



**Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química**

EFFECTO DEL CLINKER REDUCIDO EN EL CEMENTO PORTLAND TIPO I

Juan Carlos Chavarría Moreno

Asesorado por Lic. En Química Luis Alberto Velásquez Coronado

Guatemala, marzo de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EFFECTO DE CLINKER REDUCIDO EN EL CEMENTO PORTLAND TIPO I

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA POR

JUAN CARLOS CHAVARRÍA MORENO

ASESORADO POR LIC. EN QUÍMICA LUIS ALBERTO VELÁSQUEZ
CORONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 2004

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA**



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing, Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Inga. Rosa María Girón
EXAMINADOR	Ing. Julio Alberto Rivera Palacios
EXAMINADOR	Ing. Eduardo Calderón
SECRETARIO	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EFFECTO DEL *CLINKER* REDUCIDO EN EL CEMENTO PORTLAND TIPO I

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 22 de enero de 2003.

Juan Carlos Chavarría Moreno

DEDICATORIA

A Dios: Padre, maestro y amigo.

A mis padres: Rodolfo Antonio Chavarría Méndez, Emilia Ortega de Chavarría, gracias por su amor y enseñanzas.

A mi adorada madrecita: Victoria del Rosario Moreno de Chavarría (Q.E.P.D.) gracias.

A mis hermanos: Rodolfo Estuardo Chavarría Moreno y Carmen Lucia Chavarría Ortega por su apoyo y cariño.

A mis abuelos: Marco Aurelio Chavarría Méndez (Q.E.P.D.) y Berta Aída Méndez de Chavarría (Q.E.P.D.) gracias por enseñarme el camino.

A toda mi gran y hermosa familia por el apoyo, comprensión y cariño.

A mis amigos: gracias por su apoyo y amistad.

AGRADECIMIENTOS

A Lic. en Química Luis Alberto Velásquez Coronado
Superintendente de Control de Calidad, Cementos Progreso, S.A.

A mis compañeros de Control Central por su apoyo e invaluable ayuda

A Ing. Emilio Beltranena Matheu
Gerente de Centro Tecnológico, Cementos Progreso, S.A.

A Sr. Mario de Jesús Sierra López
Supervisor de Calidad y Calibración de Centro Tecnológico, Cementos Progreso, S.A.

A Lic. en Química Sergio Eduardo Santos Tejeda

Al personal de
Laboratorio de Control de Calidad de Plantas San Miguel y La Pedrera, así como de
Centro Tecnológico, Cementos Progreso, S.A.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
GLOSARIO	VI
RESUMEN	VII
OBJETIVOS	VIII
HIPÓTESIS	IX
INTRODUCCIÓN	X
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Cemento	1
1.1.1 Yeso	1
1.1.2 <i>Clinker</i>	1
1.1.2.1 Caliza	2
1.1.2.2 Arcilla	2
1.1.2.3 Composición mineralógica del <i>clinker</i>	2
1.1.2.4 Proceso de <i>clinkerización</i>	3
1.1.2.5 <i>Clinker</i> reducido	6
1.2 Requerimientos de calidad en cemento tipo I	8
2. METODOLOGÍA	10
2.1 Materiales	10
2.1.1 Determinación de la escala de color de clinker reducido	10
2.2 Preparación de las muestras	10
2.2.1 Trituración y reducción de tamaño de partícula	11
2.2.2 Tamizaje	11
2.3 Fabricación de cemento	11
2.3.1 Determinación del porcentaje de yeso óptimo en la prueba	11
2.3.2 Preparación de las mezclas <i>clinker/yeso</i>	11
2.3.3 Molienda	12
2.4 Evaluación de las muestras de cemento elaboradas	12
3. RESULTADOS	14

DISCUSIÓN DE RESULTADOS	16
CONCLUSIONES	22
RECOMENDACIONES	23
BIBLIOGRAFÍA	24
APÉNDICE	26

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

1.	Composición mineralógica del <i>clinker</i>	3
2.	Etapas en el proceso de <i>clinkerización</i>	5
3.	SO ₃ en muestras de <i>clinker</i>	34
4.	LSF en muestras de <i>clinker</i>	34
5.	C3S en muestras de <i>clinker</i>	33
6.	C2S en muestras de <i>clinker</i>	33
7.	C3A en muestras de <i>clinker</i>	35
8.	C4AF en muestras de <i>clinker</i>	35
9.	C2S en cemento fabricado	36
10.	<i>Blaine</i> en cemento fabricado	36
11.	CaO en cemento fabricado	37
12.	Resistencia a 1 día en cemento fabricado	37
13.	Resistencia a 2 días en cemento fabricado	38
14.	Resistencia a 7 días en cemento fabricado	38
15.	Resistencia a 285 días en cemento fabricado	39
16.	Tiempo de fraguado en cemento fabricado	39
17.	Expansión en cemento fabricado	40
18.	Molturabilidad del <i>clinker</i>	40
19.	Gráfica representativa de la variación de color en <i>clinker</i>	41
20.	Gráfica de barrido espectrometría por difracción del <i>clinker</i>	42
21.	Diagrama de proceso	44

22.	Vista estudio de microscopía del <i>clinker</i> reducido	45
23.	Vista estudio de microscopía del <i>clinker</i> reducido	46
24	Vista estudio de microscopía del <i>clinker</i> reducido	46
25	Datos de análisis de molturabilidad cemento con distintas proporciones de <i>clinker</i> café	14
26	Datos de análisis de resistencia cemento con distintas proporciones de <i>clinker</i> café	15
27	Datos de análisis tiempo de fraguado y expansión cemento con distintas proporciones de <i>clinker</i> café	15

TABLAS

I	Especificaciones del equipo utilizado	25
II	Especificaciones del equipo utilizado	25
III	Datos análisis químico arcillas y caliza	26
IV	Pureza yeso utilizado en el ensayo	26
V	Datos análisis de <i>clinker</i>	27
VI	Datos análisis de <i>clinker</i>	27
VII	Requerimientos en cemento tipo I	28
VIII	Datos análisis cemento	29
IX	Datos análisis cemento	29
X	Datos análisis cemento	30
XI	Datos análisis cemento	30
XII	Datos prueba molturabilidad	31
XIII	Datos análisis colorimetría mezclas de <i>clinker</i>	31
XIV	Yeso óptimo en cemento	32

LISTA DE SÍMBOLOS

CaO	Óxido de calcio
SiO₂	Óxido de silicio
Al₂O₃	Óxido de aluminio
Fe₂O₃	Óxido de hierro
MgO	Óxido de magnesio
K₂O	Óxido de potasio
Na₂O	Óxido de sodio
C₃S	Alita
C₂S	Belita
C₃A	Aluminato tricálcico
C₄AF	Ferrita
SO₃	Óxido de azufre
Fc	Foco de calor
PSI	Pounds square inca
PF	Pérdida al fuego
RI	Residuo insoluble
g	Gramo
Kg	Kilogramo
Nm	Nanómetro

GLOSARIO

ASTM	American Society for Testing and Materials.
Arcilla	Material sedimentario compuesto principalmente por silicatos de aluminio.
Blaine	Medida de la permeabilidad del cemento expresado como el área ocupada por un centímetro de material.
Cal libre	Se le llama al óxido de calcio libre sin reaccionar que permanece en el <i>clinker</i> .
Clinker	Material con propiedades hidráulicas compuesto principalmente por óxidos de sílice que endurece al contacto con el agua.
Finura	Fracción de material que logra pasar por un tamiz determinado.
Fraguado	Se le llama a la acción de endurecimiento del cemento.
Molturabilidad	Medida que indica la facilidad de molienda de un material.
Álcalis	Nombre genérico con que se nombran los óxidos de potasio y sodio.
Sinterización	Llamada también <i>clinkerización</i> , grupo de reacciones en estado sólido y líquido producidas mediante la calcinación temperaturas de 1450 °C de una mezcla de minerales naturales.

