO.
- Para la zona de alta temperatura un ladrillo con 80 a 85% de MgO, o uno que contenga de 35 a 40% de MgO y 54 a 59% de CaO.
- Para la zona de transición baja se puede emplear uno que tenga entre 65 y 80% de MgO y entre 5 y 15% de Al_2O_3 , con presencia de CaO, SiO_2 y Fe_2O_3 .
- Para la zona de enfriamiento es recomendable un ladrillo que contenga entre 80 y 85% de Alúmina y del 10 al 12% de sílica.
- En la descarga del horno se puede utilizar concreto bajo en Cemento o concreto con un contenido del 70 al 90% de alúmina.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

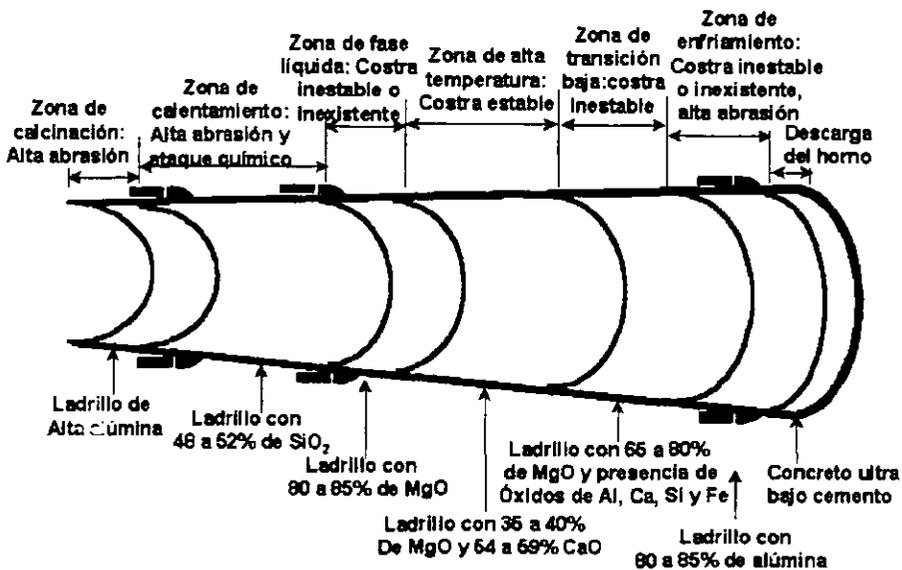


Figura 25: Zonas del horno y refractario recomendado.

La selección del material refractario cambia de acuerdo al historial de cada horno, y debe tomarse en cuenta que si las condiciones de operación del horno varían, se deben compensar en la selección del refractario para evitar los paros de operación y el daño tanto al material como a la pared del horno.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

METROLOGÍA.

La metrología aplicada al proceso de elaboración de Cemento Portland consiste en la obtención completa de los datos de operación que se encuentran involucrados en el horno.

Para poder obtener la lectura de los datos de operación del horno rotatorio, se debe mantener una operación continua con la estabilidad mínima requerida, de acuerdo con la experiencia de la Planta.

La metrología para la operación de calcinación del Cemento utiliza equipo portátil, de diseño especial para cada variable. Para efectuar la selección del equipo adecuado se debe considerar el rango de operación de cada variable, así como del sistema específico (geometría, tipo de equipo, etc.), de las condiciones de operación (presión, temperatura, contenido de polvo, composición química, humedad, etc.) y de la precisión requerida en la toma de lectura.

El equipo utilizado debe ser adecuado e independiente del fabricante para la aplicación dada.

El procedimiento utilizado para la obtención de los datos utilizando la metrología depende del equipo usado y de las condiciones de operación, siendo generalmente utilizado de acuerdo a la experiencia.

El principal punto de medición de la metrología en el horno es la determinación de todas las corrientes involucradas en el proceso de calcinación y sus propiedades. Básicamente, es la medición directa de perfiles de temperatura, presión, flujo de gases, muestreo de materiales y análisis de gases en el sistema.

Como información adicional se requiere también obtener pesajes directos de la producción del horno y polvos de salida del precalentador, flujo de combustibles, análisis químicos de la alimentación al horno y del Clinker. Después toda la información que se reporta en el cuarto de control y la obtenida en el campo se calculan los balances de materia y energía del proceso para poder determinar la operación de todo el sistema.

El objetivo de la metrología o medición directa de las variables de operación tiene como finalidad obtener una condición instantánea o fotografía de la operación del sistema del horno.

El uso de la metrología en la operación del horno sirve para diagnosticar problemas operativos y para identificar condiciones de operación anormales; también es útil para determinar las áreas potenciales que pueden ser mejoradas. Por esto se requiere que todas las mediciones (flujo, temperatura, presión, análisis de gases, etc.) se efectúen en forma directa, haciendo uso de equipo portátil especial para cada variable.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Las mediciones de las condiciones de operación del proceso deben efectuarse en un sistema estable y constante. Las variables de proceso más importantes (que son: alimentación al horno, flujos de combustible, flujos de aire, temperaturas, velocidades de ventiladores, % de apertura de compuertas de ventiladores, etc.) deben permanecer con la mínima variación, hasta donde el sistema lo permita utilizando sus propios sistemas de control. Todo esto se efectúa con el fin de obtener resultados y evaluaciones satisfactorios.

La metodología para realizar la metrología en la industria del Cemento se realiza de la siguiente manera:

PREPARACIÓN.

La magnitud de las mediciones, así como su duración y precisión, son determinadas basándose en el alcance del estudio realizado, de acuerdo a los requerimientos de cada Planta. Para conseguir esto, se requiere tomar en cuenta el desarrollo de un plan para la preparación y la ejecución de las actividades involucradas. Debe tomarse en consideración los siguientes pasos:

- Identificación del sistema (involucra la localización de los puntos de medición y/o muestreo).

Como ejemplo, para asegurar que se logrará una corriente uniforme de gas, debe tomarse el punto de prueba en una sección recta del ducto o chimenea, lejos de curvas, quiebres y demás puntos en los que se perturben las corrientes de gas.

En estos casos, se considera que una distancia de 8 veces el diámetro interno del ducto es suficiente para vencer los efectos de las perturbaciones formadas en la corriente de gas, pero debe tenerse un sondeo preliminar mediante el uso de un tubo Pitot (una medición de la presión dinámica), para poder determinar las fluctuaciones que se puedan presentar por velocidad.

- Tipo de mediciones requeridas de acuerdo a su duración (puede ser instantánea, en intervalos de tiempo o continua).

Una vez que se tienen identificados y definidos los puntos anteriores, es recomendable definir el esquema de trabajo y el apoyo requerido (esto es, organizar al personal y el equipo de mediciones necesario).

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Como una guía para la preparación, se deben considerar los siguientes requerimientos:

- Hojas de formato para la captura de datos.
- Información requerida del cuarto de control (hoja de operación del horno).
- Coordinación con el cuarto de control (operador del horno), para mantener las condiciones de estabilidad y operación requeridas.
- Organización del equipo de trabajo (distribución en los diferentes sistemas, distribución del tiempo para efectuar las mediciones, muestreo, preparación de equipo, etc.).
- Programación de muestreo de materiales y análisis requeridos (materia prima, combustibles sólidos, Clinker, polvo de colectores, etc.).
- Preparación del equipo portátil para mediciones (calibración, revisión de estado operativo, reposición de líquidos y/o soluciones para análisis, etc.).
 - Termopares.
 - Indicadores digitales de temperatura.
 - Tubos de Pitot.
 - Anemómetro.
 - Pirómetro de infrarrojo.
 - Orsat/Analizador de gases.
 - Manómetros de columna de agua (tipo "U" y de columna inclinada).
 - Equipos de muestreo de gases y sólidos.
 - Tacómetro.
 - Multímetro.

EJECUCIÓN.

Al efectuar toda medición en el proceso, el sistema debe estar trabajando en forma estable. La metrología dará inicio solo si se cumple con esta condición y se mantenga dentro de un nivel estable, con el mínimo de perturbación, durante todo el tiempo en que se efectúen las mediciones.

Las variables de operación (que son particulares para cada sistema, y que deben tomarse basándose en un sistema completo, que cuente con un enfriador de parrillas, un precalentador con precalcinador y un ducto de aire terciario) obtenidas de las mediciones, se clasifican de la siguiente forma:

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Perfil de temperaturas:

Registro de temperaturas en los siguientes puntos del proceso:

- Precalentador.
 - Salida de gases en cada etapa del precalentador.
 - Cámara de humos y ducto ascendente.
 - Salida del calcinador.
 - Alimentación de materia prima.
 - Pared de ciclones en el precalentador (un promedio por etapa).
 - Entrada de aire terciario al calcinador.

- Horno.
 - Alimentación de combustibles.
 - Aire primario.
 - Coraza del horno.
 - Aire ambiental.

- Enfriador de Clinker.
 - Aire secundario.
 - Aire terciario.
 - Aire residual del enfriador.
 - Ventiladores del aire de enfriamiento.
 - Clinker en la salida del enfriador.

- Ventiladores de tiro (principal y aire en exceso del enfriador).
 - Succión del ventilador.
 - Descarga del ventilador.

- Colectores de polvo.
 - Entrada de gases.
 - Salida de gases.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Perfil de presiones estáticas.

Registro de las presiones estáticas en los siguientes puntos del proceso:

- Precalentador.
 - Gases de salida en cada etapa del precalentador.
 - Gases en la cámara de humos y ducto ascendente.
 - Salida del calcinador.
 - Entrada de aire terciario al calcinador.

- Horno.
 - Alimentación de combustibles.
 - Aire primario.
 - Caperuza del horno.

- Enfriador de Clinker.
 - Aire terciario.
 - Aire de exceso.
 - Succión de ventiladores de aire de enfriamiento.
 - Descarga de ventiladores de aire de enfriamiento (antes y después de las compuertas para control de flujo).
 - Compartimientos.

- Ventiladores de tiro (principal y aire en exceso del enfriador).
 - Succión del ventilador antes de compuerta.
 - Succión del ventilador después de compuerta.
 - Descarga de ventilador.

- Colector de polvo.
 - Entrada de gases.
 - Salida de gases.

Flujo de gases.

Se debe tener una medición directa del flujo de gases en los siguientes puntos:

- Ducto de salida de precalentador.
- Chimenea de aire en exceso del enfriador de Clinker.
- Ducto de salida de aire en exceso del enfriador.
- Aire de enfriamiento en cada uno de los ventiladores del enfriador de Clinker.
- Aire primario.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Análisis de gases.

Se debe efectuar un análisis de gases (determinar los componentes: CO₂, O₂, N₂) en los siguientes puntos:

- Salida de gases de precalentador.
- Salida de gases de cada etapa del precalentador.
- Gases en cámara de humos.
- Gases en la salida del calcinador.
- Succión y descarga del ventilador de tiro principal.

Junto con el análisis de los componentes principales, se requiere también el análisis de los componentes menores (CO, SO₂, NO_x), para las muestras de gases en los siguientes puntos:

- Entrada del horno.
- Salida de precalentador.
- Gases de entrada a colector principal.

Potencia de motores.

Consumo de potencia de los motores eléctricos del sistema:

- Impulso del horno / rpm.
- Impulso del enfriador de Clinker.
- Ventilador de tiro principal / rpm.
- Ventilador de tiro del enfriador / rpm.
- Ventiladores del aire de enfriamiento de Clinker / rpm.
- Sistema de alimentación de materia prima.
- Total del horno y de la línea.

Análisis químicos.

- Materia prima (composición química, % pérdidas por ignición, %humedad).
- Material de salida de cada etapa (% pérdidas por ignición).
- Clinker (composición química).
- Polvos de retorno al sistema (composición química, % pérdidas por ignición).
- Combustibles (humedad, análisis próximo y análisis último).

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Pesadas físicas.

De forma adicional a la indicación de flujo de los materiales sólidos en el cuarto de control, se recomienda efectuar los pesajes directos (pesada física) de las corrientes de sólidos alimentados al sistema. Estas mediciones se efectúan para poder verificar el dato de la indicación de flujo del cuarto de control contra el valor encontrado por pesaje directo. Generalmente se realiza en las siguientes corrientes:

- Producción del horno (Clinker).
- Polvos de retorno al silo o colector principal, provenientes del precalentador.
- Combustibles sólidos.

Condiciones ambientales.

Deben tomarse en consideración las condiciones ambientales en las que se encuentre trabajando el horno, ya que estas pueden afectar las variables de operación.

- Altitud.
- Temperatura de bulbo seco.
- Temperatura de bulbo húmedo.
- Velocidad del viento.

Información del sistema.

Se han enumerado las variables de operación del sistema, en función de la operación, pero existen otras variables que se deben tomar en cuenta, para la identificación del sistema, tales como:

- Tipo de horno / fabricante.
- Producción nominal / potencial.
- Tipo de precalentador / enfriador / sistema de combustión.
- Dimensiones de equipos principales.
- Año de fabricación / operación.
- Sistema de retorno de polvos.
- Capacidades de motores y datos de "drives" / rpm.
- Datos de ventiladores (curvas de operación, condiciones de diseño).

Es recomendable obtener información complementaria, en forma de un registro de variables de operación del cuarto de control para todo el sistema (hoja de control del operador del horno), con el fin de utilizarlo en el procedimiento de metrología de variables de forma estadística, durante el tiempo de duración de las pruebas de metrología.

Capítulo V: Sistemas de calcinación.

Esto sirve como una herramienta adicional para detectar problemas de calibración de los instrumentos.

Para un sistema de enfriador de parrillas se tienen los siguientes puntos de medición y de muestreo:

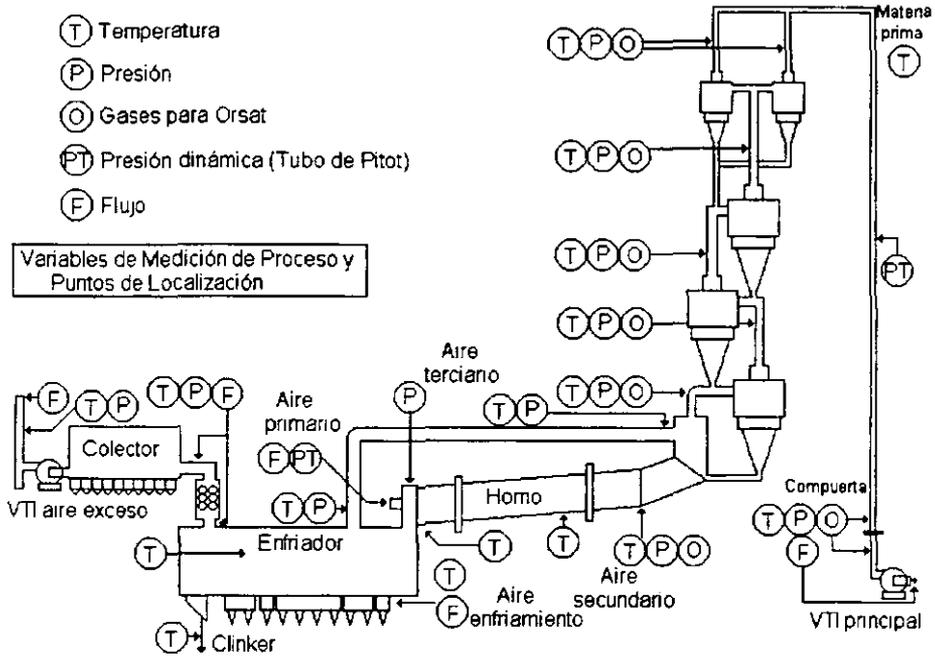


Figura 26: Puntos de medición y variables en el proceso de calcinación con enfriador de parrillas.

INFLUENCIA DE LA HETEROGENEIDAD DE LA HARINA CRUDA EN LA COMBINABILIDAD Y LA RESISTENCIA POTENCIAL DEL CLINKER.

En el análisis de la harina cruda alimentada a los hornos de 15 Plantas diferentes, con muestras promedio con fracciones menores de 90 micras, mayores de 90 micras y mayores de 150 micras, las cuales fueron analizadas químicamente. Los residuos de las muestras mayores 90 micras y mayores de 150 micras fueron también tratados con HCl caliente de concentración 1.0 N para determinar la proporción de material rico en sílica presente en las fracciones ordinarias.

Las mezclas usadas para la alimentación fueron complementadas con cenizas finas de carbón para ajustar el valor normal de la Planta de "Factor de Cal de Saturación", (FCS), y una submuestra de las mezclas homogeneizadas fue hecha en nódulos de aproximadamente 12 mm de diámetro, a mano. Los nódulos fueron quemados en un horno de laboratorio, de tubo horizontal programable, siguiendo los regímenes de calor mostrados en la figura 27, y la temperatura requerida para alcanzar un nivel de cal libre de 1% estimado, se logra siguiendo las curvas del tipo mostradas en la figura 28.

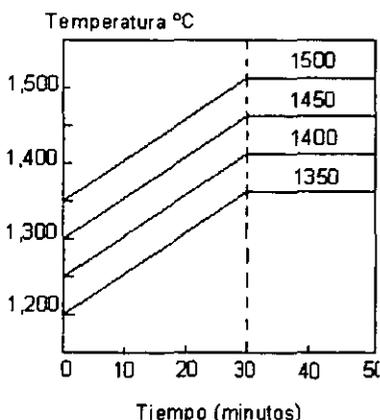


Figura 27: Prueba de combinabilidad en régimen de calentamiento.

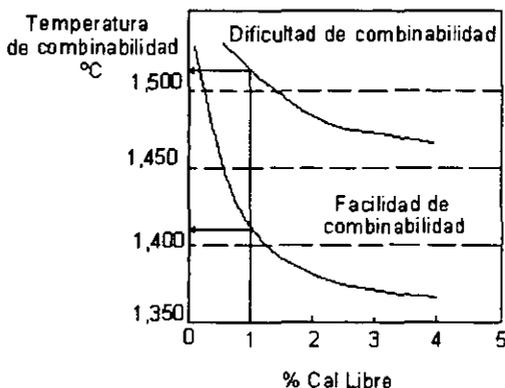


Figura 28: Curvas típicas de combinabilidad.

El Clinker obtenido de cada una de las submuestras fue analizado químicamente para confirmar que los parámetros químicos similares a los del Clinker real de cada Planta, fueran alcanzados.

Los resultados obtenidos de los análisis químicos y de combinabilidad se muestran en la siguiente tabla:

Planta Tipo de proceso	A PS	B PC	C SS	D PC	E PS	F H	G SH	H PS	I SS	J H	K HLS	L PS	M H	N HLS	O LP
Alimentación al horno															
FCS	97.3	97.1	96.1	98.9	98.7	99.1	99.6	98.1	98.9	103.1	105.2	105.7	92.4	98.8	97.2
MS	3.20	2.46	2.59	2.49	2.65	2.49	2.71	2.92	2.83	2.32	2.71	2.43	2.61	2.62	2.98
MA	1.71	2.11	2.18	1.52	2.47	1.39	1.83	2.69	1.67	1.95	1.43	1.06	1.57	1.36	1.94
+ 150 micras															
%	0.7	3.7	1.9	4.4	6.3	0.8	2.4	2.1	1.7	4.0	9.4	9.8	26.4	7.3	5.4
FCS	90.2	83.6	99.6	49.2	72.1	8.9	60.0	46.1	98.6	169.5	90.2	82.6	122.7	90.0	1.37.0
MS	3.40	6.03	3.34	6.97	3.52	12.27	6.39	5.31	3.67	2.13	6.60	6.36	3.81	31.13	2.97
MA	1.94	1.42	2.14	1.00	2.71	0.53	0.24	3.08	1.60	1.22	2.13	1.00	1.07	1.40	1.77
% insoluble en ácido	0.19	0.59	0.19	0.95	1.45	0.62	0.69	0.51	0.21	0.21	1.56	1.37	2.61	1.03	0.17
FCS	-7.1	-13.5	3.5	-49.7	-26.6	-90.2	-39.6	-52.0	0.3	66.4	-10.0	-23.1	30.3	-8.8	39.9
+ 90 micras															
%	4.9	12.6	8.1	13.4	16.3	4.2	5.5	11.6	8.8	13.1	23.5	29.8	39.3	16.7	15.3
FCS	79.9	102.5	83.8	53.8	72.8	24.8	54.0	47.3	81.5	149.1	93.2	83.2	119.2	80.2	127.8
MS	3.25	4.22	3.96	61.4	3.50	7.89	8.98	5.52	4.06	2.38	4.61	4.92	3.46	3.06	7.85
MA	2.09	1.67	2.03	0.97	2.71	0.41	0.41	2.63	1.52	1.22	1.33	0.65	1.00	1.22	1.56
% Insoluble en ácido	0.78	0.95	1.01	2.68	2.82	1.84	1.51	2.86	0.86	0.35	3.81	4.44	3.95	2.66	1.12
FCS	-17.3	5.4	-12.3	-45.1	-26.0	-74.3	-45.6	-50.8	-17.4	145.9	-7.0	-22.4	26.8	-18.6	30.6
- 90 micras															
FCS	96.4	96.4	97.4	111.5	105.6	108.6	104.2	110.9	101.1	93.5	102.6	118.9	79.7	103.3	92.8
MS	3.19	2.32	2.50	2.10	2.49	2.27	2.51	2.59	2.73	2.32	2.35	1.82	2.33	2.52	3.00
MA	1.69	2.15	2.19	1.60	2.42	1.46	1.93	2.70	1.67	2.01	1.45	1.21	1.84	1.40	2.00
FCS	1.1	-0.8	1.3	12.6	6.8	9.5	4.6	12.8	2.0	-9.6	2.4	13.2	-12.7	4.5	-4.1
Combinabilidad del Clinker															
FCS	95.8	95.3	93.9	95.7	95.9	92.0	95.7	97.6	99.2	95.6	93.6	94.9	94.2	92.7	92.4
MS	3.07	2.51	2.50	2.49	2.64	2.5	2.59	3.0	2.78	2.20	2.58	2.28	2.69	2.48	2.54
MA	1.81	2.22	2.14	1.53	2.77	1.43	1.93	2.52	1.69	2.03	1.49	1.23	1.53	1.47	2.04
Temperatura de combinabilidad para cal libre 1%	1420	1480	1460	1470	1520	1430	1470	1560	1510	1440	1530	1510	1570	1470	1460
Promedio anual cal libre 1%	1.4	1.5	1.7	1.5	1.4	0.43	0.8	1.4	2.0	0.45	0.69	1.0	0.25	0.23	0.17
Temperatura del horno para cal libre 1%	1400	1460	1420	1440	1480	1530	1480	1550	1460	1520	1560	1510	1600	1540	1510

PS = precalentador de suspensión
PC = precalentador

SS = semi-seco HLS = horno largo seco LP = Lepol
SH = Semi-húmedo FCS = FCS_{factor} - FCS_{alimentación al horno}

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

La Figura 29 muestra que, como era de esperar debido al análisis de la dureza relativa de los minerales ricos en cuarzo y sílica, la mayoría de las Plantas tiene residuos silíceos (un bajo FCS). Solo 3 de las plantas tienen residuos calcáreos. En el caso de la Planta identificada con la letra J, esto es atribuible al método de preparación de la alimentación al horno, en el que la arena y el óxido de fierro son molidos por separado de los constituyentes de la materia prima de caliza y arcilla.

La Figura 30 muestra que la relación entre la temperatura de combinabilidad y los parámetros químicos del Clinker, tales como el FCS y el MS, no tienen una relación clara.

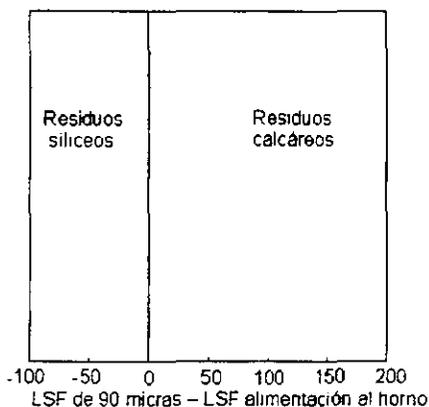


Figura 29: Diferencias de FCS entre los residuos de 90 micras y la alimentación al horno.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

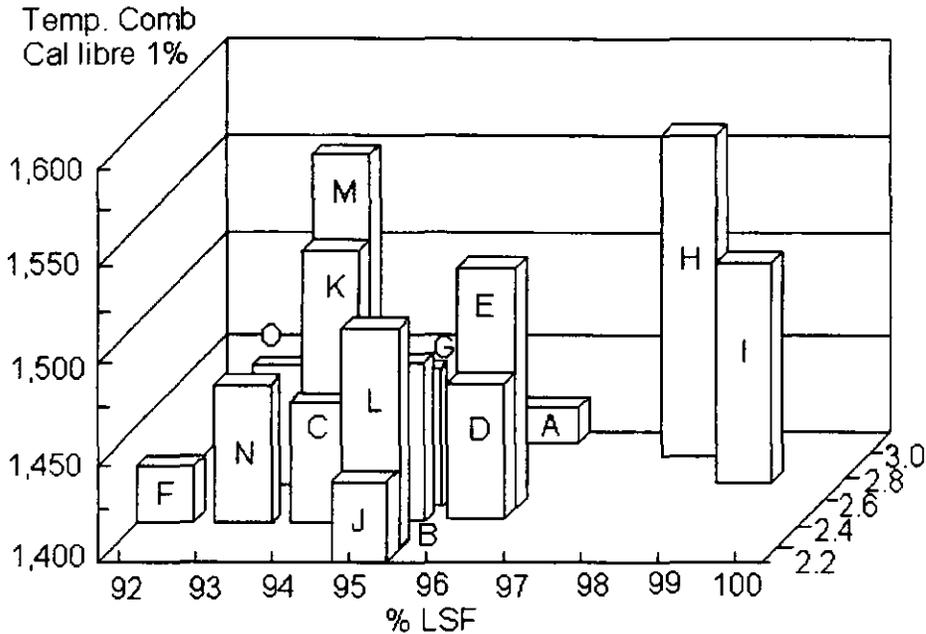


Figura 30: Relación entre la temperatura de combinabilidad y el FCS y MS del Clinker.

Los datos fueron analizados utilizando el Análisis de Regresión Lineal Múltiple (ARLM) para relacionar la finura de la materia prima y la heterogeneidad con la temperatura de combinabilidad. La figura 31 muestra que el rango de las temperaturas de combinabilidad puede explicarse satisfactoriamente con la siguiente relación:

$$\begin{aligned}
 \text{Temperatura de combinabilidad para cal libre 1\%} &= 414 \\
 &+ 21 \text{ (residuo de 90 micras insoluble en ácido)} \\
 &+ 10 \text{ (FCS del Clinker)} \\
 &+ 3 \text{ (residuo de } 150 \mu \text{)} \\
 &+ 32 \text{ (MA en el Clinker)}
 \end{aligned}$$

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

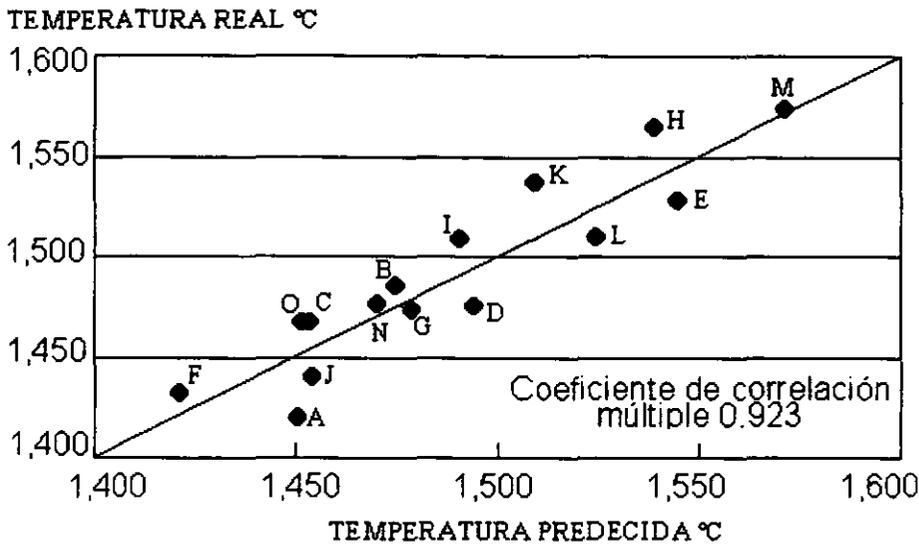


Figura 31: Temperatura de combinabilidad real vs. calculada para cal libre 1%.

El parámetro más simple y significativo fue el nivel del residuo de 90 micras insoluble en el ácido. Si este parámetro fuera excluido del análisis de datos, entonces se obtendría la siguiente relación derivada:

$$\begin{aligned}
 \text{Temperatura de combinabilidad para cal libre 1\%} &= 535 \\
 &+ 4.4 (\text{alimentación del residuo de 90 micras}) \\
 &+ 9.0 (\text{FCS del Clinker}) \\
 &- 0.33 (\text{FCS del residuo de } 90 \mu) \\
 &+ 34 (\text{MA del Clinker})
 \end{aligned}$$

El coeficiente de correlación múltiple permaneció sin cambio en 0.920.

Ambas relaciones derivadas son "sensibles". Solo pueden ser aplicadas entre el rango de componentes del Clinker manejado, FCS 92 a 99, MS 2.2 a 3.1 y MA 1.2 a 2.5. Resulta sorprendente que con esta tabla de datos, el aumento en el MA tuviera una influencia negativa mayor en la temperatura de combinabilidad que con un aumento en el MS. El MA tiene influencia en la naturaleza del Clinker líquido, viscosidad, etc. Mientras que el MS determina la cantidad de líquido formado.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

El coeficiente de correlación similar obtenido cuando los términos "residuos de 90 micras insolubles en ácido" y "residuo de 150 micras" son remplazados por "residuo de 90 micras" y "FCS del residuo de 90 micras" confirmando la importancia de la heterogeneidad de la mezcla cruda en la combinabilidad, y en particular la influencia negativa de la concentración de sílica en las fracciones ordinarias.

INFLUENCIA DE LA HETEROGENEIDAD DE LA MEZCLA ALIMENTADA EN EL POTENCIAL DE RESISTENCIA DEL CLINKER.

Análisis de los datos.

La tabla muestra las características físicas y químicas de Cemento tipo I (Pórtland puro) producido por Plantas de Cemento de A a O.

Planta	Parámetros Químicos									Finuras		Fuerza de compresión EN 196 -1	
	FCS	MS	MA	Cal Libre	SO ₃ %	Na eq	PPI %	C ₃ S %	C ₃ A %	SE M ² /kg	45 micras	2d	28d
												N/mm ²	
A	95.0	3.20	2.02	1.2	2.8	0.55	3.0	52.9	7.7	342	7.7	29.1	57.7
B	95.7	2.45	1.92	1.6	3.2	0.63	0.8	52.1	9.5	358	10.7	29.3	57.6
C	92.9	2.38	2.15	2.0	3.1	0.66	1.5	42.0	10.8	349	8.6	26.3	57.6
D	94.7	2.46	1.50	1.5	3.1	0.41	0.8	51.8	7.6	391	13.8	24.9	58.7
E	96.3	2.63	2.49	1.8	3.2	0.59	1.0	52.3	10.9	345	17.0	28.0	57.1
F	93.0	2.62	1.54	0.6	3.0	0.59	2.8	48.0	7.2	352	10.5	24.8	56.3
G	96.3	2.68	1.83	0.9	2.9	0.56	1.4	58.9	8.5	380	12.6	28.3	57.8
H	96.4	2.82	2.40	1.3	2.9	0.75	1.0	56.2	10.0	374	8.0	31.2	57.0
I	97.1	2.71	1.68	2.4	2.9	0.57	0.9	53.7	7.4	390	10.6	27.4	56.2
J	92.5	2.40	1.89	0.5	3.2	0.59	2.5	47.0	9.4	361	17.6	25.3	58.5
K	94.4	2.69	1.44	0.9	3.2	0.45	0.7	56.4	6.8	355	7.7	31.1	61.1
L	97.4	2.47	1.13	1.1	2.5	0.24	1.4	63.2	5.1	375	3.0	29.1	66.3
M	91.3	2.70	1.70	0.7	3.1	0.64	1.1	47.5	7.8	382	6.8	25.4	64.9
N	92.8	2.56	1.36	0.5	2.5	0.48	0.5	54.1	6.7	322	4.8	25.3	63.4
O	94.0	2.90	1.98	0.8	3.2	0.85	1.4	53.5	8.5	313	8.5	31.9	59.6

Los datos para las Plantas A a J son los resultados de 9 muestras al azar.

Los datos para las Plantas K a O fueron obtenidos con una muestra promedio simple acumulada.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

Los datos de control de calidad de las Plantas de Cemento han sido analizados satisfactoriamente usando ARLM (Análisis por Regresión Lineal Múltiple) desde mediados de los 80's. En general, es posible predecir día a día las variaciones en Plantas individuales con referencia a 5 importantes parámetros físicos y químicos:

- Residuos de 45 micras.
- C_3S .
- eq Na_2O .
- Superficie Específica (SE).
- Pérdidas Por Ignición (PPI).

Cuando se predice de forma temprana la resistencia con el nivel de álcalis solubles, presentes como sulfatos de álcalis, los que son más importantes que el total de álcalis. Las resistencias tempranas son fuertemente influenciadas por el área superficial, pero, al final, en las pruebas de mortero EN 196 – 1 donde se utiliza compactación por vibración, la influencia de este parámetro en la resistencia a 28 días es relativamente pequeña, en comparación con la influencia de la proporción de las partículas de Clinker ordinarias, como se indica en los residuos de 45 micras.