RESUMEN

La producción de *clinker* para cemento Portland a nivel industrial ocurre por medio de la calcinación de una mezcla de piedra caliza y arcillas en hornos rotatorios, el proceso transcurre en una atmósfera oxidante.

En ocasiones durante el proceso de calcinación de las materias primas aparecen condiciones reductoras, ya sea locales o parciales lo cual conlleva la alteración del color original del *clinker*, presentando el mismo una coloración amarillenta-café al cual llamaremos *clinker* reducido. El propósito del presente trabajo es evaluar los posibles efectos que pueda tener el *clinker* reducido en la calidad del cemento.

Para averiguarlos se fabricarán muestras de cemento a nivel de laboratorio variando las proporciones de *clinker* reducido y a la vez manteniendo la cantidad de yeso adicionada constante; la prueba se realizó bajo condiciones controladas cumpliendo los requerimientos de la norma ASTM C – 150 .

A las muestras de cemento fabricadas para evaluar la calidad obtenida se les efectuaron distintas pruebas, tanto físicas como químicas tomando como referencia de comparación los límites establecidos por la norma antes mencionada.

OBJETIVOS

Generales

1. Establecer el efecto que produce el *clinker* reducido en la calidad del cemento tipo I.
2. Relacionar los porcentajes de clinker reducido con respecto a los efectos que se pudieran apreciar en el cemento.

Específicos

1. Establecer el efecto del *clinker* reducido en las resistencias a la compresión.
2. Establecer el efecto del *clinker* reducido en los tiempos de fraguado en el cemento.
3. Establecer el efecto del *clinker* reducido en la expansión del cemento.

HIPÓTESIS

- El *clinker* reducido provoca una reducción en las resistencias a la compresión.
- El *clinker* reducido produce una alteración en el tiempo de fraguado del cemento.
- El *clinker* reducido produce una alteración en la expansión del cemento.

INTRODUCCIÓN

El cemento es un conjunto de sustancias con propiedades adhesivas con la capacidad de unir masas de materiales sólidas en porciones compactas, reaccionan con el agua y el producto de esta reacción es insoluble en la misma. A lo largo del tiempo se han desarrollado varios tipos de cemento, los cuales han variado de acuerdo al avance de las investigaciones, a las materias primas utilizadas, así como a los requerimientos en la construcción.

El cemento tipo I se obtiene cuando se muele conjuntamente *clinker* de cemento Portland con 4 ó 5 % de yeso; la calidad del mismo es regulada por medio de la norma ASTM C-150, la cual se utilizó para controlar las condiciones y la calidad del cemento en la prueba.

El *clinker* reducido es una forma no deseada de *clinker*, la cual presenta una coloración café-amarillenta en el cuerpo del mismo y se produce con la aparición de condiciones reductoras, ya sea locales o parciales en los hornos. Con la aparición del *clinker* reducido es importante investigar las posibles consecuencias en el cemento, sus implicaciones y posible impacto económico en el proceso de *clinkerización*; en lo que a calidad se refiere se realizarán distintas pruebas, tanto al *clinker* reducido como al cemento fabricado con el mismo, para poder llegar así a determinar el efecto que tiene sobre la calidad de cemento. Para la realización de la prueba se fabricará cemento tipo I a nivel de laboratorio cumpliendo con las normas antes mencionadas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Cemento

El cemento tipo I es el cemento objeto de este estudio, es un material con propiedades adhesivas capaz de unir masas sólidas en porciones compactas (6-12), reacciona con agua y el producto de esta reacción es insoluble en la misma. El cemento Portland tipo I se obtiene cuando se muele conjuntamente el *clinker* de cemento Portland con un 4 a 5 % de yeso.

1.1.1 Yeso

El yeso cuyo componente principal es el sulfato de calcio, presente en forma dihidratada, actúa en la mezcla de cemento sólo como un retardador del fraguado, es aquí donde radica su importancia, ya que en exceso podría producir un fraguado falso, mientras que la carencia del mismo produciría un fraguado instantáneo. En la sección apéndice en la tabla IV se podrá encontrar la composición química de la muestra de yeso utilizada en la prueba.

1.1.2 *Clinker*

El *clinker* es el principal constituyente del cemento Portland tipo I y a su vez los principales constituyentes del *clinker* son ortosilicatos de calcio (2-201 Trad Libre), los cuales constituyen el 80 % de éste en tanto los aluminatos y aluminoferritas forman el llamado material intersticial que representa el 20 % restante (32-202 Trad Libre), el cual juega un papel importante en el proceso de *clinkerización* y en las reacciones hidráulicas durante la utilización del cemento.

El *Clinker* se prepara mediante la incineración de una mezcla de minerales ricos en carbonato de calcio, aluminatos, silicatos y otros minerales presentes en menor cantidad.

1.1.2.1 Caliza

El mineral calcáreo es piedra caliza de alto grado de pureza, la cual proporciona el carbonato de calcio así como otros minerales que intervienen en el proceso; su utilización se debe a su conveniencia económicamente hablando, su fácil manejo, almacenamiento y composición química adecuada.

1.1.2.2 Arcillas

Los silicatos y aluminatos los proporcionan las arcillas, las cuales son minerales que poseen un alto porcentaje de sílice y aluminio en su composición. En el apéndice, en la tabla III, se ilustra la composición química de las arcillas y piedra caliza.

1.1.2.3 Composición mineralógica del *clinker*

El *clinker* en su composición mineralógica cuenta con compuestos alcalinos y compuestos ácidos los cuales se encuentran presentes en distintas proporciones (ver esquema a continuación), los cuales son pilares fundamentales para la posterior formación de alita, belita, aluminato y ferrita los cuales son los principales responsables de las propiedades hidráulicas del cemento.

Figura 1. Composición mineralógica del clinker

Compuesto alcalino	Compuesto ácido	%
CaO	-	59-67
-	SiO ₂	16-26
-	Al ₂ O ₃	4-8
-	Fe ₂ O ₃	2-5

Fuente: Holderbank. **Simulador de Horno Manual del Usuario**. Pág 40.39

1.1.2.4 Proceso de *clinkerización*

El *clinker* para cemento tipo I se obtiene llevando a temperatura de 1450 °C una mezcla de minerales calcáreos, materiales arcillosos (aluminatos y silicatos), obteniéndose como resultado una mezcla con propiedades hidráulicas:



Dependiendo de las condiciones que se logren se tendrán las velocidades de las reacciones químicas. La mayoría de las condiciones óptimas se logran en el acondicionamiento de la mezcla que entra al horno siendo aquí donde realmente comienza el proceso para la elaboración del *clinker*, lo cual es muy importante para la calidad de éste. La composición mineralógica adecuada se obtiene con la presencia de materias primas adecuadas, tales como arcillas, calizas aditivos y modificadores en caso de ser utilizados; deben estar en cantidades y proporciones controladas para asegurar la composición química correcta.