Mientras que las Plantas individuales deben desarrollar sus propias relaciones para alcanzar las mejores predicciones de resistencia, una llamada "Ecuación Global", de la forma:

$$28d = 64 - 0.4(\text{residuos mayores de 45 micras}) + 0.2(C_3S) - 13(\text{eq } Na_2O) - 2.0(PPI)$$

Con esta ecuación se pueden predecir fluctuaciones en la resistencia potencial del Clinker en la mayoría de las Plantas de Cemento.

Los coeficientes utilizados de acuerdo con aquellos determinados en experimentos cuando, tan lejos como es practicable, solo un parámetro fue cambiado en cada tiempo. Note que el coeficiente para PPI es influenciado por la fuente de la pérdida y debería ser mayor si la contribución es predominantemente del Clinker prehidratado en lugar de ser de $CaCO_3$ introducido como un constituyente menor adicional.

La figura 32 ilustra que mucho de la variación en la resistencia para la Planta F durante un período de 12 meses puede ser explicado satisfactoriamente utilizando la Ecuación Global. De forma parecida, la misma ecuación indica la tendencia en la resistencia para la Planta G (figura 33) pero significativamente sobreestima el significado del nivel de resistencia. La tabla siguiente indica las diferencias entre la resistencia predicha y actual para Cementos producidos por las 15 Plantas de Cemento.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

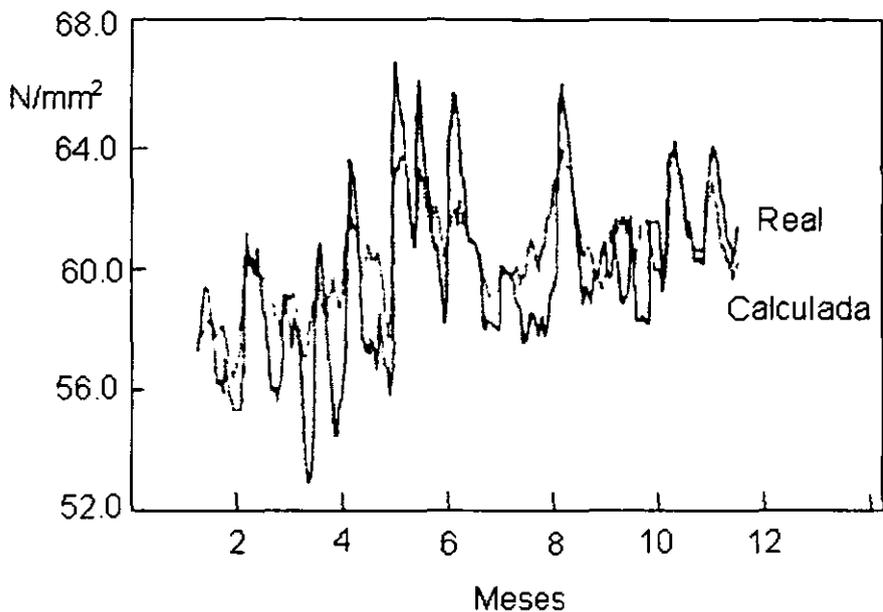


Figura 32: Resistencia calculada y real a 28 días – Planta F.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

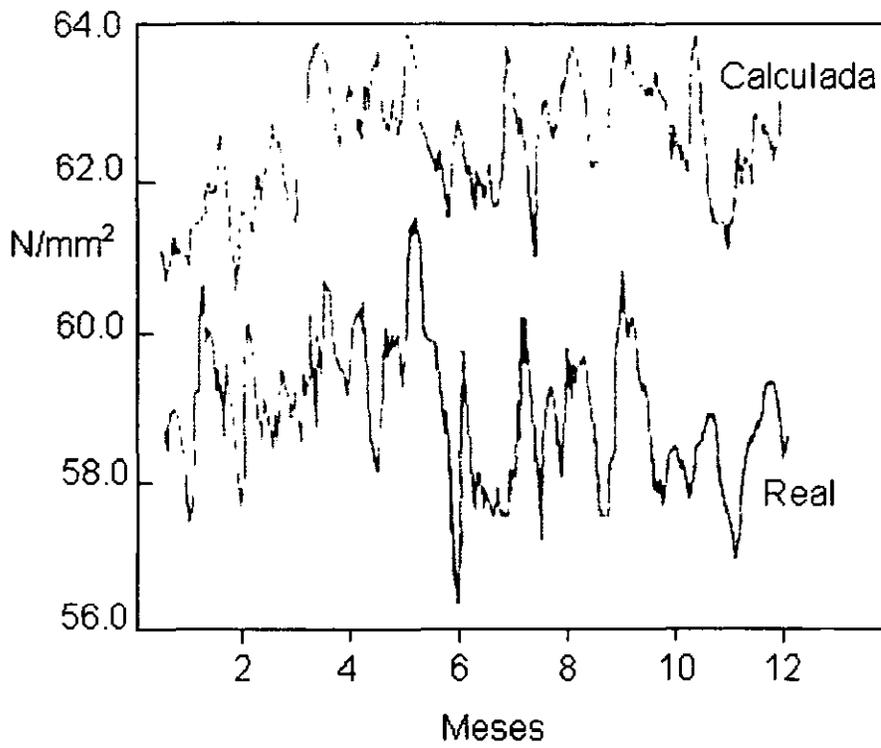


Figura 33: Resistencia calculada y real a 28 días – Planta G.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

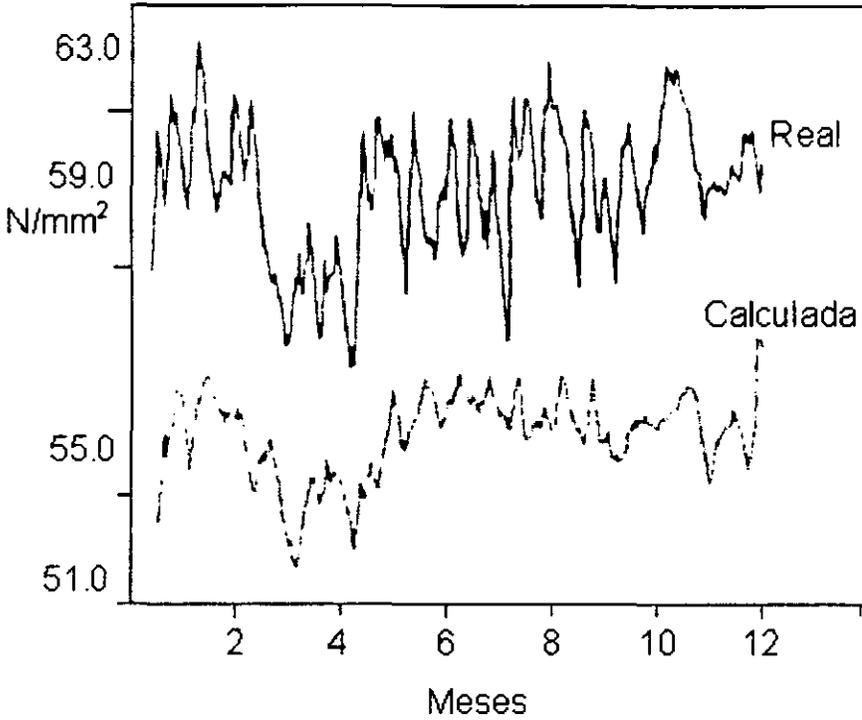


Figura 34: Resistencia calculada y real a 28 días – Planta J.

Planta	Actual	Calculado	Diferencia
A	57.7	58.3	-0.6
B	57.6	60.3	-2.7
C	57.4	57.3	0.1
D	58.7	61.9	-3.2
E	57.1	57.9	-0.8
F	58.3	56.1	0.2
G	57.6	60.6	-2.8
H	57.0	60.2	-3.2
I	58.2	51.2	-5.0
J	58.4	53.6	4.8
K	61.1	64.9	-3.8
L	66.3	69.5	-3.2
M	64.9	60.2	4.7
N	63.4	66.6	-2.2
O	59.6	57.4	2.2

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

Se sospecha que el potencial de resistencia más bajo del Clinker hecho con materias primas con residuos silíceos está asociado con la presencia de nichos de belita, formados de las partículas ordinarias de cuarzo y sílica. La belita tiene una contribución significativa a la resistencia desarrollada entre los 7 y los 28 días bajo condiciones estándar de curado a 20 °C.

Existen estudios de la formación microscópica de nichos de belita de granos de cuarzo, y se han encontrado diferencias en los niveles de impurezas correspondientes a las diferencias en el comportamiento grabado. Se espera que estas diferencias del comportamiento grabado pueden también ser relacionadas con diferencias en la actividad hidráulica.

Algunos otros estudios han sugerido que "los nichos de belita pueden tener un mayor control en la ganancia de resistencia tardía" y se ha propuesto un factor de correlación para tomar en cuenta el porcentaje y tipo de los nichos de belita cuando se predice la resistencia a 28 días utilizando el Método Ono.

Se debe reconocer que la heterogeneidad de la materia prima es solo una fuente de la heterogeneidad del Clinker y que la pobre asimilación de las grandes cenizas de carbón puede ejercer una mayor contribución. Como sea, en las Plantas que tienen residuos ordinarios de sílice en la materia prima, la resistencia del Cemento a 28 días puede beneficiarse con una molienda más fina de la materia prima, o de una molienda separada de los componentes ricos en sílica, en donde sea posible. La influencia del aumento de finura de la materia prima en los aspectos de la operación del horno, tales como el ciclo interno del polvo, deben tomarse en cuenta.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

EFFECTOS EN LA MOLIENDA DE CEMENTO.

Para la elaboración del Cemento Portland es un factor determinante las características físicas y químicas del Clinker que se emplea. Ya que se cuenta con un Clinker con las propiedades buscadas, es necesario molerlo con Yeso, almacenarlo y transportarlo.

Durante estos pasos de fabricación ocurren cambios físicos que alteran las propiedades del Cemento tal como: deshidratación del Yeso, prehidratación, carbonatación. Estos cambios ocasionan efectos contrarios a lo que se necesita, obstrucciones en el manejo, terrones, costras, cambios de fluidez, variaciones del fraguado y resistencias bajas.

La materia prima necesaria en la elaboración del Cemento Portland, en casi todas sus presentaciones es principalmente Clinker y Yeso, y en algunos tipos de Cemento, se utilizan también algunos aditivos.

Los aditivos pueden ser de tipo activo o de tipo inactivo o inerte. Los aditivos activos son materiales con una composición química que les permite participar en las reacciones químicas de hidratación del Cemento, así como generar resistencia mecánica. Los aditivos inactivos o inertes son aquellos materiales cuya composición química, así como su cristalografía les impide intervenir en las reacciones de hidratación del Cemento, por lo que no participan en el desarrollo de resistencia mecánica.

Se deben tomar en cuenta las características de molturabilidad de las materias primas involucradas en la elaboración del Cemento Portland.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

El Clinker, mineral sintético que participa en la elaboración del Cemento Portland, está constituido por fases de silicatos de calcio hidráulicos, llamados Alita y Belita (C_3S y C_2S , respectivamente), una fase de aluminato tricálcico llamado Celita (C_3A) y una fase de ferrialuminato tetracálcico (C_4AF), conocida con el nombre de Felita. Así como otros compuestos que se encuentran en las diferentes fases del Clinker, tales como:

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	Abreviatura usada en la Industria del Cemento
Alita (silicato tricálcico)	$3 CaO \cdot SiO_2$	C_3S
Belita (silicato dicálcico)	$2 CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Celita (aluminato tricálcico)	$3 CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Felita (aluminoferrito tetracálcico)	$4 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF
Aluminoferrito cálcico (presente cuando la cantidad de $Al_2O_3 < Fe_2O_3$, en ausencia de C_3A).	$2 CaO \cdot (Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3)$	$C_2(A,F)$
Óxido de calcio en forma de Cal libre.	CaO	
Óxido de magnesio libre como periclasa	MgO	
Aluminatos alcalinos (presentes cuando $K_2O + Na_2O > SO_3$)	$K_2O \cdot 8CaO \cdot 3Al_2O_3$ $Na_2O \cdot 8CaO \cdot 3Al_2O_3$	KC_8A_3 NC_8A_3
Sulfatos alcalinos (presentes cuando $K_2O + Na_2O > SO_3$)	K_2SO_4 Na_2SO_4	$K_2 \bar{S}$ $Na_2 \bar{S}$
Sulfato de Calcio (presentes cuando $K_2O + Na_2O < SO_3$)	$CaSO_4$	$C \bar{S}$

La cantidad presente de las cuatro fases minerales del Clinker se determina basándose en el análisis químico utilizando las ecuaciones de Bogue, o por medio de un análisis microscópico de sección pulida.

La diferencia que se observa en los resultados obtenidos mediante las ecuaciones de Bogue y el método de sección pulida, tiene su explicación en que, mientras que el método de sección pulida toma en cuenta todos los componentes presentes en las fases del Clinker, las ecuaciones de Bogue solo consideran el efecto generado por los principales óxidos que componen el Clinker (óxidos de calcio, aluminio, silicio y hierro) sin considerar el efecto de los óxidos menores, que se presentan en forma de impurezas en trazas (óxidos de magnesio, sodio, potasio, azufre, fósforo, etc).

Capitulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

Los porcentajes de los minerales presentes en el Clinker para la elaboración del Cemento Portland se encuentran entre los valores:

Mineral	% en peso (calculado a partir de las ecuaciones de Bogue)		
C ₃ S	55	a	72
C ₂ S	18	a	8
C ₃ A	14	a	11
C ₄ AF	9	a	7
Otros	4	a	2
Suma total	100	a	100

El Clinker que es dosificado en las tolvas de alimentación del molino de Cemento llega de 4 diferentes lugares:

- Directamente del horno.
- De un patio de almacenamiento sin techar.
- De un patio de almacenamiento techado.
- De un silo de almacenamiento.

Cada lugar de procedencia genera diferentes efectos en la molienda de Cemento.

El principal problema que presenta la utilización del Clinker procedente del horno es la temperatura de los nódulos, ya que generalmente llegan nódulos pequeños en un rango de 80 a 120°C, pero también se tendrán nódulos de mayor tamaño que conservan calor en el centro, el cual puede estar al rojo con una temperatura aproximada de 500°C.

También varía el tamaño de los nódulos, que pueden ser desde polvo hasta grandes nódulos, o también se puede tener Clinker poroso o Clinker sobrecalcinado, el cual es muy denso. Las características del Clinker alimentado al molino están en función de las condiciones de operación del horno y del enfriador.

Esto genera que la operación del molino sea poco estable, y la calidad del Cemento es baja, debido a las variaciones que el producto presenta en blaine y Finura, además de que si se utilizan espreas con alto flujo de agua para disminuir la temperatura del Clinker, el Cemento tendrá una prehidratación y humedad.

El Clinker procedente de un patio de almacenamiento sin techo está sujeto a las condiciones meteorológicas (entre estas, las que más lo afecta es la lluvia) del lugar, así como al grado de compactación (si los camiones descargan subiendo sobre el almacén), el tiempo de almacenamiento, el punto del almacén del que fue tomado, etc.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

Estas condiciones generarán que el Clinker pequeño y la periferia de los nódulos grandes hayan sufrido una reacción de hidratación, lo que hará que el Cemento producido sea de bajo desarrollo de resistencia, así como de una baja calidad.

En estas condiciones, el Clinker se encuentra a temperatura ambiente, lo que unido a la humedad absorbida, generará condiciones de trabajo en el molino que causarán un forramiento de la bola y el bloqueo del diafragma, provocando una operación inestable con una producción de Cemento variable en blaine y Finura.

El Clinker utilizado de un patio de almacenamiento, estará sujeto a las condiciones ambientales y al tiempo de almacenamiento que tenga, por lo que, si contiene cal libre, puede sufrir una carbonatación con el CO₂ atmosférico, y el Clinker puede sufrir una hidratación superficial. El Clinker transportado a la tolva de dosificación del molino tendrá una temperatura y una granulometría más o menos estables.

Esta forma de almacenamiento se recomienda cuando se tiene una sobreproducción de Clinker.

En las Plantas modernas, el modo de almacenamiento es por medio de silos, debido a las ventajas que tiene sobre los otros tipos de almacenamiento, tales como:

- El Clinker que se lleva a la tolva del molino mantendrá una granulometría y una temperatura estables.
- El Clinker que se extrae del silo se encuentra homogeneizado, tanto en calidad como en molturabilidad.
- Las condiciones ambientales (como la lluvia), no dañan el Clinker.
- Se tiene un tiempo de residencia constante del Clinker en el silo.

Es necesario que el Clinker alimentado al molino tenga una estabilidad de temperatura, así como una granulometría y una molturabilidad que se mantengan dentro de un rango determinado, para que la operación en el horno se mantenga constante, para poder producir un Cemento cuya calidad debe cumplir de manera satisfactoria con las guías de calidad preestablecidas y una desviación estándar que se encuentre entre los límites fijados.

Para que la alimentación al molino tenga una granulometría estable, se puede utilizar un molino de rodillos o una trituradora similar, colocado entre la báscula dosificadora de Clinker y la entrada del molino de Cemento.