Es también de vital importancia tener una fineza y distribución de tamaño de partícula adecuada, lo cual proporciona una mayor área de superficie y facilita la sinterización. La homogenización de la mezcla es importante en cuanto afecta la calidad del *clinker*, el proceso de cocción y el consumo de combustible.

Clinkerización es el nombre de las reacciones en estado sólido-sólido, sólido-líquido, las cuales deben llevarse a cabo para la formación del *clinker* (3-40.12), son éstas las responsables de las posteriores propiedades del clinker y en la medida que transcurran de una forma adecuada se asegurará la calidad del clinker.

En el proceso de *clinkerización* dentro de los hornos se efectúa en una atmósfera oxidante para una correcta combustión, dicho proceso podría dividirse en varias etapas (una descripción gráfica de dichas etapas podrá observarse a continuación en el esquema No.2); en la primer etapa dentro del proceso de clinkerización se produce el secado y eliminación de agua libre, en la segunda etapa ocurre la eliminación del agua absorbida. En la tercer etapa se efectúa la descomposición de la arcilla obteniéndose la aparición de metakaolinita, en la cuarta etapa continúan formándose compuestos de transición, en la quinta etapa se produce la descarbonatación de la caliza formando los primeros silicatos y aluminatos de calcio. En la sexta etapa ocurren los enlaces de productos intermedios con la formación de belita, aluminato de tricálcico y ferrita (1-7 Trad Libre). En la etapa final se produce la formación de alita, finalmente se da paso al enfriamiento del *clinker*, lo cual es muy importante ya que dependiendo de la velocidad a la que ocurre los cristales del clinker permanecerán en la estructura alcanzada, o si por el contrario, es muy lento pueden regresar a estructuras intermedias, debajo de 1300 °C el cristal de alita tiende a descomponerse en belita y óxido de calcio libre; a continuación se presenta esquemáticamente el detalle de las etapas anteriormente descritas.

Figura 2. Etapas en proceso de clinkerización

Etapas	Temperatura (C)	Reacción Química
1	< 100	$H_2O \rightarrow H_2O (g)$
2	100 – 400	
3	400 – 750	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10} \rightarrow 2(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + 4H_2O$
4	600 – 900	$Al_2O_3 \cdot SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$
5	600 – 1000	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ $3CaO + 2SiO_2 + Al_2O_3 \rightarrow 2(CaO \cdot SiO_2) + CaO \cdot Al_2O_3$
6	800 – 1300	$CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 2CaO \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 3CaO + Fe_2O_3 \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$
7	1250 – 1450	$2CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2$

Fuente: F.L. Smidth **Kiln Operation and Optimization Text Book**. Pág 7 cap1 Trad Libre.

La fabricación del *clinker* se realiza en hornos rotatorios con unidades de precalentamiento por suspensión (ciclones) de 4 y 5 etapas con sistemas de enfriadoras de parrillas a la salida del horno, siendo este sistema de enfriamiento de alta eficiencia tanto para la calidad del clinker como para la recuperación de calor dentro del horno.

La calidad del cemento descansa principalmente en la química del *clinker*, así como en la preparación en la unidad de molienda siendo medida ésta por la distribución

de partículas (finura) y la superficie específica (blaine), esta última determina en gran parte el ritmo de hidratación, fraguado y resistencia del cemento.

1.1.2.5 Clinker reducido.

Reducción químicamente hablando es una disminución en la valencia del ión central o positivo (4-521 Trad Libre). Las condiciones normales de operación de un horno para producción de clinker se llevan a cabo en una atmósfera oxidante, las condiciones reductoras ya sea locales o parciales son indeseables (10-77- Trad Libre).

El clinker reducido se define como el *clinker* en el cual se presenta en su composición final un porcentaje significativo de Fe+2. En el proceso de producción de *clinker* para cemento portland, la aparición de condiciones reductoras en el horno conllevan la conversión del Fe+3 proveniente del Fe₂O₃ en Fe+2, por medio del proceso conocido como reducción (7-3 Trad Libre); el cambio de valencia promueve la descomposición de la fase de ferrita formándose aluminato tricálcico y cal libre, así como también se produce la aparición de iones metálicos y compuestos de azufre (7-3 Trad Libre).

Los efectos de las condiciones reductoras tienden a desestabilizar el cristal de alita, por medio de la aparición de nidos de belita en los bordes del cristal de alita (7-3 Trad Libre), lo cual podría repercutir en la resistencia del cemento, ya que la alita se hidrata más rápidamente que la belita. Esta conversión también provoca la inversión de la forma cristalina de la belita de la forma β en γ (8-67 Trad Libre) lo cual podría provocar algún efecto en la molturabilidad del *clinker* al modificar la estructura, y por consiguiente, la resistencia del cristal.

Otro efecto que se puede apreciar con la aparición de condiciones reductoras es la formación de álkali-aluminatos en vez de C3A, así como el azufre presente en la mezcla o en el combustible es reducida de tal forma que no tiende a formar álkali-sulfatos con

sulfato de potasio, en lugar de esto es liberado como gas, el cual va a los ciclones y debe ser removido por medios mecánicos, debido a estas variaciones el balance álcali-azufre se desequilibra y los álcalis tienen una pequeña opción de incorporarse en las fases del *clinker* (7-3 Trad Libre). Debido a esto, la fase de aluminato tricálcico es una de las primeras en unirse a los álcalis resultando en la transformación de aluminato tricálcico en álcali-aluminato lo cual no es deseable en el producto final, ya que sólo con el hecho de desbalancear la proporción de aluminato tricálcico podría afectar los tiempos de fraguado del cemento (7-3 Trad Libre).

Las condiciones reductoras en el horno para producción de *clinker* para cemento portland afecta el color del *clinker*, ya que éste presenta un color amarillo-café el cual se cree que se produce por la reducción parcial del hierro lo cual provoca la desestabilización de la ferrita (10-77 Trad Libre), este color cubre algunas veces la totalidad del *clinker* cuando las zonas reductoras son bastante fuertes o algunas veces sólo el corazón del *clinker*, ya que después de la reducción parcial puede producirse una reoxidación la cual no penetra más allá de la costra o superficie del *clinker* (2-212 Trad Libre). Cabe mencionar que hay otro factor por el cual la coloración del *clinker* puede tornarse en color café la cual es producto de un calentamiento excesivo del horno lo que provoca la caída del forro que se ha formado sobre el recubrimiento interno refractario el cual tiene un color café debido a las temperaturas constantes que debe soportar y al mezclarse con el *clinker* puede llegar a observarse un color café en el mismo siendo producto de la mezcla de *clinker* con sobreforro del horno, por lo mismo se deberá practicar el análisis a las muestras de *clinker* para comprobar la presencia en exceso de FE^{+2} en el *clinker*.

1.3 Requerimientos de calidad en el cemento tipo I

Los requerimientos físicos y químicos para el cemento Tipo I son regulados por medio de la norma ASTM C 150. Los límites propuestos por dicha norma se pueden encontrar en la tabla N0.VII en la sección de apéndice.

Para establecer el cumplimiento de las normas de calidad se realizan pruebas químicas y físicas a las muestras de cemento, a continuación se listan las pruebas a realizar y se describe de qué manera afectan la calidad del cemento.

A continuación se listan los análisis químicos a realizar al cemento expresados en porcentajes:

Residuo insoluble: éste proporciona la medida de materia no soluble en ácido.

CaO libre: en exceso provoca expansión en cemento.

MgO : en exceso provoca expansión en cemento.

Pérdida al fuego: determina la cantidad de CO₂, lo cual es una medida de la cantidad de fillers presentes en el cemento.

SO₃: medida del tiempo de fraguado del cemento.

Seguidamente se muestran las pruebas físicas a realizar al cemento:

Superficie específica (*Blaine*): repercute en las resistencias a compresión, tiempo de fraguado, demanda de agua y trabajabilidad.

Finura en tamiz # 325: repercute directamente en las resistencias a compresión, tiempos de fraguado.

Tiempo de fraguado: indica el tiempo de endurecimiento del material.

Expansión en autoclave: medida de la expansión del cemento, la cual es directamente proporcional a la cantidad de CaO y MgO.

Resistencia a la compresión en cubos: se realiza para obtener la resistencia a la compresión del cemento a distintas edades.

2. METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología utilizada en la realización de la investigación:

2.1 Materiales

Para la fabricación de cemento tipo I se utiliza *clinker* de cemento Portland y yeso cuyas características fueron ilustradas en la sección de marco teórico.

2.1.1 Determinación de la escala de color del *clinker* reducido

Para la realización de esta prueba se utilizó el Mini Scan XE, primero se coloca la muestra en forma de pastilla prensada, el dispositivo le irradia luz blanca a la muestra y mide la longitud de onda, a distintos valores, del haz de luz al pasar por la muestra y lo cuantifica en nanómetros, partiendo del principio que a cierto valor en nanómetros representa un color visible al ojo humano, grafica los colores que encuentra en la muestra dependiendo de las distintas lecturas que realiza. La gráfica representativa de los distintos colores encontrados en la muestra respecto a la variación de los porcentajes de *clinker* café así como los valores detectados por el dispositivo para construir dicha gráfica se pueden encontrar en la sección de apéndice en la tabla XIII y figura No. 19; en dicho dispositivo se analizaron primero una muestra de *clinker* negro (normal) y luego se analizaron muestras con mezclas de *clinker* negro en *clinker* café, aumentando el porcentaje de este último en 20% cada vez hasta llegar a 100%.

2.2 Preparación de las muestras

Los materiales fueron sometidos a los siguientes procedimientos de preparación para su posterior utilización en la fabricación de cemento.

2.2.1 Trituración y reducción de tamaño de partícula

El *clinker* y el yeso fueron sometidos a un proceso de reducción de tamaño, por medio de una trituradora de quijadas cuyas características se pueden encontrar en la tabla I de la sección de apéndice.

2.2.2 Tamizaje

La clasificación del *clinker* que se utilizó para la prueba de molturabilidad se realizó utilizando una zaranda clasificadora, cuyas especificaciones se pueden encontrar en la tabla I en la sección de apéndice.

2.3 Fabricación de cemento

2.3.1 Determinación del porcentaje de yeso a utilizar en la prueba

Este procedimiento se realizó preparando 1.35 Kg de muestras de cemento fabricado con *clinker* normal variando el porcentaje de yeso adicionado a cada muestra hasta alcanzar el tiempo de fraguado listado en la norma ASTM C 150 la cual regula el cemento Tipo I. Los datos de las mezclas realizadas se pueden encontrar en la sección de apéndice en la tabla No.XIV.

2.3.2 Preparación de las mezclas *clinker*/yeso

Para la elaboración de cemento se prepararon mezclas de clinker aumentando cada vez en 20 % el contenido de *clinker* reducido en la mezcla con *clinker* normal hasta llegar a 100 % de material reducido, manteniendo la cantidad de yeso constante para todas las muestras, para esto se utilizaron balanzas con exactitud de +/- 0.005Kg y +/- 0.1 gr así como mezcladoras para garantizar la homogeneidad del material las características de dichos aparatos se pueden encontrar en la tabla II de la sección de apéndice.

2.3.3 Molienda

Para la molienda se utilizó un molino de discos marca Bico de tipo por impacto y frotamiento, el cual utiliza un cilindro de metal al cual se le colocan en la parte interna dos anillos libres colocados uno dentro del otro y en el centro del segundo anillo un cilindro sólido como cuerpos molturadores. Al cilindro conteniendo dichos cuerpos ya cerrado se le aplica un movimiento de zarandeo fuerte en forma de zig-zag el cual es proporcionado por un motor eléctrico conectado a dispositivos mecánicos propios del sistema de molienda, las condiciones finales requeridas en el material se lograron alimentando un tamaño de partícula promedio ajustando la cantidad de material alimentado y el tiempo de molienda programado.

Las cantidades de materiales alimentados y los tiempos de molienda programados se ajustaron hasta obtener una fineza de 85 % pasando por el tamiz 325 y una superficie específica de 4100 cm²/gr como promedio en ambos materiales.

Las dos clases de clinker fueron molidos por separado debido a la diferencia de consistencias para alcanzar condiciones similares de finura y superficie específica, y después se realizaron las mezclas en el clinker hasta alcanzar las proporciones deseadas.

El yeso fue molido de la misma forma teniendo cuidado de monitorear la temperatura de molienda para no deshidratarlo.

Los materiales molidos y mezclados fueron almacenados en bolsas plásticas hasta su posterior utilización en las pruebas.

2.4 Evaluación de los muestras de cemento fabricados

Para llevar un seguimiento de la calidad del *clinker*, yeso y los cementos fabricados se realizaron las siguientes pruebas de laboratorio siguiendo los procedimientos dictados

para los mismos por la American Society For Testing and Materials, en la sección de apéndice se pueden encontrar los resultados de dichos análisis así como la descripción de los procedimientos por medio de los cuales fueron realizados.

Pruebas químicas:

- Composición química porcentual
- Contenido porcentual de cal libre
- Contenido porcentual de residuo insoluble
- Contenido porcentual de pérdida al fuego

Pruebas físicas:

- Superficie específica
- Finura en tamiz 325
- Tiempo de fraguado
- Expansión en autoclave
- Resistencia a compresión en cubos de mortero

Además se le realizaron a las muestras de *clinker* los siguientes análisis:

- Molturabilidad
- Microscopía

3. RESULTADOS

En el presente estudio se realizaron varias pruebas a cemento tipo I fabricado a nivel de laboratorio con distintos porcentajes de *clinker* reducido en su composición llegando a obtener los siguientes resultados.

Fig 25. Datos de análisis de molturabilidad cemento con distintas proporciones de *clinker* café

% <i>Clinker</i> café	Molturabilidad Kg/(Kw-h)
0	3.24
20	3.3
40	3.35
60	3.36
80	3.33
100	3.09

Fig 26. Datos de análisis de resistencia cemento con distintas proporciones de *clinker* café

% <i>Clinker</i> café	Resistencia 1 días (PSI)	Resistencia 3 días (PSI)	Resistencia 7 días (PSI)	Resistencia 28 días (PSI)
0	3492	3394	4273	5375
20	3153	3656	4291	5543
40	1927.1	2590	2590	4742
60	109.15	2352	3622	4622
80	125	1867	3231	4458
100	133	1109	2490	4041

Fig 27. Datos de análisis tiempo de fraguado y expansión cemento con distintas proporciones de *clinker* café

% <i>Clinker</i> café	Tiempo de fraguado inicial (min)	Tiempo de fraguado final (min)	Expansión (%)
0	50	125	0.01
20	30	35	0.05
40	15	45	0.07
60	10	20	0.10
80	15	45	0.07
100	10	20	1.4

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La prueba se llevó a cabo en varias etapas, el principal problema que se presentó en la elaboración de la misma fue la deshidratación del yeso durante la molienda del mismo, este problema se solucionó moliendo durante tiempos más cortos y monitoreando la temperatura tanto de los cuerpos molturadores como del material, obteniendo así el material con las propiedades y condiciones adecuadas.