El Yeso se añade al Clinker en molino de Cemento con el fin de controlar el tiempo de fraguado, y en tiempos recientes se ha demostrado que también influye en el desarrollo de resistencias y en la estabilidad volumétrica del concreto.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

En la mezcla de Clinker y Yeso, el "contenido óptimo de Yeso" se alcanza cuando la cantidad de Yeso presente proporciona altas resistencias y una mínima expansión en el Cemento, y depende de la cantidad de la fase C_3A presente, del blaine, del contenido de álcalis solubles en el Clinker y de las características particulares del Yeso que se esté utilizando.

Para determinar el tiempo de fraguado se emplea el Método de "Vicat", determinando el tiempo de fraguado inicial y final, que de acuerdo a la Norma ASTM C 150-95, para el Cemento Portland es:

- Fraguado inicial: no menor de 45 minutos.
- Fraguado final: no mayor de 8 horas.

Para determinar la cantidad de Yeso que se necesita para controlar el tiempo de fraguado inicial, se debe tener en cuenta el contenido de C_3A en el Clinker, así como el blaine y la Finura del Cemento que se desea producir. También se debe tomar en cuenta el sistema de molienda que se emplea para la producción de Cemento, debido a la temperatura que se tendrá el material dentro del molino y el tiempo de residencia a esa temperatura.

Los materiales aditivos del Cemento están considerados como componentes que por sus características pueden ser utilizados en la fabricación de Cemento, debido a que tienen un impacto en los costos de producción, además, puede ofrecer algunas ventajas que el Cemento puro (compuesto solo de Clinker y Yeso) no tiene.

Los diferentes materiales aditivos pueden ofrecer características al Cemento tales como: un menor desarrollo de calor de hidratación durante su endurecimiento, lo que resulta en una mayor estabilidad volumétrica para obras de grandes volúmenes de concreto, un mayor desarrollo de resistencias a edades largas, una mayor durabilidad del concreto elaborado en función de una mayor resistencia al ataque de agentes agresivos externos.

Los aditivos de tipo activo pueden sustituir parcialmente al Clinker Portland, debido a que sus características químicas y cristalográficas les permiten participar en las reacciones de hidratación del Cemento.

Este tipo de aditivos comprende:

- La escoria granulada de altos hornos.
- Puzolana.
- Cenizas volantes.
- Caliza.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

Entre los aditivos inertes se cuenta principalmente a la piedra caliza.

Los Cementos con aditivos se conocen como "Cementos mezclados".

Las escorias granuladas de altos hornos son un subproducto de la fundición de hierro en altos hornos. Se producen entre 0.4 y 1.0 toneladas de escorias granuladas por tonelada de hierro colado. La escoria fundida es enfriada rápidamente con agua para obtener la escoria granulada, arenosa en estado vítreo. Si el enfriamiento es lento, se obtendrá una escoria cristalizada.

Una de las propiedades de la escoria granulada es que, molida finamente, al ser mezclada con agua, forma los mismos tipos de hidratos que el Cemento Portland, por lo que genera un desarrollo de resistencia.

Debido a que es enfriada con agua, y a que se almacena en patios a la intemperie, cuando la escoria granulada llega a la Planta de Cemento, tiene un elevado contenido de humedad, que se encuentra en un rango de 4 a 10%.

Los componentes que constituyen a la escoria granulada y sus porcentajes más comunes son:

oxido	Contenido %
SiO ₂	20 a 30
Al ₂ O ₃	10 a 20
Fe ₂ O ₃	3 a 6
CaO	35 a 45
MgO	2 a 10

En la industria del Cemento, se utiliza un módulo para determinar la actividad de la escoria granulada con el agua, desde el punto de vista de la composición química:

$$F_1 = \frac{C + M + A}{S}$$

El valor de esta ecuación debe estar en el rango de 1.5 a 2.0

Como la escoria granulada es compacta, vítreo y de baja porosidad, el contenido de la fase vítreo se determina por análisis microscópico o por difracción de Rayos X.

Una escoria recomendable es aquella en la que se tenga una cantidad mayor de 65% de la fase vítreo.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

Algunas investigaciones aplican una ecuación en la que se correlaciona la composición química, el contenido de la fase vítrea, la resistencia relativa de un Cemento constituido por 35% de escoria granulada (la que se está evaluando) y 65% de Cemento Portland ordinario:

$$F_2 = \frac{C + M + \left(\frac{1}{3}\right)A}{S + \left(\frac{2}{3}\right)A}$$

$$\frac{\delta_{35}}{\delta_o} = 0.38 \cdot G \cdot (F_2 - 0.72) + 0.75$$

Donde δ_{35} es la resistencia de un Cemento que contiene 35% en peso de escoria y δ_o es la resistencia de un Cemento Portland puro.

Estas ecuaciones solo se utilizan como comparación de las escorias granuladas. La evaluación se debe hacer con pruebas de resistencia a la compresión (utilizando el método ASTM C-109), empleando para cada serie de cubos, un Cemento con la cantidad de escoria que se quiere evaluar.

La Norma ASTM C-989 especifica un índice de actividad de escoria, el cual es la comparación entre la resistencia dada por un Cemento preparado con 50% de escoria granulada (molda entre 3000 y 5000 cm²/gramo) y 50% de Cemento Portland y la resistencia dada por el Cemento Portland puro, aplicando en ambos casos la Norma ASTM C-109.

Dado que el contenido de MgO en la escoria granulada de alto horno es elevado, se debe tomar en cuenta la cantidad de MgO en el Clinker empleado.

La molturabilidad de la escoria granulada es elevada, debido a sus características vítreas y a su estructura compacta. En algunos casos puede llegar a ser mayor hasta en un 50% a la del Clinker.

En los casos en los que se muelen juntos el Clinker Portland, el Yeso y la escoria granulada, se debe tener primero la escoria granulada seca, después se debe tomar en cuenta que el Clinker origina cargas circulantes crecientes en cantidad y contenido de escoria, por lo que se tiene una operación no estable de molienda y un producto fuera de control.

Algunos fabricantes recomiendan moler la escoria por separado del Clinker, y hacer una mezcla dosificada de Cemento Portland ordinario con escoria molida al blaine indicado, de acuerdo a su índice de actividad.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

Otro material utilizado como aditivo en el Cemento es la puzolana. Según estudios realizados, las puzolanas naturales no tienen propiedades cementantes por sí mismas, pero cuando se mezclan con cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y agua, a temperatura ambiente, adquiere estas propiedades.

Actualmente se utilizan dos tipos diferentes de puzolanas, las de origen natural y las de origen artificial. Las puzolanas de origen natural, pueden tener diferentes orígenes, tales como origen volcánico, por sedimentación o biológico. Las puzolanas de origen artificial generalmente son subproductos de otros procesos. Generalmente son materiales con un alto contenido de óxido de silicio y que han pasado por procesos térmicos.

Se debe cuidar, entre otros factores, el índice de molturabilidad de las diferentes puzolanas que se pueden utilizar, ya que, debido a su origen, pueden representar un elevado costo de molienda, o contener trazas de materiales no deseados en el proceso de elaboración de Cemento.

Aunque su composición es variable y depende de su origen, generalmente se busca que la composición de la puzolana que se desea emplear se encuentre en el siguiente rango:

óxido	Contenido %
SiO_2	55 a 80
Al_2O_3	25 a 10
Fe_2O_3	1 a 3
CaO	8 a 12

La actividad de los materiales puzolánicos se evalúa de diferentes maneras, ya sea por su relación de óxidos, por su fijación de cal, etc.

El método descrito en la Norma ASTM C-311 sirve para determinar la resistencia relativa entre un Cemento formulado con un 35% en volumen de puzolana y 65% de Cemento Portland ordinario y un Cemento Portland ordinario (el mismo que se utiliza para la formulación del Cemento puzolánico). La prueba de resistencia se realiza con la prueba ASTM C-109.

La resistencia relativa a la edad de 28 días, utilizando un material totalmente inerte, se encuentra en el rango de 55 a 60%. La resistencia relativa, también a 28 días, utilizando un material puzolánico va a estar en el rango de 70 a 110%.

El porcentaje a utilizar de puzolana en la formulación del Cemento Portland dependerá de diferentes factores, entre los que se encuentran la reactividad hidráulica de los cristales que constituyen el Clinker utilizado, la actividad de la puzolana, el sistema de molienda empleado, la demanda de agua del Cemento puzolánico, etc.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

Las cenizas volantes son un material que procede de Plantas industriales, tales como las grandes termoeléctricas, que emplean combustibles sólidos, principalmente carbón, en sus procesos.

El contenido de ceniza en el carbón (compuesta principalmente de óxidos de silicio, aluminio, fierro y calcio) determina su calidad, y la producción de ceniza se encuentra en el orden de 0.03 a 0.08 kg de ceniza / kWh, para el caso de las termoeléctricas.

Las cenizas volantes se encuentran formadas generalmente por material vítreo y son partículas esféricas de tamaño pequeño con blaine que va de 2500 a 5000 cm^2/g , con una Finura de 60 a 90% menor de 44 micras. El contenido de carbón residual presente está en función de las esferas (o partículas vítreas) huecas presentes en la ceniza volante.

Para los fines de aditivo del Cemento, las cenizas se clasifican en dos diferentes tipos:

- Cenizas tipo "F": Estas cenizas tienen un alto contenido de sílice y un bajo contenido de calcio, y se encuentran formadas por partículas vítreas.
- Cenizas tipo "C": su contenido de calcio es mayor que en las cenizas tipo F, y se integran por compuestos cálcicos cristalinos.

Las cenizas tipo F son puzolánicas, y debido a esto no tienen actividad hidráulica por si solas.

Las cenizas tipo C, cuentan con ciertas propiedades cementantes por si mismas, debido a que su contenido de calcio es elevado.

La calidad de la ceniza volante que se desea utilizar está en función del contenido de carbón presente. Cuando se tiene un contenido de carbón superior al 5%, se dice que las propiedades puzolánicas de la ceniza son bajas, debido al bajo contenido de vidrio y una Finura baja. Las propiedades puzolánicas de las cenizas volantes se encuentran relacionadas con su composición química, su contenido de vidrio, la cantidad de carbón presente y su Finura.

La evaluación más práctica de la actividad puzolánica de una ceniza volante se obtiene determinando su porcentaje de resistencia relativa del Cemento mezclado contra el Cemento Portland ordinario, usando la Norma ASTM C-109 para determinar las resistencias respectivas.

Si se cuenta con cenizas volantes de alta Finura, se pueden mezclar directamente con el Cemento ordinario, pero si se tienen cenizas con baja Finura, deben molerse junto con el Clinker y el Yeso.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

La caliza (CaCO_3) puede emplearse en algunos casos como aditivo, debido a que se ha demostrado en algunas investigaciones que no es totalmente inerte a las reacciones de hidratación del Cemento, y que, en algunos casos, puede sustituir al Yeso en el control del tiempo de fraguado.

Es bastante práctico de utilizar como aditivo debido a su alta disponibilidad, su bajo costo y su facilidad de molienda (la cual depende de su origen).

Para poder utilizar caliza como aditivo de Cemento Portland, debe tener ciertas características, entre las que se encuentran:

- Su contenido de CaCO_3 debe ser elevado.
- Debe tener una baja porosidad intrínseca.
- Debe carecer o tener un mínimo de material arcilloso.
- Debe carecer o tener un mínimo de materia orgánica.

La cantidad de caliza que se dosifica a un Cemento mezclado debe estar en función de los requerimientos que se tengan, tanto de resistencia a la compresión como de la aplicación que tenga el Cemento mezclado respectivo.

El Cemento, ordinario o mezclado, debe cumplir con una serie de propiedades y características, las cuales están oficialmente dirigidas por las Normas Nacionales e Internacionales.

Se tiene el caso de que algunas propiedades del Cemento están regidas por Normas o Guías no oficiales, establecidas como compromisos mercantiles. Estas guías son superiores a lo establecido por las Normas oficiales.

La propiedad principal que se busca que tenga el Cemento hidráulico, con o sin aditivos, es el desarrollo de resistencia mecánica en función del tiempo. Esta propiedad se evalúa por métodos Normalizados.

En la Planta se evalúa la resistencia del Cemento mediante procedimientos estándar para la preparación de morteros (arena + Cemento + agua).

Los cubos, hechos con mortero mediante procedimientos estructurados, son sometidos a compresión y se evalúa su resistencia a periodos de 1, 3, 7 y 28 días.

Para investigación, también se evalúa la resistencia a la compresión a periodos de 90, 180 y 365 días.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

La forma en que se desarrollan las resistencias, comparando el Cemento Portland ordinario y el Cemento mezclado es:

- Las resistencias iniciales en el Cemento Portland ordinario son mayores que en el Cemento mezclado debido a la substitución parcial de Clinker por aditivo.
- Las resistencias finales son más altas en los Cementos mezclados y se explica por la participación del aditivo.

A pesar de la posible actividad puzolánica de los aditivos integrados al Cemento mezclado, se deben considerar inertes en el desarrollo de las resistencias a corto plazo. Se considera que el período de tiempo en el cual inician su aportación a la resistencia depende de la actividad hidráulica del aditivo, su Finura, la distribución de partículas, la humedad del concreto (a ese período), la temperatura, etc. se acepta que la escoria granulada de alto horno inicia su aportación en los primeros días de iniciado el proceso de hidratación, mientras que los materiales puzolánicos empiezan después de un periodo de 3 a 4 semanas.

Otra de las propiedades que varían en el Cemento mezclado es el calor de hidratación desarrollado.

El calor de hidratación de los Cementos hidráulicos, generado por las principales fases del Clinker tiene un efecto de autoaceleración en la hidratación del Cemento, por lo que, entre mayor sea el calor de hidratación, más rápido se dará el desarrollo de las resistencias del Cemento.

El calor generado por la hidratación es benéfico y hasta necesario para algunas condiciones y características de la obra en que aplique el concreto, pero resulta problemático para cuando se aplique el concreto en obras de gran masa, debido al gradiente térmico generado que puede producir tensiones mecánicas fuertes y generar grietas en el concreto.

La cantidad de aditivo anexado al Cemento se encuentra en proporción a la disminución que se tenga en el desarrollo del calor de hidratación.

Esta característica de los Cementos mezclados permite aprovecharlos para su uso en obras que requieren un bajo desarrollo del calor de hidratación. Cuando se utiliza escoria granulada de alto horno, el desarrollo de calor de hidratación es más rápido que cuando se usa puzolana, debido a que la escoria tiene un índice de actividad mayor y un índice hidráulico mayor en el Cemento en el que participa.

El calor de hidratación de los Cementos hidráulicos se determina mediante el método de la Norma ASTM C-186-94, mientras que la Norma ASTM C-150-95 limita el valor del calor de hidratación para los diferentes tipos de Cemento Portland.

PRUEBAS PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD EN EL CEMENTO.

Durante la molienda del Cemento se establecen una serie de controles que permitan mantener una desviación mínima de las guías establecidas, tanto físicas como químicas.

Para poder mantener un control de la operación de molienda de Cemento, se deben realizar muestreos para análisis básicos cada dos horas. Los puntos que se deben cubrir en el muestreo son:

- Finura.
- Blaine
- % SO₃.
- % Aditivo.

Al finalizar una jornada, se toma una parte de cada una de las muestras y se juntan para tener una sola muestra de Cemento, la cual es representativa para una jornada de trabajo, y de esta muestra se obtienen los siguientes parámetros (que pueden variar para cada Planta):

- Finura.
- Blaine
- Resistencia a la compresión.
- Tiempo de fraguado.
- Expansión.
- Peso específico.
- Composición química.
- Contenido de SO₃ (%).
- Contenido de aditivo (para el caso de Cemento mezclado).
- Pérdida por Ignición.
- Residuo insoluble.
- Cal Libre.

La Finura del Cemento, expresada como un porcentaje para una malla determinada, representa el porcentaje de partículas de Cemento menor al tamaño referido. Algunas Plantas lo refieren como "residuo en malla X". Es referido a la fracción de material con un tamaño mayor al de la apertura de la malla "X". También es usual expresarlo en porcentaje.

Generalmente se utilizan las mallas de número 200 y 325, los que equivalen a un tamaño de claro de 75 y 45 micras, respectivamente.

El tamaño de claro para una malla se obtiene del número de la malla de la siguiente forma: el número de malla indica la cantidad de cuadros que tiene una malla por cada pulgada de longitud, es decir, la malla número 200 tiene 200 cuadros por cada pulgada.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

La forma de determinar la finura de los Cementos hidráulicos utilizando mallas número 100 (con un claro de 150 micras) y número 200 (con un claro de 75 micras) se encuentra descrito por la Norma ASTM C184-94.

El blaine, o superficie específica, representa el área total expuesta para hidratación por las partículas de un Cemento Portland contenidas en un determinado peso (generalmente en un gramo de muestra).

Para poder determinar el blaine de un Cemento se utiliza la Norma ASTM C-204-94a empleando el aparato de permeabilidad al aire, de blaine, siendo este el método utilizado más comúnmente.

Otros métodos utilizados son:

- El coeficiente volumétrico.
- Superficie específica según Lea y Nurse.
- Método por el turbidímetro de Wagner. (ASTM C-115-94).
- Métodos de microscopía.

El valor del blaine varía dependiendo del tipo de Cemento producido, pero generalmente se encuentra dentro de un rango convenido entre el fabricante y determinadas Normas Nacionales e Internacionales o con el cliente.

Generalmente, el valor del blaine para algunos Cementos se encuentra en el rango:

- Cemento Normal: 3200 a 3500 cm²/gramo.
- Cementos de Alta Resistencia: 3600 a 4000 cm²/gramo.
- Cementos Mezclados: 4000 a 4600 cm²/gramo.
- Supercementos: 5000 a 6000 cm²/gramo.

El Cemento Portland ordinario debe tener un blaine mínimo de 2800 cm²/gramo establecido por la Norma ASTM C-150-95.

Para obtener el valor de la resistencia a la compresión de un Cemento, se aplica una presión continua y creciente a un cubo de mortero de 5 cm por lado, hasta alcanzar el punto de ruptura. Esta determinación se realiza mediante el método de la Norma ASTM C109/C109 M-95.

La resistencia a la compresión de un Cemento se obtiene en pruebas realizadas a cubos con un período de hidratación determinado a 1, 3, 7 y 28 días.

El tiempo de fraguado inicial es el tiempo transcurrido desde el inicio de la hidratación del Cemento, en una pasta fluida hasta que la pasta pierde su plasticidad y alcanza cierto grado de endurecimiento, y es capaz de soportar un peso determinado sobre un área específica.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

El tiempo de fraguado final es el tiempo transcurrido desde el inicio de la hidratación del Cemento en una pasta fluida hasta que su endurecimiento le permite soportar una carga de un peso mayor que el empleado en la determinación del tiempo de fraguado inicial, sin dejar huella en la superficie.

Se tienen 2 métodos normatizados para la determinación del tiempo de fraguado inicial y final:

- Norma ASTM C-191-92: método para la determinación del tiempo de fraguado del Cemento hidráulico por aguja Vicat.
- Norma ASTM C-266-89: método para determinar el tiempo de fraguado en pastas de Cemento hidráulico por aguja Gillmore.

La Norma ASTM C-150-95 establece los siguientes tiempos de fraguado:

Utilizando la aguja Gillmore:

- Fraguado inicial: no menor de 60 minutos.
- Fraguado final: no mayor de 600 minutos.

Utilizando la aguja Vicat:

- Fraguado inicial: no menor de 45 minutos.
- Fraguado final no mayor de 375 minutos.

La prueba de expansión se realiza utilizando una barra cuadrada hecha de pasta de Cemento, con dimensiones de 25 mm por lado y longitud de 250 mm, la cual es mantenida durante un período de 3 horas en el interior de una autoclave, la cual ejerce una presión de 20 kg/cm² generada por el vapor de agua en la misma. La barra es medida antes y después de ser sometida a la autoclave para determinar su crecimiento.

Esta prueba genera una rápida hidratación de las fases del Cemento, incluyendo compuestos que pueden estar presentes en las fases principales, tales como la cal libre, la periclase o un exceso de Yeso, los cuales causan problemas con la estabilidad volumétrica del concreto en períodos largos de tiempo. Por esto, dicha prueba sirve para determinar el comportamiento del Cemento a futuro, acelerando la reacción basándose en la temperatura.

La prueba es realizada utilizando el método de la Norma ASTM C-151-93a. Método para determinar por autoclave la expansión Cementos Portland.

La Norma ASTM C-150-95 establece una expansión máxima permisible de 0.80%.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

El peso específico, llamado también "densidad real", del Cemento es determinado utilizando un densímetro "Le Chatelier", se emplea petróleo como medio líquido para determinar el volumen desplazado por un peso conocido de Cemento. Este método está definido por la Norma ASTM C-188-89, método para determinar la densidad del Cemento hidráulico.

Para un Cemento tipo Portland I, el peso específico debe tener un valor del orden de 3.15 g/cm^3 .

Para determinar la cantidad de Cemento que existe en los silos de almacenamiento y el volumen que debe tener la bolsa de envase se emplea la densidad aparente, la cual dependerá de la cantidad de aireación que tenga el Cemento, su temperatura, su compactación y la finura. Por lo que la densidad aparente es variable y puede encontrarse en el rango de 1.0 a 1.8 g/cm^3 .

La composición química del Cemento es la cantidad de sus componentes, y la forma en que se encuentran repartidos en sus fases, por lo que es de mucha importancia conocerla, tanto para fines operativos, como para fines de certificación.

Los métodos estándar para el análisis químico del Cemento hidráulico se encuentran definidos por la Norma ASTM C-114-94.

El análisis químico del Cemento se realiza tradicionalmente por vía húmeda para los siguientes componentes:

- SiO_2 : óxido de silicio.
- Al_2O_3 : óxido de aluminio.
- Fe_2O_3 : óxido de hierro.
- CaO : óxido de calcio.
- MgO : óxido de magnesio.
- SO_3 : trióxido de azufre.
- Na_2O : óxido de sodio.
- K_2O : óxido de potasio.
- TiO_2 : óxido de titanio.
- P_2O_5 : pentóxido de fósforo.
- ZnO : óxido de zinc.
- Mn_2O_3 : óxido de manganeso.
- S: sulfuros.
- Cl: cloruros.
- C_x : óxido de calcio libre (cal libre).

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

Además de los factores:

- PPI (pérdida por ignición).
- RI (residuo insoluble).
- Alk_{sol} (álcalis solubles en agua).
- Chl_{sol} (sustancias orgánicas solubles en cloroformo).

Esta Norma también define las variaciones permisibles en resultados de varias determinaciones de la misma muestra.

La Norma ASTM C-150-95 define los requerimientos químicos estándar para los cinco tipos de Cementos Portland, así como los requerimientos opcionales.

Otro de los factores que se deben observar en el Cemento Portland es el contenido de sulfatos en el Cemento, expresado en forma de SO_3 .

Para Cementos elaborados con combustibles de bajo contenido en azufre, el SO_3 en el Cemento representará el contenido de Yeso, multiplicando el contenido de SO_3 por el factor 2.15.

Cuando se tiene un Clinker producido con combustibles con un alto contenido de azufre, el SO_3 determinado será el contenido en los sulfatos alcalinos y sulfato de calcio del Clinker, más el procedente del Yeso.

El contenido máximo de SO_3 que puede tenerse en un Cemento Portland está definido por la Norma ASTM C-150-95. el límite es el mismo definido para el análisis químico.

El contenido máximo de SO_3 , bajo Norma, protege de tener un Cemento con problemas de inestabilidad volumétrica por una alta presencia de Yeso y también asegura el tener un Cemento con un tiempo de fraguado inicial dentro de Norma.

Para el caso de los aditivos utilizados en el Cemento Portland, se tiene la Norma ASTM C-595 M-95, la cual contiene especificaciones estándar y clasifica a los Cementos como:

- Cemento Portland con escoria de alto horno.

Existe un solo tipo, llamado "IS", con 3 opciones:

1. (MS) moderada resistencia a los sulfatos.
2. Con inductor de aire.
3. (MH) con moderado calor de hidratación.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

- Cemento Portland puzolánico.

Existen dos tipos, llamados tipo "IP" y tipo "P".

1. Tipo "IP": para uso general de construcción.
2. Tipo "P": para uso general de construcción donde no se requieran altas resistencias a edades tempranas.

En ambos tipos se tienen las 3 opciones:

1. (MS) moderada resistencia a los sulfatos.
2. Con inclusor de aire.
3. (MH) con moderado calor de hidratación.

- Cemento Portland con cenizas volantes.

Solo se tiene un tipo, llamado tipo "S", el cual es una mezcla de Cemento Portland y cenizas volantes. Solo se tiene la opción con inclusor de aire.

Los requerimientos físicos son prácticamente iguales a los del Cemento Portland.

Tanto las puzolanas como las cenizas volantes deben cumplir ciertos requisitos para poder ser utilizados en la formulación del Cemento Portland:

- Cantidad retenida por tamizaje en húmedo, en malla de 45 micras, máximo de 20%.
- Alcalis reactivos en la puzolana para en uso en tipos definidos, deben generar una expansión en barras de mortero a 91 días máxima de 0.05%.
- Un índice de actividad en la puzolana o ceniza volante, con un Cemento Portland a 28 días con un mínimo de 75%.

El control del contenido de aditivo es importante debido a que al ser agregado prácticamente inerte a cortas edades de hidratación del Cemento, el desarrollo de resistencias a edades mayores para este Cemento dependerá de la cantidad de aditivo.

Para el llenado de los sacos de Cemento debe tomarse en cuenta el cambio de densidad, ya que se puede tener el caso de que el tamaño del saco sea insuficiente si la densidad del Cemento disminuye, o que el saco parezca vacío si la densidad aumenta.

Desde el punto de vista económico, el costo de producción del Cemento mezclado debe variar en forma inversa a la cantidad del aditivo adicionado.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

Las pérdidas por ignición se asumen que son humedad y CO₂, contenidos en el Cemento. El método para determinar el valor de las pérdidas por ignición se encuentra descrito en la Norma ASTM C-114-94, y consiste en colocar la muestra de Cemento en la mufla a 950°C por un periodo de tiempo de 20 minutos.

Por Norma, el Cemento debe tener un máximo de un 30% de pérdida por ignición.

El residuo insoluble es el material inerte que forma parte del Cemento Portland. Generalmente se considera de esta forma al cuarzo que se encuentra contaminando las materias primas empleadas para la fabricación de Clinker o contaminando el Yeso.

Por Norma, el máximo de residuo insoluble presente en el Cemento Portland debe ser de 0.75%.

Para el caso de los Cementos mezclados, no se aplica este límite.

La cal libre, el óxido de calcio no combinado en forma de silicatos de calcio, debe estar siempre por debajo de las guías preestablecidas. Por lo general, el nivel máximo de cal libre presente en el Clinker es de 1.5%.

Para el caso de los Cementos mezclados, la guía para cal libre puede ser un poco mayor en virtud de que la finura a que es molido el Clinker es mayor, por lo que disminuye el riesgo de inestabilidad volumétrica.

Otro punto de cuidado en la molienda de Cemento es la utilización de las ayudas de molienda, cuyo objetivo es resolver situaciones anormales de producción, por lo que no deben utilizarse como parte del sistema de molienda.

Las ayudas de molienda son utilizadas cuando se requiere aumentar la producción de Cemento en el molino, debido a una alta demanda. Las ayudas de molienda pueden aumentar la producción hasta en un 20%, sin variar las propiedades del Cemento producido.

El punto de consideración en el uso de las ayudas de molienda es el elevado precio de estas, por lo que en algunas ocasiones, el costo de la ayuda de molienda empleada, por tonelada de Cemento, es mayor al costo de la energía eléctrica consumida por tonelada, por lo que solo se utilizan cuando la demanda de Cemento lo justifica.

Otra situación en la que el uso de las ayudas de molienda es aplicable es cuando se tiene un bloqueo en alguno de los diafragmas del horno, especialmente en el diafragma de descarga y el interior del molino se encuentra con un alto grado de llenado de material. Las ayudas de molienda ayudarán a un pronto desalojo del material acumulado. En este caso, la aplicación de las ayudas de molienda es solo puntual.

Capítulo VI: Efectos de la heterogeneidad de la Harina Cruda.

Las ayudas de molienda más aplicadas son:

- Trietanolamina.
- Acetato de Trietanolamina.
- Propilén glicol.
- Glicol etilénico.
- HEA-2.
- DDA-7.
- REAX.

La cantidad de aditivo empleado varía entre 100 y 500 ppm, lo que equivale a 100 a 500 g/ton de Cemento.

Estos agentes tensoactivos contrarrestan la acumulación de partículas finísimas, tanto en el empaquetado del molino como en la bola, manteniéndolos limpios, con lo que se vuelve más eficiente el efecto de molienda, y se fluidifica el material ya molido.

En la molienda de Cemento en circuito abierto se logran aumentos considerados en rangos de 10 a 15%, conservándose el blaine y la finura del Cemento producido.

En la molienda de Cemento en circuito cerrado, la ayuda de la molienda participa también aumentando la dispersión del material en el separador, eliminando parcialmente la aglomeración de partículas bastante finas. Con una dispersión óptima se puede lograr un aumento de producción en el rango de 15 a 20%.

COSTOS ORIGINADOS POR UN PARO DE HORNO.

Los costos originados por el paro de un horno rotatorio se dividen en costos directos y costos indirectos. Los costos directos son aquellos que están relacionados con el mantenimiento del horno y de los equipos que integran el sistema de calcinación. Los costos indirectos son: la pérdida de producción causada como consecuencia del paro, remanejo de Clinker, pago por accidentes del personal externo contratado en virtud de que la Planta es corresponsable ante el Seguro Social, etc.

En primer lugar se tratará lo inherente a los costos directos, por lo que se estimará un paro programado de horno durante un tiempo de 15 días.

Es importante considerar la pérdida de producción de Clinker que se tiene durante el paro de horno por 15 días. Esta producción de Clinker que se pierde jamás se vuelve a recuperar y de manera directa implica que las utilidades obtenidas por la venta de esa cantidad equivalente de Cemento, no son recuperadas.

Para hacer una valoración de las utilidades no obtenidas, se estima como costo de producción de Cemento a nivel Planta, de 30 dólares/tonelada, considerando ya integrados los costos de: energía eléctrica, mano de obra, costos de mantenimiento en general, costos de explosivos, combustibles, Seguro Social, servicios, impuestos, materias primas adquiridas de terceros, ensacado y sacos de papel, etc., etc.

No se estiman los costos de: mercadotecnia, oficinas centrales con su serie de departamentos de servicio, atenciones al cliente, capacitación al personal, etc.

Tomando también la estimación de que el costo venta del Cemento, de empresa a cliente, es de 100 dólares/tonelada, las utilidades no percibidas serían de:

$$\begin{aligned}\text{Utilidad por día} &= (100 - 30) \times (8,947 \text{ Ton/día}) \\ &= 70 \text{ dólares/ton} \times (8,947 \text{ ton/día}) \\ &= 626,290 \text{ dólares/día}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Total de Utilidades No Percibidas} &= 626,290 \text{ dólares/día} \times 15 \text{ días} \\ &= 9,394,350 \text{ dólares}\end{aligned}$$

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

En un horno con precalentador y con enfriador de parrillas, la longitud de cada una de las zonas en que el material en proceso adquiere diferentes características, en el interior del horno, se determina mediante una relación longitud/diámetro del horno, de la siguiente forma:

Zona de entrada	1 metro	Concreto de alta alúmina
Zona de precalentamiento	Resto del horno	Ladrillo de baja alúmina
Zona de calentamiento	2 diámetros	Ladrillo de alta alúmina
Zona de fase líquida	3 diámetros	Ladrillo de magnesita
Zona de alta temperatura	3 diámetros	Ladrillo de magnesita
Zona de transición baja	1 diámetro	Ladrillo de magnesita
Zona de enfriamiento	2 metros	Concreto plástico

El tipo de recubrimiento refractario de cada zona depende de las características de abrasión, reacción química y temperatura en las que se encuentre el material cuando la atraviesa. El costo del ladrillo refractario depende del material base de que está hecho y de las características de su hechura, siendo más caro el ladrillo utilizado para el recubrimiento de las zonas de alta temperatura y de transición baja, el cual está fabricado con magnesita cristalina.

En las zonas de entrada y de enfriamiento del horno se emplea concreto refractario. El concreto refractario puede ser de dos tipos diferentes, el concreto refractario de alta alúmina, utilizado en la zona de entrada y el concreto plástico, usado para la zona de enfriamiento. El concreto plástico es más caro que el concreto de alta alúmina.

Los precios para los ladrillos refractarios varían según las características de los mismos y de la marca de fabricante, pero se encuentran dentro del rango de:

Pieza	Costo
Ladrillo refractario de alta alúmina	25 dólares / pieza
Ladrillo refractario de alta temperatura	35 dólares / pieza
Ladrillo refractario de baja alúmina	20 dólares / pieza
Concreto refractario de alta alúmina	20 dólares / decímetro cúbico
Concreto refractario plástico	30 dólares / decímetro cúbico

Los cálculos se efectuarán en dólares americanos, debido a que los ladrillos refractarios se adquieren de empresas extranjeras, y su costo es manejado en esta denominación; los demás cálculos se efectuarán también en dólares americanos, para establecer un costo internacional y mantener una congruencia con el costo del refractario.

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

Los cálculos para un horno de 80 metros de longitud, con una producción de 8,500 toneladas de Clinker por día, se realizan de la siguiente forma:

Paso 1: Se calcula el número de ladrillos refractarios por anillo y la cantidad de anillos por zona. También hay que calcular el volumen de concreto a utilizar.

Los ladrillos refractarios que se emplearán en la zona de fase líquida, zona de alta temperatura y zona de transición, son de las mismas dimensiones. La curvatura que tendrán los ladrillos refractarios depende del diámetro del horno. Para este caso en particular, los ladrillos que se adquieren son, de acuerdo a las dimensiones, pegados a Dovel, es decir, que la cara circular del ladrillo (que es la cara que se coloca contra la cara interna del horno) es la de menor longitud; el otro tipo de ladrillo que existe es el pegado de canto, en el cual la cara circular del ladrillo es la de mayor longitud.