Al *clinker* se le efectuaron análisis para comprobar la presencia de Fe^{+2} en su composición resultando positiva en un 100 % para las muestras utilizadas. Para mayores detalles acerca de esta prueba consultar sección de metodología. Debido a la forma en que el material se presenta se recolectó muestra con un 100 % de *clinker* reducido y muestra conteniendo un 100 % de clinker normal, ya con estas muestras se procedió a realizar las mezclas para la elaboración de las muestras de cemento.

A las mezclas de *clinker* se les realizaron distintas pruebas, a simple vista se apreció el cambio de coloración del tono gris a un tono amarillo-café en el *clinker* reducido y aumentando en las mezclas de *clinker* conforme aumentaba la proporción de clinker café, el cual se debe a la desestabilización de la ferrita en el clinker debido a las condiciones reductoras. En la figura No. 19 se pueden apreciar los distintos colores presentes en las mezclas de clinker reducido-clinker normal conforme varían las proporciones de los mismos, el cual fue realizado por medio de un estudio de espectrocolorimetría, el cual nos servirá solamente para propósito de ilustrar el cambio de color en el *clinker*, también se puede apreciar el fenómeno de cambio de color en las fotos que aparecen en la sección de apéndice.

Los análisis practicados a las mezclas de *clinker* revelaron un descenso en el SO₃ en las mismas a medida que aumenta el porcentaje de clinker reducido, esto ocurre debido a que las condiciones reductoras al producir una mala combustión crean condiciones para que al querer compensar la temperatura perdida por la mala combustión se produzca un sobrecalentamiento en el horno lo cual provoca que el azufre en la zona de fuego sea liberado como gas y al llegar a la zona de cambio de temperatura se condense, bajando la cantidad contenida en el *clinker* lo que se refleja en las mezclas de cemento aunque la cantidad y calidad del yeso agregado para todas las muestras fue constante. Se nota una baja en el SO₃ conforme aumenta el porcentaje de *clinker* reducido, a pesar de esto todas las muestras de cemento fabricado cumplen con la cantidad requerida por la norma ASTM C-150 por lo que no se toma como causa de los bajos tiempos de fraguado en las muestras con contenido de *clinker* café.

El Factor de Saturación de Cal (LSF) se manejó para el *clinker* en un rango de 97 a 98.8 el cual no tuvo mayores cambios con la presencia de *clinker* reducido, la variación más bien se debe a la preparación de la mezcla y operación del equipo, lo cual se puede apreciar en la figura No. 2. La cal libre reflejó lo mismo y no tuvo mayores cambios por lo que no se toman ambos como factores que influyan en la variación de las resistencias de las muestras de cemento fabricadas.

El C₃S reflejó valores que van en ascenso con la presencia de *clinker* reducido, pero de nuevo, depende del LSF, ya que son directamente proporcionales, la presencia de zonas reductoras produce una alteración del cristal de alita con la conversión de alita en belita en los bordes del cristal produciendo la aparición de nidos de belita (como se puede observar en la figura No. 23) esto afecta directamente las resistencias a edad temprana ya que la belita se hidrata más lentamente que la alita y produce una baja en las resistencias a edad temprana por lo que se concluye que la caída de las resistencias a edad temprana ocurre con el aumento de la cantidad de *clinker* reducido presente en las muestras.

En lo que al C2S se refiere se puede observar en la figura No.6 un leve descenso del mismo a medida que aumenta el porcentaje de *clinker* reducido en las muestras, lo cual se debe al aumento del C3S, ya que son inversamente proporcionales, la aparición de los nidos de belita como se mencionó anteriormente afectan también las resistencias a edad tardía al aparecer el cristal de belita de forma irregular lo que afecta el tiempo de hidratación de la misma, debiéndose a ello la baja en los valores de resistencias a 28 días.

El comportamiento de aluminato tricálcico en las muestras de *clinker* se puede observar en la figura No. .7, que si bien al final baja un poco la variación es mínima y su promedio en las muestras es relativamente estable, la caída cuando el porcentaje de *clinker* reducido en las muestras alcanza el 100% se debe a que las condiciones reductoras fomentan la descomposición de aluminato tricálcico para unirse a los álcalis, lo cual no es deseable ya que es perjudicial para el tiempo de fraguado siendo el responsable directo del mismo, cualquier variación en la cantidad presente en el cemento afectará el tiempo de fraguado, además los productos que forma con su descomposición debido a su naturaleza provocan que sea más difícil de controlar el tiempo de fraguado en el cemento a lo cual se atribuye la caída en los tiempos de fraguado a partir de la primera adición de *clinker* reducido a las mezclas de cemento, lo que se puede apreciar en la tabla XVI.

Asimismo el estudio de microcopía reveló, como se puede observar en la figura No. 3, una cantidad abundante de aluminato tricálcico presente en la muestra de *clinker* reducido lo cual es un factor importante que afectará el tiempo de fraguado.

En lo que a la ferrita se refiere ésta baja conforme aumenta el porcentaje de *clinker* reducido en las muestras como se puede observar en la figura No. 8, esto se debe a que las condiciones reductoras fomentan la descomposición de la misma en aluminato

tricálcico y cal libre lo cual influye directamente en el tiempo de fraguado, ya que una mayor cantidad de aluminato tricálcico necesitará mayor cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado.

Al *clinker* reducido y *clinker* normal se les practicó un análisis de espectrometría por difracción el cual mide y compara las distintas estructuras cristalinas para un mismo compuesto como se puede apreciar en la figura No. 20 en la que se sobrepusieron las gráficas de barrido para ambos tipos de *clinker*, no se detectó mayor diferencia entre las estructuras cristalinas de ambos tipos de *clinker* en la medición de ángulos reticulares propios de cada cristal.

En la figura No. 14 se pueden apreciar los resultados de la prueba de molturabilidad, en ella se muestra que el *clinker* reducido es más suave; debe tomarse en consideración que ambos tipos de *clinker* fueron enfriados en su etapa final en una enfriadora de parrilla de alta eficiencia, esto significa que se le aplica una gran cantidad de aire durante el enfriamiento lo cual provoca porosidad en el *clinker* y así reduce la dureza del mismo en gran porcentaje. Debido a esto la estructura cristalina tendrá menor impacto en lo que a la dureza del clinker se refiere, concluyendo que si bien la consistencia del clinker reducido es más suave que el *clinker* normal por los aspectos mencionados anteriormente no se puede concluir abiertamente sobre la influencia del *clinker* reducido en la prueba de moturabilidad.

Las variables críticas y de control alcanzadas en las propiedades del cemento cumplieron con los requerimientos establecidos por la norma ASTM C-150, la finura se mantuvo constante para todas las pruebas, no así la *blaine*, la cual varió en un rango de 4161 cm²/gr a 4475 cm²/gr debido a la consistencia más suave del *clinker* reducido, aunque esta diferencia en los valores no representa un impacto muy grande como para atribuirle las diferencias en las resistencias de las muestras de cemento.

La superficie específica (*blaine*) tiene una mayor influencia en las resistencias a edades tempranas, ya que al aumentar ésta se tiene mayor superficie de contacto facilitando la hidratación de los cristales de alita, vale la pena mencionar que las muestras con mayor porcentaje en su composición de *clinker* reducido tuvieron, debido a la consistencia del mismo, mayores valores de *blaine* y aún así obtuvieron bajas resistencias a edad temprana, concluyendo que dichos valores se deben a las propiedades del material solamente.

Las resistencias, como se puede observar en las figuras No. 12 a No. 15 de los cementos fabricados con un 0 a 20 % de *clinker* reducido en su composición no mostraron mayor influencia y llegaron a las resistencias esperadas, al rebasar dicho porcentaje de *clinker* reducido en las muestras se observa una caída en las resistencias siendo más afectadas las resistencias a edad temprana que las de edad tardía; a edad tardía las resistencias son principalmente controladas por el C2S y la finura y al no observar mayores cambios en ellas se concluye que las condiciones reductoras tienen un mayor efecto en cuanto al cristal de alita y las resistencias a edad temprana se refiere.

La expansión en las muestras de cemento fabricadas no mostraron ni sufrieron mayores cambios a excepción cuando se tenía presente en el cemento un 100 % de *clinker* reducido, fue en esta muestra cuando la expansión excedió el valor permitido por la norma. Los valores de expansión no subieron gradualmente como se puede apreciar en la figura No. 17, sino que se elevó solamente en dicha muestra. En general, la expansión se produce cuando los óxidos libres presentes en el cemento exceden ciertos límites teniéndose para las muestras elaboradas todos los parámetros dentro de los valores permitidos por la norma, por lo que se recomienda realizar un estudio enfocado específicamente en la expansión con este tipo de material.

Una posible utilidad para el *clinker* reducido podría darse en los cementos de fraguado rápido en los cuales el color del cemento no sea un factor importante,

utilizándolo con un 20 % como máximo en su dosificación para no afectar las resistencias del mismo.

CONCLUSIONES

1. El *clinker* reducido tiene un efecto adverso en cuanto a las resistencias a la compresión se refiere cuando se utiliza en un porcentaje mayor a 20%.
2. El *clinker* reducido produce efectos adversos en cuanto a los tiempos de fraguado se refiere cuando se utiliza en cualquier cantidad en el cemento.
3. El *clinker* reducido afecta la expansión en el cemento cuando éste es elaborado con 100 % de dicho clinker en su composición.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda no fabricar cemento tipo I con una presencia mayor de 20 % de *clinker* reducido en su composición.
2. Se recomienda estudiar más a fondo el efecto del *clinker* reducido en la expansión del cemento tipo I

BIBLIOGRAFÍA

1. Enciclopedia Interactiva, **Encarta**. 1999.
2. Ghosh, S.H. **Cement and Concrete Science & Technology**. India: Edit ABI Books pp 201, 202, 212.
3. Holderbank, **Simulador de Horno Manual del Usuario**. Suiza, 1999, 11.10, 40.10 ,40.11, 40.12, 40.22, 40.39, Cap5 pp2, Cap6 pp 1, 6, 31 Cap7 pp 2, 3.
4. Holmes, Harry N. **General Chemistry**. United States Of America, 1921 pp 252.
5. Krugh, Keith A. **Microscopy as Process and Quality Control Technique**. Holnam, pp 3.
6. Lea, F.M. **Chemistry of Cement and Concrete**. New York, Ed. Chemical Publishing Company Inc., 1971, pp 152, 153, 157.
7. Smidth, F.L. **Kiln Operation and Optimization Text Book**. Pp Cap1 pp 56, Cap3 pp 4, 18, 19, 22, 23, 30, 34, 36, Cap6 pp 4.
8. Sorrentino, F.P. “The influence of kiln atmosphere on clinker characteristics” **Advances in Cement and Concrete Preceedings of an Engineering Foundation Conference**. New York, Ed ABI 65.
9. Lab Control De Calidad, **Procedimientos de Calidad SAC-SM-CC-ME-01, SAC-SM-CC-ME-11, SAC-SM-CC-ME-13, SAC-SM-CC-ME-14, SAC-SM-CC-ME-15, SAC-SM-CC-ME-16, SAC-SM-CC-ME-17, SAC-SM-CC-**

ME-19, SAC-SM-CC-ME-20, Guatemala, Planta San Miguel Cemento Progreso.

10. Taylor, F. W. **Cement Chemistry**. Second Edition, USA, 1997, pp76, 77.

APÉNDICE

TABLAS

Tabla I Especificaciones equipo utilizado

	Trituradora	Clasificadora	Molino #1
Marca	Bico	Ro-Tap	Bico
Potencia	3 hp	174 hp	-
Voltaje	208-460V	230-460V	-
RPM	1750	1725	-
Frecuencia	60 Hz	-	-
Fases	3	-	-

Tabla II Especificaciones equipo utilizado

	Molino #2	Mezcladora
Marca	-	Stone
Potencia	1 hp	1hp
Voltaje	-	208-230V
RPM	-	3450
Frecuencia	-	60 Hz
Fases	-	1

- Información no disponible

Tabla III Datos de análisis químico arcillas y caliza

	CALIZA (%)	ESQUISTO ALTO (%)	ESQUISTO BAJO (%)
SiO₂	5.07	60.00	45.00
Al₂O₃	0.75	10.46	12.10
Fe₂O₃	0.57	6.01	10.34
CaO	52.53	4.26	12.27
MgO	1.40	2.30	5.94
SO₃	0.06	0.06	0.67
K₂O	0.44	1.26	1.29
Na₂O	2.95	1.05	3.98
PF	36.22	11.0	10.95

Tabla IV Pureza yeso utilizado en el ensayo

SiO₂ (%)	Al₂O₃(%)	Fe₂O₃(5)	MgO(%)	SO₃(%)	K₂O(%)	Na₂O(%)
1.00	0.27	0.08	1.73	42.13	0.05	0.02

Tabla V Datos análisis del *clinker*

% clinker café	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	Na₂O (%)	LSF (%)	MS (%)
0	21.3	5.19	3.09	0.39	3.62	1.19	0.55	0.25	96.91	2.57
20	20.86	4.93	2.96	0.36	3.56	1.02	0.56	0.23	97.17	2.65
40	21.04	5.01	2.97	0.33	3.75	0.89	0.60	0.24	97.7	2.64
60	21.02	5.07	2.93	0.31	3.87	0.73	0.61	0.22	97.55	2.63
80	20.91	5.04	2.88	0.29	3.99	0.53	0.63	0.22	98.09	2.64
100	21.22	4.79	2.87	0.29	4.04	0.4	0.69	0.20	98.86	2.77

Tabla VI Datos análisis de *clinker*

% Clinker café	MA (%)	C3S (%)	C2S (%)	C3A (%)	C4AF (%)
0	1.68	62.82	13.68	8.52	9.4
20	1.67	62.88	12.36	8.05	9
40	1.69	65.15	11.17	8.25	9.04
60	1.73	64.96	11.25	8.49	8.91
80	1.75	66.6	9.7	8.50	8.75
100	1.67	70.67	7.52	7.85	8.72

Tabla VII Requerimientos cemento tipo I

Condición	Valor
MgO (%)	6
SO ₃ (%)	3*
SO ₃ (%)	3.5**
RI (%)	0.75
Expansión (%)	0.8
Resistencia a 1 d. (PSI)	No aplica
Resistencia a 3 d. (PSI)	1740
Resistencia a 7 d. (PSI)	2760
Resistencia a 28d (PSI)	4060***
Tiempo fraguado inicial	45 '
Tiempo fraguado Final	375 '

* Cuando C3A es < 8

** Cuando C3A es > 8

*** Opcional

' Utilizando el aparato Vicat

C- 150 Standard specification for Portland Cement pp 2, 3.