Para un horno con 6 metros de diámetro y 80 metros de longitud, utilizando ladrillos refractarios con medidas (en la cara curva, colocada contra la pared interna del horno) de 10.16 cm de ancho por 15.24 cm de avance y 22.9 cm de altura (como se muestra en la figura 36), la cantidad requerida de piezas por anillo es de 186, de acuerdo con los siguientes cálculos:

$$\text{Perímetro} = (3.1416) (\text{Diámetro}) = 3.1416 \times (600 \text{ cm}) = 1,885 \text{ cm.}$$

$$\text{Número de piezas} = \frac{1\,885 \text{ cm}}{10.16 \text{ cm/pza.}} = 186 \text{ piezas.}$$

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

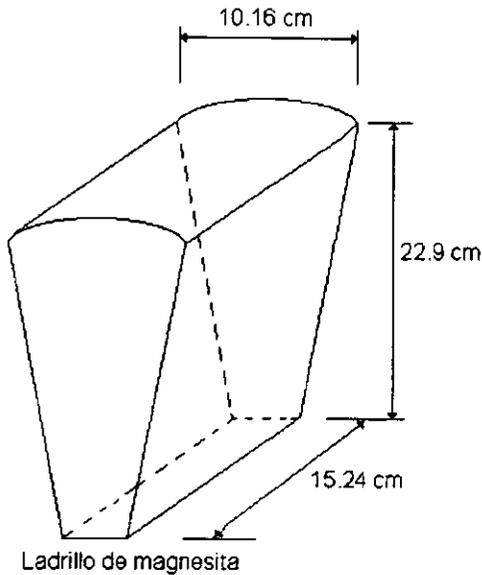


Figura 36: Ladrillo refractario de Magnesita.

Para calcular el número de anillos con que se cubrirá cada una de las zonas del horno, es necesario dividir la longitud de la zona entre el avance del ladrillo, redondeando el valor obtenido.

$$\text{Anillos por Zona} = \frac{\text{Longitud de la Zona}}{15.24 \text{ cm}}$$

El número de ladrillos para cada zona se obtiene multiplicando el número de anillos de cada zona por 186 (el número de ladrillos por anillo).

Para el caso de las zonas del horno que se recubren con ladrillos de alta alúmina, el cual también se coloca a Dovel, tiene como dimensiones: (en la cara curva, colocada contra la pared interna del horno) de 8.89 cm de ancho por 15.24 cm de avance y 22.9 cm de altura (como se muestra en la figura 37):

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

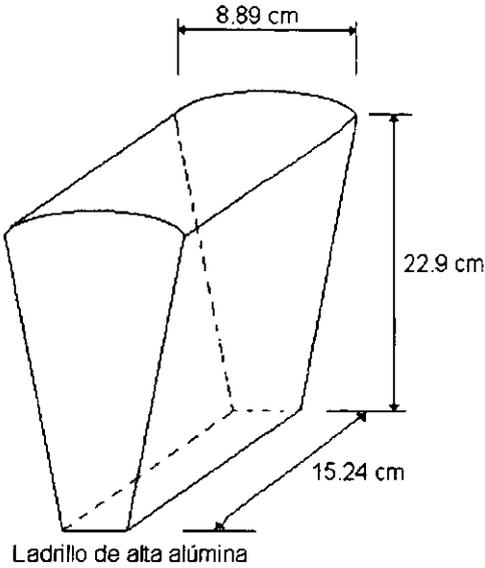


Figura 37: Ladrillo de alta alúmina.

El número de anillos por zona se calcula de la misma forma que con los ladrillos de magnesita, debido a que el avance de los dos tipos de ladrillos es el mismo:

$$\text{Perímetro} = (3.1416) (\text{Diámetro}) = 3.1416 \times 600 \text{ cm} = 1,885 \text{ cm.}$$

$$\text{Número de Piezas} = \frac{1885 \text{ cm}}{8.89 \text{ cm/pieza}} = 212 \text{ piezas}$$

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

Para las zonas de entrada y enfriamiento se utiliza concreto refractario para su recubrimiento. Para calcular el volumen de concreto a utilizar se toma como referencia la altura del ladrillo refractario, y el volumen total se calcula con la diferencia de volúmenes entre la periferia del horno y el círculo interior.

$$\text{Volumen Total} = \frac{\pi}{2} I(D^2 - d^2)$$

$$\text{Volumen en la Zona de Entrada} = \frac{\pi}{2} (1)(600^2 - 554.2^2)$$

$$\text{Volumen en la Zona de Enfriamiento} = \frac{\pi}{2} (2)(600^2 - 554.2^2)$$

Zona	Longitud	Número de anillos	Número de ladrillos
Zona de precalentamiento	17 metros	112	23,744
Zona de calentamiento	12 metros	79	16,748
Zona de fase líquida	18 metros	119	22,134
Zona de alta temperatura	18 metros	119	22,134
Zona de transición baja	6 metros	40	7,360
Zona	Longitud	Volumen	Decímetros cúbicos
Zona de entrada	1 metro	83,000 cm ³	83 dm ³
Zona de enfriamiento	2 metros	166,000 cm ³	166 dm ³

Paso 2: se calcula el costo del recubrimiento para todo el horno.

Zona del horno	Costo del recubrimiento (en dólares)
Zona de entrada	83.036 (20) = 1,660
Zona de precalentamiento	23,744 (20) = 474,880
Zona de calentamiento	16,748 (25) = 418,700
Zona de fase líquida	22,134 (35) = 774,690
Zona de alta temperatura	22,134 (35) = 774,690
Zona de transición baja	7,360 (35) = 257,600
Zona de enfriamiento	166.072 (30) = 4,982

Al sumar el costo del ladrillo refractario y del concreto refractario utilizados en las zonas del horno se obtiene el valor para el recubrimiento del horno, que tiene un costo de 2,707,202 dólares.

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

El tiempo general de operación del horno es de 8 meses, cuando se tiene que programar un paro y cambiar una determinada sección de ladrillo y de concreto refractario. El cuidado y buen manejo de las condiciones de operación, junto con un ladrillo refractario de buena calidad permiten que el cambio se efectúe cada año, por lo que se aumenta 4 meses de vida útil del ladrillo refractario; esto impacta en la economía de la Planta de la siguiente manera:

Se estima como promedio que durante el paro programado será necesario cambiar el ladrillo refractario que cubre una longitud de 10 metros en la zona de alta temperatura (ladrillo de magnesita), 5 metros de ladrillo de alta alúmina y las zonas de entrada y enfriamiento, por lo que el costo total en refractario para cada paro es de:

Zona del horno	Cantidad	Costo del recubrimiento (en dólares)
Zona de alta temperatura	66 anillo	12,276 piezas (35) = 429,660
Zona de alta alúmina	33 anillos	6,996 piezas (25) = 174,900
Zona de entrada	83 dm ³	1,660
Zona de enfriamiento	166 dm ³	4,982

El costo del refractario que se cambia es de 611,202 dólares.

El tiempo de paro es de 15 días programados, en los cuales el cambio de refractario toma 11 días de 3 turnos, considerando el tumbe del ladrillo dañado y la limpieza de la zona. Como el trabajo es especial, se efectúa generalmente con un contratista. El personal requerido para esta operación es de: 16 personas por turno (1 supervisor y 15 obreros especialistas). Los salarios son: Para el Supervisor de 15 dólares por hora y para los obreros de 7 dólares por hora.

El costo de mano de obra se calcula: para obreros especialistas = [7 dólares/hora][24 horas][11 días][15 personas] = 27,720 dólares; en el caso del supervisor, se calcula como: [1 persona/turno][3 turnos/día][11 días][120 dólares/turno] = 3,960 dólares; El costo total de salarios para los trabajadores que realizan el cambio de refractario es de 31,680 dólares.

Para que el personal realice el cambio de refractario es necesario enfriar el horno durante dos días, siendo requerimiento que al iniciarse el paro del horno, este se encuentre lo más vacío posible, con el propósito de facilitarles el trabajo. El vaciado del horno se realiza calcinando el material que se encuentra en su interior.

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

El enfriamiento del horno, aunque varía de una Planta a otra, debe realizarse tomando precauciones, tales como:

- El horno no debe enfriarse rápidamente con aire frío ni con agua.
- Se deben tener a disposición los datos o curvas de enfriamiento de los diferentes materiales refractarios instalados en el horno (provistos por el fabricante).
- La curva estándar de enfriamiento debe ajustarse en forma continua (elaborada para cada paro de horno y actualizada con los materiales refractarios utilizados).
- La rotación del horno está relacionada con la velocidad de enfriamiento, el movimiento de contracción del refractario en los anillos y el diámetro del horno.
- La costra que el material forma en el ladrillo no debe removerse por choque térmico o enfriamiento rápido.
- Una vez realizado el paro del horno y que se pueda caminar en el interior, cuando existen revestimientos fáciles de hidratar, debe cubrirse con aceite la superficie y no deben romperse los ladrillos, dejando superficies libres y rugosas.
- Si en el interior del horno se tienen revestimientos fáciles de hidratar, las compuertas del tiro o los registros hombre deben permanecer cerrados el mayor tiempo posible.

Con una producción nominal del horno de 8500 ton/día, en un horno moderno que utiliza como combustible un combustóleo que es aceite #6 API, que tiene un Poder Calorífico Neto de 9,000 kcal/kg, con un precio de compra de 1 peso/kg de combustóleo y un precio de transporte de 2 pesos por cada 80 km de viaje.

El Clinker requiere 750 kcal/kg para su calcinación, por lo que se puede calcular la cantidad de combustible empleado de la siguiente forma:

$$\text{Combustible} = (8,500,000 \text{ kg/día}) \times (750 \text{ kcal/kg}) = 6,375,000,000 \text{ kcal/día}$$

$$= \frac{6,375,000,000 \text{ kcal/día}}{9,000 \text{ kcal/día}} = 708,305 \text{ kg/día}$$

El consumo de combustible necesario para la producción indicada de Clinker, es de 708,305 kg/día, por lo que su costo, considerando que la Planta cementera se encuentra en un radio de 80 km de la Planta refinadora, y tomando como referencia un tipo de cambio de 9.25 pesos por dólar, será de:

$$\text{Costo} = (708,305 \text{ kg/día}) \times (0.324 \text{ dólares/kg})$$

$$= 229,491 \text{ dólares/día}$$

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

Manteniendo la combustión en el horno estable y sin picos, y la granulometría de la harina cruda constante, el requerimiento de combustible disminuye 40 kcal/kg, por lo que el consumo queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{Combustible} &= (8,500,000 \text{ kg/día}) \times (710 \text{ kcal/kg}) = 6,035,000,000 \text{ kcal/día} \\ &= \frac{6,035,000,000 \text{ kcal/día}}{9,000 \text{ kcal/día}} = 670,556 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

Y el costo de este combustible es de:

$$\begin{aligned} \text{Costo} &= (670,556 \text{ kg/día}) \times (0.324 \text{ dólares/kg}) \\ &= 217,446 \text{ dólares/día} \end{aligned}$$

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

Con el propósito de no dañar el ladrillo refractario durante el calentamiento del horno, este debe realizarse de manera gradual, para lo cual existen curvas de calentamiento. La velocidad de calentamiento recomendada es de 30°C/hora, durante las 48 horas que dura el calentamiento. Las curvas de calentamiento son de la siguiente forma:

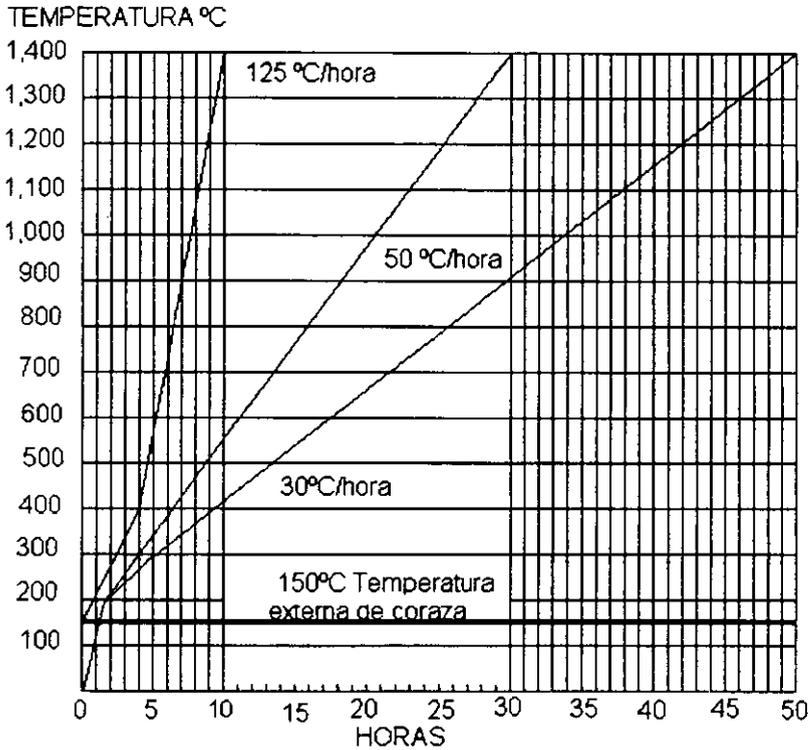


Figura 38: Curva de calentamiento típica de un horno.

Cuando el cambio de refractario, o bien, el paro no programado del horno se realice en poco tiempo, el horno no se enfría completamente, por lo que su calentamiento se puede efectuar más rápido, y se puede utilizar la curva de calentamiento de 50°C/hora y de 125°C/hora. Durante el calentamiento la temperatura externa de la coraza no debe rebasar los 150°C para evitar su expansión debido a la temperatura, lo que causaría la caída del recubrimiento.

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

El calentamiento del horno se efectúa basándose en un plan en el cual se relaciona el aumento de temperatura con la rotación del horno, para evitar deformaciones en el alineamiento de la coraza metálica:

	Temperatura de tabique en zona de calcinación	Rotación del horno
Inicio a 3 horas	De temperatura ambiente a 173°C	¼ de giro cada 30 min.
3 a 8 horas (en 5 horas)	De 173 a 300°C	¼ de giro cada 30 min.
8 a 20 horas (en 12 horas)	De 300 a 600°C	½ de giro cada 30 min.
20 a 30 horas (en 10 horas)	De 600 a 900°C	½ de giro cada 15 min.
30 a 40 horas (en 10 horas)	De 900 a 1,200°C	Revolución continua a baja velocidad
40 a 48 horas (en 8 horas)	De 1,200 a 1,400°C	Revolución normal

Para el calentamiento del horno, en este caso específico, se empleará como combustible Aceite Pesado No. 6 (API), comúnmente conocido como "Combustóleo".

Recordando que el Combustóleo tiene un poder calorífico (promedio) bruto de 10,000 kcal/kg y un poder calorífico neto de 9,000 kcal/kg. Tiene un Cp de 0.480 kcal/kg °C.

El costo del calentamiento gradual del horno utilizando la curva de calentamiento de 30°C/hora, y consumiendo exclusivamente combustóleo, se calcula, basándose en la experiencia, tomando como base un porcentaje del combustible utilizado durante la operación normal del horno, como se muestra en la tabla:

Tiempo	Combustible usado
1: Del inicio a 3 horas	4% del combustible total
2: De 3 a 8 horas	6% del combustible total
3: De 8 a 20 horas	10% del combustible total
4: De 20 a 30 horas	15% del combustible total
5: De 30 a 40 horas	50% del combustible total (se inicia la alimentación mínima)
6: De 40 a 48 horas	100% del combustible total (se inicia la producción de Clinker)

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

El combustible total empleado es de 670,556 kg/día, por lo que los valores quedan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} 1 &= (0.04) \times (670,556 \text{ kg/día}) \times (1 \text{ día}/24 \text{ horas}) \times (3 \text{ horas}) = 3,352 \text{ kg} \\ 2 &= (0.06) \times (670,556 \text{ kg/día}) \times (1 \text{ día}/24 \text{ horas}) \times (5 \text{ horas}) = 8,391 \text{ kg} \\ 3 &= (0.10) \times (670,556 \text{ kg/día}) \times (1 \text{ día}/24 \text{ horas}) \times (12 \text{ horas}) = 33,527 \text{ kg} \\ 4 &= (0.15) \times (670,556 \text{ kg/día}) \times (1 \text{ día}/24 \text{ horas}) \times (12 \text{ horas}) = 41,910 \text{ kg} \\ 5 &= (0.50) \times (670,556 \text{ kg/día}) \times (1 \text{ día}/24 \text{ horas}) \times (10 \text{ horas}) = 139,700 \text{ kg} \end{aligned}$$

No se incluye el costo del combustible utilizado durante las últimas 8 horas del calentamiento del horno, debido a que durante este período, el horno se encuentra en producción de Clinker.