Especificaciones estandar para cemento Portland

Tabla VIII Datos de análisis cemento

% <i>Clinker</i> café	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	MgO (%)	K2O (%)	Na2O (%)	SO3 (%)	C2S (%)	C3A (%)	C4AF (%)
0	19.57	4.88	2.85	3.51	0.52	0.42	4.08	61.61	8.1	8.67
20	19.69	4.55	2.81	3.44	0.55	0.37	3.98	61.75	7.3	8.55
40	19.39	4.5	2.74	3.5	0.57	0.34	3.55	60.51	7.3	8.35
60	19.81	4.42	2.75	3.63	0.61	0.27	3.38	61.35	7.05	8.37
80	19.59	4.59	2.69	3.76	0.63	0.37	3.34	60.11	7.62	8.17
100	19.83	4.39	2.69	3.87	0.67	0.23	3.05	60.78	7.08	8.19

Tabla IX Datos de análisis cemento

% <i>Clinker</i> café	CaO (%)	Fineza 325 (%)	Blaine (cm2/gr)	Pérdida fuego (%)	Residuo Insoluble (%)
0	0.32	85.23	4161	1.4	0.4
20	0.24	85.25	4201	1.5	0.4
40	0.29	85.31	4301	2.3	0.33
60	0.3	84.89	4360	2	0.41
80	0.3	84.65	4569	3.3	0.22
100	0.3	84.57	4475	2.6	0.65

Tabla X Datos de análisis cemento

% <i>Clinker</i> café	Resistencia 1 días (PSI)	Resistencia 3 días (PSI)	Resistencia 7 días (PSI)	Resistencia 28 días (PSI)
0	3492	3394	4273	5375
20	3153	3656	4291	5543
40	1927.1	2590	2590	4742
60	109.15	2352	3622	4622
80	125	1867	3231	4458
100	133	1109	2490	4041

Tabla XI Datos de análisis cemento

% <i>Clinker</i> café	Tiempo de fraguado inicial (min)	Tiempo de fraguado final (min)	Expansión (%)	Flow (mm)
0	50	125	0.01	131
20	30	35	0.05	12.9
40	15	45	0.07	129
60	10	20	0.10	112.5
80	15	45	0.07	110
100	10	20	1.4	108

Tabla XII Datos prueba molturabilidad

% Clinker cafe	Ret. tamiz No.8 (g)	Ret. tamiz No.80 (g)	Total (g)	Molturabilidadd Kg/(Kw-h)
0	206.02	432.81	984.09	3.24
20	191.29	238.33	984.02	3.3
40	179.12	212.72	985.12	3.35
60	176.05	289.97	984.13	3.36
80	184.52	212.98	984.96	3.33
100	243.35	323.27	984.12	3.09

Tabla XIII Datos curva gráfica espectrocolorimetría en *clinker*

%CAFÉ	% Negro	L PROM	STDEV	A PROM	STEDV	BPROM	STDEV
100	0	56.5	0.009	3.08	0.03	19.92	0.05
80	20	55.18	0.14	1.49	0.03	15.53	0.15
60	40	49.18	0.8	1.08	0.02	15.19	0.08
40	60	44.98	0.31	0.36	0.04	13.32	0.05
20	80	42.14	0.25	0.8	0.05	12.12	0.14
0	100	42.92	1.36	-0.5	0.02	9.71	0.2

Tabla XIV Yeso óptimo en cemento

Yeso (%)	Tiempo de fraguado fnicial (min)	Tiempo de fraguado final (min)
5.0	138	345
3.0	91	215
2.0	61	144
1.7	50	125
1.5	38	106