Por lo que el costo del combustible empleado para el calentamiento del horno se obtiene:

$$\text{Costo} = 3 \frac{\text{pesos}}{\text{kg}} \times \sum_5^1 \text{combustible}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo} &= (3 \text{ pesos/kg}) \times (226,883 \text{ kg}) = 680,650 \text{ pesos} \\ &= (680,650 \text{ pesos}) \times (1 \text{ dólar}/9.25 \text{ pesos}) \\ &= 73,585 \text{ dólares} \end{aligned}$$

El costo del combustible empleado para el calentamiento del horno, después de un paro programado de 15 días, con un calentamiento gradual de 48 horas de duración y utilizando combustóleo es de 73,585 dólares.

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

Como el paro del horno se realizó programado, fue necesario que con anticipación a éste se almacenara Clinker en patio exterior, y durante el paro del horno usarlo para continuar con la producción normal de Cemento y atender la demanda del mercado.

Esto implica un costo de remanejo de Clinker, el cual, dependiendo de las características de diseño de la Planta, puede ser significativo en su impacto.

Durante el paro del horno, para continuar con la molienda de Cemento del silo de Clinker solo se puede utilizar el 85% de Clinker total y el 15% se deja como colchón para que cuando se inicie la producción de Clinker, este al caer dentro del silo no lo dañe con el impacto de la caída

Los costos totales directos generados por un paro programado de horno son lo suficientemente elevados como para tener en cuenta que un aumento del período de tiempo útil del refractario del horno es beneficioso para la economía de la Planta.

El manejo adecuado del equipo de trabajo, realizado por un equipo humano eficiente, calificado y bien capacitado sirve para que el ladrillo refractario tenga hasta un período de 4 meses más de vida útil, generado por un buen manejo de las condiciones internas del horno al mantener el proceso en condiciones estables, con lo que el período de trabajo se extiende de 8 a 12 meses continuos.

El análisis de la cantidad de paros efectuados se realiza a mediano plazo, el cual generalmente es en un período de 5 años, debido a que cuando se analiza de forma anual, el resultado es de 1 paro cada 8 meses por año y un paro cada 12 meses por año, por lo que no se puede observar un ahorro para la Planta al realizar un manejo de equipo adecuado; Cuando se realiza el análisis para un período de 5 años, se tienen 7.5 paros cada 8 meses en un período de 5 años y 5 paros cada 12 meses en un período de 5 años, por lo que el ahorro es de 2.5 paros en un período de 5 años.

Los costos de un paro programado del horno se pueden contar como: el costo del ladrillo refractario y del concreto refractario que se debe cambiar, el pago del equipo especializado que realizará el cambio del refractario, el costo del combustible utilizado cuando se realiza el calentamiento gradual del horno después de que se ha terminado de colocar el ladrillo y el remanejo de Clinker para continuar con la operación de molienda; todos estos costos dependen de la cantidad de anillos de refractario que se cambian en el paro del horno.

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

El valor del paro programado se calcula sumando todos los costos directos, con lo que se obtiene el valor de la inversión en material y mano de obra que se debe invertir durante el paro:

Concepto	Costo (en dólares)
Clinker no producido (utilidades)	5,100,000
Piezas de refractario	611,202
Combustible para calentar el horno	142,235
Mano de obra especializada	31,680
Remanejo de Clinker	357,500

Los costos indirectos son todos los costos que no están relacionados directamente con la operación de cambio de refractario y el paro del horno, pero que se ven afectados por esta operación.

Los costos indirectos son los costos más elevados, debido a que no pueden ser calculados en general, sino que son particulares para cada Planta y para cada paro. Dependen también de la tecnología instalada en la Planta, así como de la capacidad del equipo humano.

Entre los costos indirectos que se deben considerar se encuentran los siguientes:

- Los gastos de personal de Planta, tales como los operadores de horno y los trabajadores de todo el proceso desde la producción en la cantera, que debido al paro programado no pueden realizar su actividad normal; la forma de prevenirlo es programando anticipadamente actividades útiles a la Planta, tales como capacitaciones para algunos operadores, operaciones de mantenimiento en equipos auxiliares que se encuentren fuera de servicio por el paro del horno, etc.
- Se debe anticipar un paro programado mediante el almacenamiento de Clinker en patios exteriores, para que cuando no se produzca en el horno, se pueda continuar con la producción de Cemento, con el Clinker almacenado en los silos (generalmente se cuenta con 4 días de producción), y con el Clinker almacenado en patios; esta previsión tiene un costo extra debido a que es necesario un remanejo de material, así como un costo extra por trituración debido a que el Clinker almacenado en patios puede presentar compactación y humidificación.
- El costo de la molienda de Cemento aumenta también debido a que, por la calidad del Clinker utilizado, que ha estado en patio de almacenamiento sujeto a humedad ambiental y compactación por los transportes usados, se debe moler a un mayor blaine, para poder cumplir con los requerimientos del Cemento.
- El costo de producción de los Cementos mezclados aumenta, debido a que se hace necesario disminuir el porcentaje de puzolana adicionada, para poder cumplir con los requerimientos de calidad del Cemento.

Capítulo VII: Análisis de costos en un paro de horno.

- Puede aumentar en gran medida el pago de seguro social, debido al incremento en el riesgo de accidentes, causado por encontrarse la Planta en condiciones de trabajo no habituales, tales como el transporte de material de patio de almacenamiento, el mantenimiento de equipos auxiliares, etc. También por ser la Planta corresponsable con él o los contratistas trabajando en el interior de esta.
- Se debe generar y mantener un ambiente de trabajo agradable y aumentar la supervisión sobre condiciones y actos inseguros, para prevenir los accidentes que pueden surgir en un paro de horno.
- Se deben tomar en cuenta los costos de capacitación de personal, debido a que cuando se efectúa un paro de horno, es posible mandar a operadores a cursos.
- Cuando se tiene un paro de horno programado, se pueden realizar modificaciones al equipo, así como mejoras e implementaciones de equipo nuevo, debido a que se cuenta con el tiempo suficiente para realizar estos cambios sin afectar la operación del horno; estos cambios involucran una inversión fuerte de recursos, especialmente cuando se implementa tecnología de punta; estos cambios deben estar bien estudiados y estructurados, debido a que la implementación de un equipo tecnológicamente avanzado puede afectar la operación normal de la Planta al introducir un régimen de producción que los otros equipos no pueden sostener.

ANÁLISIS DE COSTOS EN CEMENTOS MEZCLADOS Y EN LA MOLIENDA DE CEMENTO.

Los costos de los materiales empleados en la fabricación de Cemento Portland, para este caso, se estiman en:

Material	Costo
Clinker	30 dólares/ton
Yeso	20 dólares/ton
Puzolana	1 dólar/ton

La dosificación para Cemento Portland normal, se hace de Clinker con Yeso en una proporción de: 95% Clinker y 5% Yeso. El costo de esta mezcla, en función del costo de los materiales empleados para la molienda se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Costo del Clinker} = 0.95 \times 30 \frac{\text{dólares}}{\text{Tonelada}} = 28.50 \frac{\text{Dólares}}{\text{Tonelada}}$$

$$\text{Costo del Yeso} = 0.05 \times 20 \frac{\text{Dólares}}{\text{Tonelada}} = 1 \frac{\text{Dólar}}{\text{Tonelada}}$$

Al sumar ambos componentes se obtiene el valor del Cemento normal, desde el punto de vista de la materia prima empleada. El valor obtenido es de 29.50 dólares/ton.

Si las características del Clinker permiten emplear un aditivo, se puede emplear Puzolana, material que no interviene considerablemente en la reacción de hidratación y en la generación de resistencia mecánica a la compresión, a corto plazo, pero aporta características especiales al Cemento, y por el lado económico permite disminuir el costo del Cemento, desde el punto de vista de la materia prima.

El Cemento mezclado, para este estudio, tiene una composición de: 82% Clinker, 13% Puzolana y 5% de Yeso.

Capítulo VIII: Análisis de costos en Cementos Mezclados y en la Molienda de Cemento.

El costo por tonelada de Cemento producido, tomando solo el costo de la materia prima empleada, para el Cemento mezclado, es de:

$$\begin{aligned}\text{Costo del Clinker} &= 0.82 \times 30 \frac{\text{Dólares}}{\text{Tonelada}} = 24.60 \frac{\text{Dólares}}{\text{Tonelada}} \\ \text{Costo de la Puzolana} &= 0.13 \times 1 \frac{\text{Dólar}}{\text{Tonelada}} = 0.13 \frac{\text{Dólares}}{\text{Tonelada}} \\ \text{Costo del Yeso} &= 0.05 \times 20 \frac{\text{Dólares}}{\text{Tonelada}} = 1.00 \frac{\text{Dólar}}{\text{Tonelada}}\end{aligned}$$

El costo del Cemento mezclado es de 25.73 dólares/ton. Este costo es inferior al costo del Cemento normal.

Si la harina cruda empleada en la elaboración del Clinker cumple con las características físicas y químicas requeridas, este Clinker puede mezclarse con una proporción mayor de Puzolana, con lo que el costo del Cemento por tonelada se reduce.

Cuando las condiciones del Clinker permiten disminuir su proporción en la mezcla sin afectar las características físicas y químicas del Cemento, se puede emplear una proporción de: 78% Clinker, 17% Puzolana y 5% Yeso, con lo que el costo del Cemento por tonelada es de:

$$\begin{aligned}\text{Costo del Clinker} &= 0.78 \times 30 \frac{\text{Dólares}}{\text{Tonelada}} = 23.40 \frac{\text{Dólares}}{\text{Tonelada}} \\ \text{Costo de la Puzolana} &= 0.17 \times 1 \frac{\text{Dólar}}{\text{Tonelada}} = 0.17 \frac{\text{Dólares}}{\text{Tonelada}} \\ \text{Costo del Yeso} &= 0.05 \times 20 \frac{\text{Dólares}}{\text{Tonelada}} = 1.00 \frac{\text{Dólar}}{\text{Tonelada}}\end{aligned}$$

El costo de esta nueva mezcla de Cemento es de 24.57 dólares/ton, con lo que el costo del Cemento mezclado con esta proporción es menor.

Capítulo VIII: Análisis de costos en Cementos Mezclados y en la Molienda de Cemento.

La producción nominal del horno es de 8,500 toneladas de Clinker por día, por lo que la producción de los diferentes Cementos se puede calcular de la siguiente forma:

$$\frac{8,500 \text{ Ton Clinker}}{0.95} = 8,947 \text{ Toneladas de Cemento Normal}$$
$$\frac{8,500 \text{ Ton Clinker}}{0.82} = 10,366 \text{ Toneladas de Cemento Mezclado (1)}$$
$$\frac{8,500 \text{ Ton Clinker}}{0.78} = 10,897 \text{ Toneladas de Cemento Mezclado (2)}$$

Utilizando el precio de cada uno de los Cementos, se puede obtener la utilidad en la producción de los diferentes Cementos mezclados, considerando como base solo el costo de las materias primas empleadas, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{Utilidad con el} & \quad - 29.50 \\ \text{Cemento mezclado (1)} & = \frac{25.73}{3.77 \text{ Dólares/Ton}} \\ & = (3.77 \text{ Dólares/Ton}) \times (10,366 \text{ Ton/día}) \\ & = 39,080 \text{ Dólares/día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Utilidad con el} & \quad - 29.50 \\ \text{Cemento mezclado (2)} & = \frac{24.57}{4.93 \text{ Dólares/Ton}} \\ & = (4.93 \text{ Dólares/Ton}) \times (10,897 \text{ Ton/día}) \\ & = 53,722 \text{ Dólares/día} \end{aligned}$$

La cantidad de aditivo que se puede adicionar al Cemento se encuentra limitada por las características del Clinker que se emplea, debido a que el Cemento mezclado debe cumplir con las características de generación de resistencia mecánica.

Un Clinker fabricado mediante la calcinación de una harina cruda en la que se utilizaron materias primas con un bajo contenido de cuarzo y que tiene un tamaño de partícula adecuado, es vital para elaborar un Cemento mezclado en el que la proporción de Puzolana sea lo más alta posible.

Capítulo VIII: Análisis de costos en Cementos Mezclados y en la Molienda de Cemento.

El costo de molienda del Cemento se calcula utilizando las toneladas de Cemento que se pueden obtener por hora a un determinado blaine (3,200 cm²/gr para un Cemento Normal). La demanda de energía eléctrica no varía, pero el consumo de energía eléctrica se puede disminuir al aumentar las toneladas de Cemento producidas.

La cantidad de finos que sale del separador depende de las características del Clinker que se alimenta al molino; si el Clinker alimentado al molino tiene un índice de molturabilidad bajo, el material es difícil de moler y el retorno del separados tendrá una mayor cantidad de gruesos, por lo que la alimentación al molino disminuirá, así como la cantidad de finos obtenidos, aumentando el costo de la molienda.

Si el índice de molturabilidad del Clinker es alto, en el molino se obtendrá un producto con más finos, por lo que aumentará la cantidad de finos extraídos del separador, con lo que el retorno de material será menor y la producción de Cemento se incrementará. El índice de molturabilidad del Clinker depende directamente de las propiedades de la harina cruda alimentada al horno, de las condiciones de calcinación y de las condiciones de enfriamiento del Clinker. El control de las variables de operación en todo el proceso asegura que el Clinker tenga las características requeridas (físicas y químicas) para la elaboración de Cemento.

Para un molino con una producción de 140 ton/hr de Cemento con un Blaine de 3,200 cm²/gr y una demanda de 5600 kWh, se tiene un gasto en energía eléctrica calculado de:

$$\text{Consumo} = \frac{5,600 \text{ kWh}}{140 \text{ Toneladas de Cemento}} = 40 \text{ kWh/Ton Cemento}$$

Cuando se consigue que la producción del Cemento sea de 150 ton/hr, con el mismo Blaine, y, dado que la demanda de energía eléctrica del molino continua igual, el consumo de energía es:

$$\text{Consumo} = \frac{5,600 \text{ kWh}}{150 \text{ Toneladas de Cemento}} = 37.3 \text{ kWh/Ton Cemento}$$

Esto muestra que al aumentar la producción de Cemento en el molino en 10 toneladas/hr, el consumo de energía eléctrica disminuye en 2.7 kWh/ton de Cemento, y esto solo se logra cuando las condiciones de operación se encuentran bajo control y las características físicas y químicas de la harina cruda empleada en la elaboración del Clinker se mantienen bajo los parámetros establecidos.

Capítulo VIII: Análisis de costos en Cementos Mezclados y en la Molienda de Cemento.

El siguiente diagrama muestra el desarrollo de la operación de molienda de Cemento con un molino de bolas:

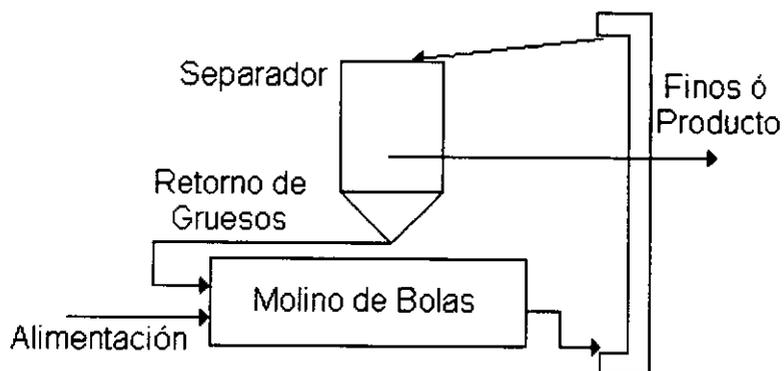


Figura 39: Diagrama típico de molienda de Cemento, con molino de bolas, en circuito cerrado.

Conclusiones

CONCLUSIONES.

La industria cementera debe tener una tecnología siempre de punta, en virtud de que su producto, el "Cemento Portland" es la base para la construcción de las grandes obras arquitectónicas actuales, y de los enormes conglomerados urbanísticos, para los cuales los arquitectos y constructores solicitan materiales con requerimientos cada vez más estrictos.

La característica que debe cumplir el Cemento ya no es exclusivamente su desarrollo de resistencia mecánica, en sus modalidades de resistencia a la compresión, a la tensión, a la torsión, a la abrasión, etc., sino que actualmente también debe tener la característica intrínseca de que cuando su aplicación se hace en forma de pasta de Cemento, mortero o concreto, debe soportar en estado sano (sin grietas y fracturaciones) el ataque del medio ambiente, el cual cada día es más agresivo. A esta característica se le denomina "durabilidad".

También debe tenerse en cuenta que la permanencia en el mercado no la da únicamente la calidad del producto, sino también el margen de utilidad que se obtenga. La competitividad y liderazgo en el mercado implica mantenerse en los primeros lugares desde el punto de vista de la tecnología aplicada en el proceso de elaboración del Cemento, su mercadotecnia y el servicio al cliente.

La base para la producción de Cemento Portland es el Clinker correspondiente a su Tipo. El Clinker constituye aproximadamente un 94 a 95% en peso, de lo que se denomina un Cemento Portland Normal y un 78 a 85 % en peso, de un Cemento Portland Mezclado; por lo que el costo de la no calidad y el costo operativo con el que se elabore el Clinker impactan directamente en la imagen de calidad con que se presenta el producto al mercado y en las utilidades económicas que se obtengan.

El fundamento para producir un Clinker de calidad es el tener un pleno conocimiento geológico y mineralógico de las materias primas empleadas para su elaboración, de las características físicas y químicas de la harina cruda utilizada, de la actualización tecnológica del equipo empleado y las prácticas operativas con que se produce.

Prácticamente las características físicas, químicas y mineralógicas de la harina cruda van a definir:

- ♦ Producción máxima de Clinker que pueda obtenerse en el horno, en condiciones de estabilidad operativa, igualando o superando la producción nominal del equipo.
- ♦ Continuidad operativa del sistema de calcinación, lográndose mayor tiempo de vida operativa del equipo.
- ♦ Reducción en la cantidad de calor requerido para la formación del Clinker, en otras palabras, la cantidad de combustible que se puede ahorrar por kilogramo de Clinker.

Conclusiones

- ◆ Estabilidad en los requerimientos químicos del Clinker, lo cual implica una estabilidad química en las características del Cemento.
- ◆ Estabilidad en las características mineralógicas del Clinker, significando estabilidad en el desarrollo de resistencia mecánica del Cemento.
- ◆ Máxima cantidad de componentes hidráulicos (C_3S Y C_2S) en el Clinker, denotando:
 - Emplear un mayor porcentaje de materiales puzolánicos para la producción de Cemento Portland Mezclado, lo cual reduce el costo de producción del Cemento.
 - Reducir la finura y blaine en el Cemento obteniendo el mismo desarrollo de resistencia mecánica, con lo cual se logra reducir el consumo eléctrico en el sistema de molienda de Cemento al aumentar las toneladas por hora.
- ◆ Optimizar la operación del enfriador de Clinker, lográndose:
 - Mayor recuperación de calor en el sistema para aprovechamiento en la combustión en el horno y calcinador, reduciéndose por lo tanto el consumo de combustible por tonelada de Clinker.
 - Enfriamiento apropiado del Clinker para lograr optimizar la reactividad de los cristales hidráulicos y la molturabilidad del mismo.
- ◆ Reducción en los costos de mantenimiento en el sistema de calcinación.
- ◆ Reducción en las emisiones contaminantes al medio ambiente.

Los estudios llevados a cabo en la realización de esta tesis van dirigidos hacia el impacto económico que tienen las características físicas, químicas y mineralógicas de la harina cruda en la fabricación de "Clinker Portland", y el impacto, también económico en la producción de "Cemento Portland".

Los alcances económicos de lograr optimizar el tamaño y la distribución granulométrica de las partículas que forman la harina cruda, son los siguientes:

- ◆ Considerando que el costo de producción del Clinker es de 30 dólares/ton y el costo de venta del Cemento en el mercado es de 100 dólares/ton, y se hace el cálculo para una Planta que cuenta con un horno con una capacidad nominal de producción de Clinker de 8,500 ton/día, la producción de Cemento Portland Normal sería de $8,500/0.95 = 8,947$ ton/día. Las utilidades brutas de la Planta, considerando únicamente este renglón de análisis serían de 18,788,700 dólares/mes.

Conclusiones

- ◆ Manteniendo una continuidad operativa se puede disminuir el número de paros programados para mantenimiento. Si la continuidad operativa del horno se logra incrementar de 8 a 12 meses, a mediano plazo (estimando 5 años) en lugar de tener 7.5 paros de horno, se tendrían 5 paros, lo que genera un ahorro económico en consumo de combustible para calentamientos de arranque, mano de obra especializada, remanaje de Clinker y, principalmente, en el costo del ladrillo refractario. Calculando que el costo directo de cada paro de horno para mantenimiento programado es de 1,142,617 dólares, y si la reducción de paros es de 2.5 por cada 5 años, implica un ahorro de 2,856,543 dólares en ese periodo, equivalente a un ahorro anual de 571,310 dólares.
- ◆ Si para el proceso de calcinación del horno en cuestión se emplea como combustible aceite pesado # 6 API, denominado combustóleo, y el consumo calorífico es de 750 Kcal/kg de Clinker (equivalente a 83.33 Kg de combustóleo/ton de Clinker), representando un consumo de combustóleo por día, de: 708,305 kg. Estimando un precio de 0.324 dólares/kg de combustóleo puesto en Planta, el costo del combustible consumido por día es de 229,491 dólares.

Con la optimización de tamaño de partículas en la harina cruda se puede lograr una gran estabilidad operativa en el horno, significando el no tener picos de requerimiento calorífico y una mejor recuperación de calor desde el enfriador de Clinker al operar con flujos estables, con la cual se logra una reducción aproximadamente de 40 Kcal/kg de Clinker, lo cual representa un ahorro económico de 12,240 dólares/día, dándose un ahorro mensual de 367,200 dólares.

- ◆ Cuando se añade un material puzolánico al Clinker para producir un Cemento Portland Mezclado, se logran básicamente tres propósitos: a).- Ofrecer al mercado un Cemento con características especiales. b).- Aumentar la producción de Cemento conservando la misma capacidad productiva del sistema de calcinación. c).- Incrementar las utilidades por tonelada de Cemento, debido al bajo costo del aditivo.
 - Las características especiales que ofrece un Cemento puzolánico dan al fabricante una ventaja competitiva en el mercado, en virtud de que el Cemento puzolánico presenta mejores características que un Cemento Portland Normal, tales como: Mayor desarrollo de resistencia a largo plazo, mayor resistencia al ataque de agentes agresivos (CO_3^- , Cl^- , SO_4^- , etc), menor desarrollo de calor de hidratación, mayor impermeabilidad, etc., y todo ello en conjunto ofrece un Cemento que tendrá una mayor durabilidad en estado sano, lo cual es uno de los más importantes requerimientos de los constructores en los países altamente industrializados.

Conclusiones

- ◆ En función de la cantidad de aditivo puzolánico que se adicione será el incremento de producción de Cemento que se tenga. La cantidad de aditivo dependerá fundamentalmente de las características químicas y mineralógicas del Clinker y de la reactividad puzolánica que tenga el aditivo, y como ello es particular de cada Planta, para el desarrollo de esta tesis se toma que la adición promedio de aditivo es de 15%, por lo que la producción de Cemento en la Planta específica de esta tesis, es: Cemento Portland Ordinario: $8,500/0.95 = 8,947$ ton/día y de Cemento Portland Mezclado: $8,500/0.80 = 10,625$ ton/día. El incremento de producción es: 1,678 ton/día, lo cual equivale a un incremento en la producción de Cemento, de 18.75 %.
- ◆ Tomando un costo promedio para los diferentes materiales, de: Clinker (costo de producción): 30 dólares/ton, Yeso: 20 dólares/ton y aditivo puzolánico: 1 dólar/ton. Las proporciones para un Cemento Portland Normal son de 95% de Clinker y 5% de Yeso, por lo que su costo, basado en sus materiales es de: 29.5 dólares/ton. En la Planta en cuestión se adiciona normalmente 13% de material puzolánico, por lo que su costo, basado en sus materiales, es de 25.73 dólares/ton. La utilidad extra obtenida al producir Cemento mezclado es de 3.77 dólares/ton.
Optimizando las características físicas (tamaño de partículas) de la harina cruda, se optimizarán las propiedades del Clinker y es posible lograr una adición de 17% de material puzolánico, conservando las mismas características de desarrollo de resistencia mecánica que presentaba el Cemento mezclado que contenía 13% de material puzolánico.
El costo del Cemento mezclado con 17% de material puzolánico, vadazo en materiales, es de 24.57 dólares/ton, por lo que la utilidad extra que se obtiene sobre el Cemento mezclado con 13% de material puzolánico, es de 1.16 dólares/ton.
Con una adición de 13% de material puzolánico, la Planta puede producir mensualmente de Cemento mezclado: $(8,500/0.82) \times 30 = 310,980$ ton/mes.
Con la adición de 17%, se pueden producir: $(8,500/.78) \times 30 = 326,910$ ton/mes.
Por un lado se logra un incremento de producción de Cemento de: 15,930 ton/mes. Esto representa una utilidad extra, mensualmente de:
 $15,930 \text{ ton/mes} \times 24.57 \text{ dólares/ton} = 391,400$ dólares.
Por otro lado se obtiene una utilidad bruta global, mensualmente de:
 $(326,910 \text{ ton/mes}) (1.16 \text{ dólares/ton}) = 455,776$ dólares.
- ◆ Al tener flujo de Clinker estable en el horno, en el enfriador se tendrá una cama para enfriamiento también estable por lo que se logrará el enfriamiento rápido de Clinker y con ello mantener los cristales de C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF con características de alta reactividad y alta molturabilidad.
 - La alta reactividad de los cristales permitirá una mayor adición de material puzolánico, o bien, una menor finura y blaine en el Cemento respectivo, conservando las características de desarrollo de resistencia.
 - Una mayor molturabilidad significa una menor dureza del material, por lo tanto, una mayor facilidad de molienda. Prácticamente, al lograr el grado óptimo de molturabilidad en el Clinker, se ha obtenido un aumento de producción en los

Conclusiones

molinos de Cemento, moliendo Cemento mezclado, de 7%, con lo que en un sistema de molienda con 5,600 kW, produciendo normalmente 140 ton de Cemento/hora, tiene un consumo de energía eléctrica de 40 kWh/ton de Cemento.

Con el incremento molturabilidad en el Clinker, es sistema de molienda produce 150 ton de Cemento/hora, teniéndose un consumo de energía eléctrica de: 37.3 kWh/ton de Cemento.

El ahorro en energía eléctrica es de 2.70 kWh/ton de Cemento, significando un ahorro mensual de:

$(326,910 \text{ ton de Cemento/mes}) (2.70 \text{ kWh/ton}) = 882,657 \text{ Kwh}$.

Como en cada país y cada región tiene diferente tarifa la energía eléctrica, tanto para la Demanda como para el Consumo, el ahorro lo dejo en Kwh.

- ◆ En la actualidad toda empresa debe tener la conciencia y la política ecologista de participar en el "Programa Ecológico Mundial, en las Iniciativas de Convenciones Internacionales Ambientales y en los Protocolos", teniendo como fundamento: "Recuperación de Materia y Energía, Seguridad Industrial, Ecoeficiencia y un Desarrollo Sostenible"

Desarrollo sostenible: "El desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad para que las futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades".

Como he comentado, al optimizar las características fisicoquímicas de la harina cruda se tendrá una operación estable y con continuidad en el sistema de calcinación por lo que se tendrá emisiones controladas y dentro de los reglamentos Nacionales e Internacionales, de: NOx, SOx, CO, Partículas sólidas, etc.

Se optimizará la operación en el enfriador de Clinker lográndose una mejor recuperación de calor, el cual no irá a la atmósfera.

Por el lado de Seguridad Industrial, habrá mucho menor riesgos al tener la una operación continua, ya que con ello se evitan los mantenimientos emergentes y los bloqueos en los ciclones del precalentador.

Los conocimientos técnicos adquiridos a través de los estudios Universitarios se vuelven realistas cuando de manera inteligente se aplican de manera práctica en una industria, colaborando al avance tecnológico, no solo en el ámbito nacional, sino internacional.

Bibliografía.

BIBLIOGRAFÍA.

- The Cement Plant Operations Handbook.
2ª edición; julio 1998.
- The Design and Manufacture of Large Vertical Roller Mills.
J.F. Becker, J.W. Sweeney; 1992.
- Modernos Sistemas de Molinos para Molienda de Materia Cruda y Clinker.
N. Patzelt; Krupp Polysius; 1990.
- Anual Book of ASTM Standards, Volume 04.01, Cement, Lyne, Gypsum.
ASTM, Philadelphia, U.S.A.; 1996.
- La Química de los Cementos, Tomos 1 y 2.
Taylor, H.F.W.; Ed. Urmo, España; 1971.
- Manuales de Productos Refractarios
- Manual Tecnológico del Cemento. Capítulo 23: "Revestimiento Interno del Horno".
Duda, Walter H. Editores Técnicos Asociados. Barcelona 1997.
- Influence of Raw Mix Heterogeneity on Ease of Combination and Clinker Strength Potential.
Graeme MOIR, Blue Circle Industries, Technical Center, Greenhithe, Kent.
- A mathematical model for the prediction of cement strength.
Tsibilis, S. & Parissakis, G. Cement and concrete research; Volume 25 1995.

Glosario.

GLOSARIO.

Aditivo: Material que se mezcla con el Clinker y el Yeso para disminuir los costos de producción y conferirle algunas propiedades diferentes al Cemento producido.

Alita: Es el nombre de la principal fase del Cemento Portland. Está compuesta por una molécula de óxido de silicio combinada con 3 moléculas de óxido de calcio.

Apilamiento Chevron: El apilador corre sobre una sola línea, por lo que apila el material en capas una sobre la otra hasta que la pila alcanza la altura de diseño.

Apilamiento Windrow: El apilador se desplaza en todas las direcciones, por lo que apila el material en pequeñas pilas superpuestas.

Ayuda de molienda: Sustancias químicas empleadas para aumentar la producción de los molinos.

Belita: Es la fase hidráulica del Cemento que genera resistencia mecánica en edades tardías. Está compuesta por una molécula de óxido de silicio combinada con dos de óxido de calcio.

Blaine: Es la medida de la superficie específica, expresada en cm^2/gr de material.

Celita: Es la fase del Cemento Portland que genera calor durante la hidratación. Esta conformada por una molécula de óxido de aluminio y 3 de óxido de calcio.

Cemento Portland: Es un pegamento de tipo hidráulico empleado para unir fragmentos detríticos (arenas o gravas) de ciertos tipos de rocas. Se obtiene de materiales calizos y arcillosos calcinados.

Ciclón: Equipo de separación del precalentador; funciona por disminución de la velocidad de la corriente de gases, con lo que las partículas de material suspendido se precipitan y son recogidas en el fondo; no tiene partes móviles.

Clinker: Es el material obtenido en el horno por proceso de calcinación; Son nódulos de 3 a 4 cm de tamaño, de color gris oscuro cuando se enfrían. Es el principal componente del Cemento Portland.

Dosificación: Medir una cantidad determinada de un material para establecer una mezcla.

Epitaxial: Es el crecimiento de un cristal sobre otro.

Etringita: Es un compuesto generado durante la hidratación del Cemento Portland por la fase denominada como Celita y por el Yeso.

Glosario.

Eutéctico: Mezcla de dos componentes que permite disminuir el punto de fusión a una temperatura menor que la de los dos componentes por separado.

Expansión volumétrica: Aumento en el volumen del concreto que ocasiona fracturas en la estructura.

Factor Cal de Saturación: Es una relación empleada en la industria del Cemento para determinar las cantidades de los principales óxidos presentes en la mezcla y poder predecir la presencia de las Fases del Clinker.

Felita: Esta fase del Cemento Portland contribuye mínimamente a la generación de resistencia mecánica y a la generación de calor. Esta compuesta por 1 molécula de óxido de aluminio, 1 de óxido de fierro y 4 de óxido de calcio.

Finura: Es la medida del tamaño de las partículas molidas, generalmente expresada en un porcentaje, es decir, la cantidad de material que tiene un tamaño límite o menor al expresado.

Fraguado: Es la pérdida de movilidad que presenta el Cemento Portland a causa de la hidratación.

Harina cruda: Es el material dosificado que se alimenta al horno; está compuesto por los óxidos de silicio, aluminio y fierro y del carbonato de calcio.

Índice de molturabilidad: Es la medida de la dureza de un mineral y su oposición a ser triturado ó molido.

Método de sección pulida: Procedimiento de laboratorio empleado en la industria del Cemento para determinar la presencia de las fases en el producto.

Metrología: Estudio de la medición de las magnitudes físicas fundamentales (longitud, masa y tiempo) y de sus derivadas. En la industria del Cemento, se aplica a la obtención de los datos relacionados con la operación del horno, para establecer un perfil de trabajo.

Módulo de Alúmina Fierro: Ecuación empírica que relaciona la presencia de un eutéctico (relación de óxido de aluminio y óxido de fierro), con la que se determina la viscosidad de la fase líquida.

Módulo de Silice: Ecuación empírica empleada en la Industria del Cemento para predecir la cantidad de Fase líquida formada con relación a la Fase sólida presente.

Nichos de Belita: Aglomeraciones de esferas de Belita sobre los cristales de Alita.

Nódulo: Aglomeración compacta de material de forma esférica.

Glosario.

Pérdidas por ignición: es el material (idealmente agua y CO₂) que se desprende de la harina cruda cuando se calcina.

Periclasa: Nombre que recibe el mineral de óxido de magnesio.

Remanejo de Clinker: Es el almacenamiento de Clinker en un lugar fuera de la línea de producción.

Residuo insoluble: Es el material inerte que forma parte del Cemento Portland, tal como el cuarzo que puede contener la materia prima.

VTI: Ventilador de Tiro Inducido.