Figuras

Figura 3. SO₃ en muestras de *clinker*

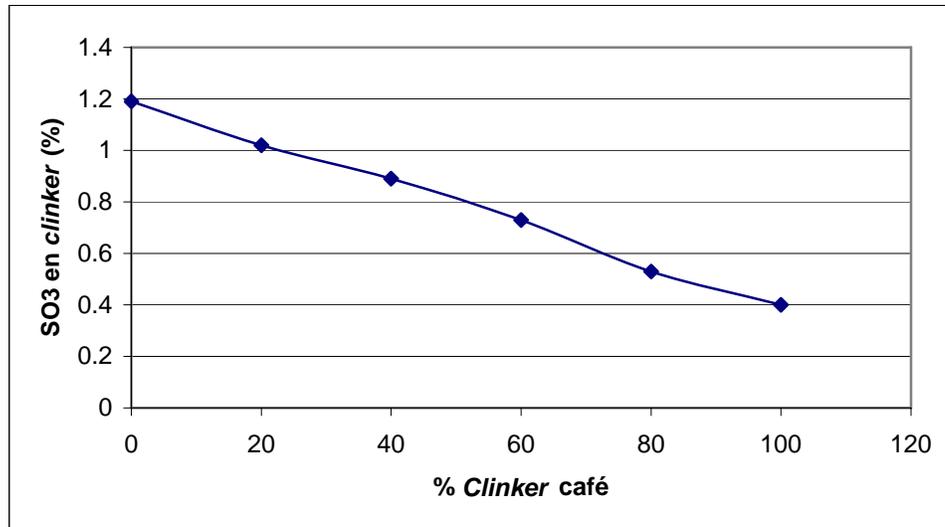


Figura 4. LSF en muestras de *clinker*

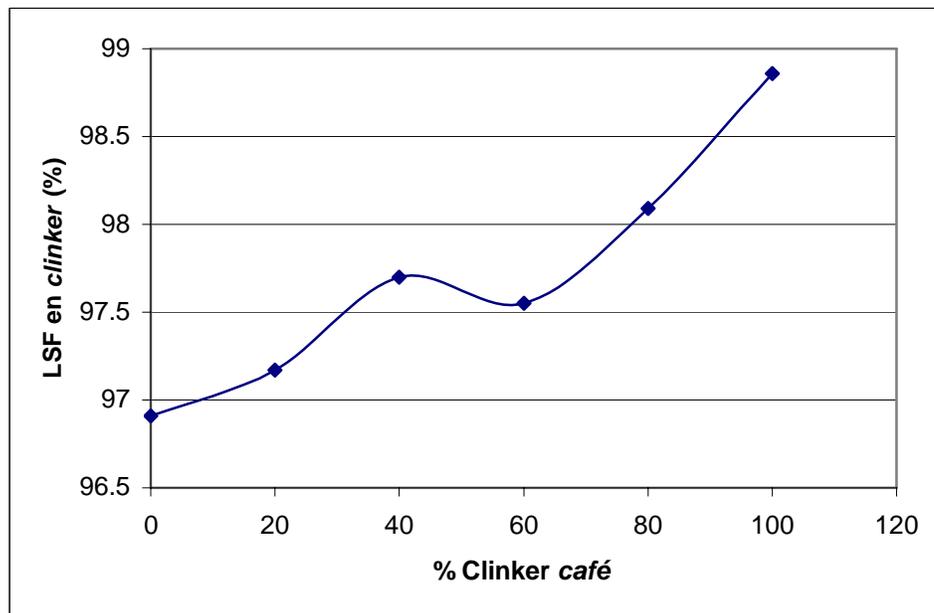


Figura 5. C3S en muestras de *clinker*

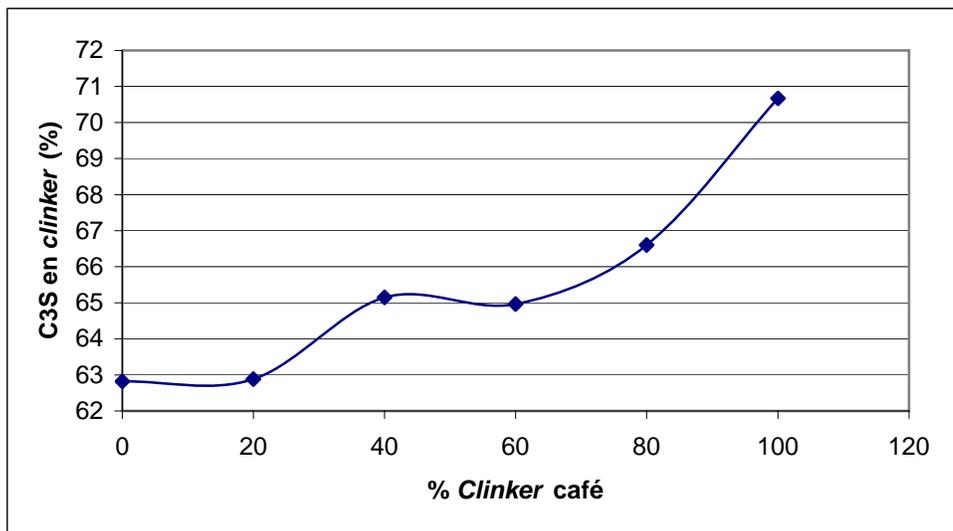


Figura 6. C2S en muestras de *clinker*

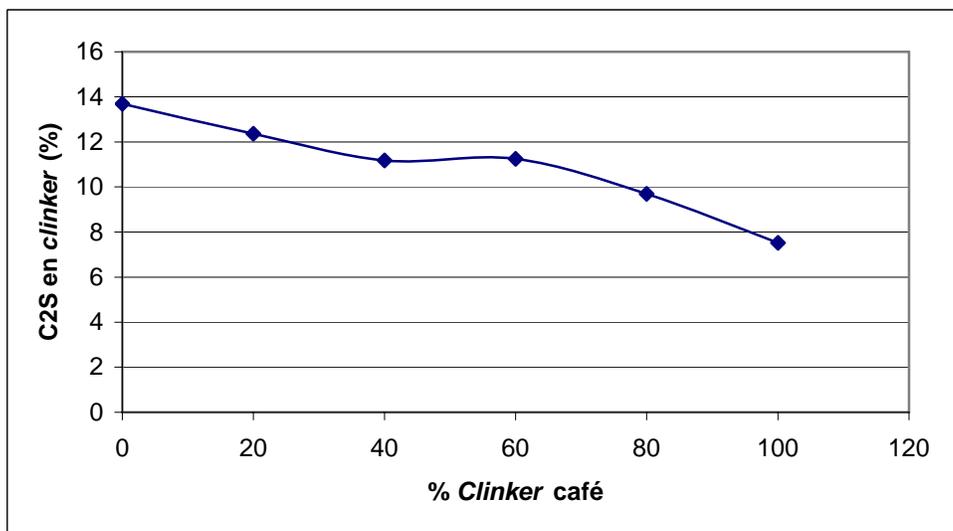


Figura 7. C3A en muestras de *clinker*

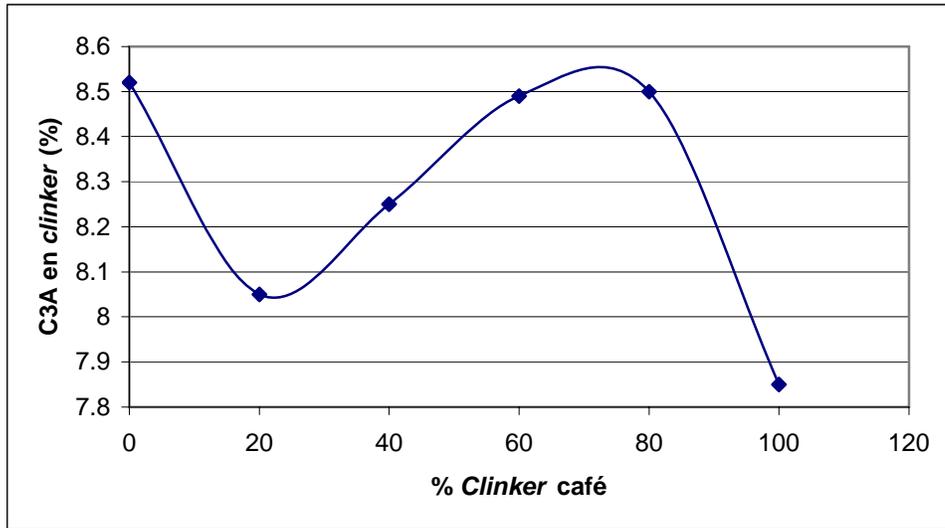


Figura 8. C4AF en muestras de *clinker*

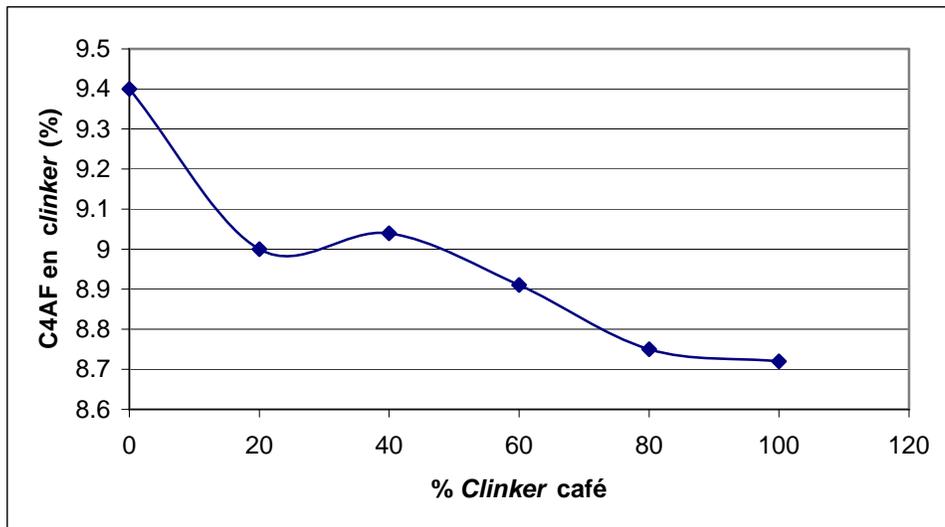


Figura 9. C2S en cemento fabricado

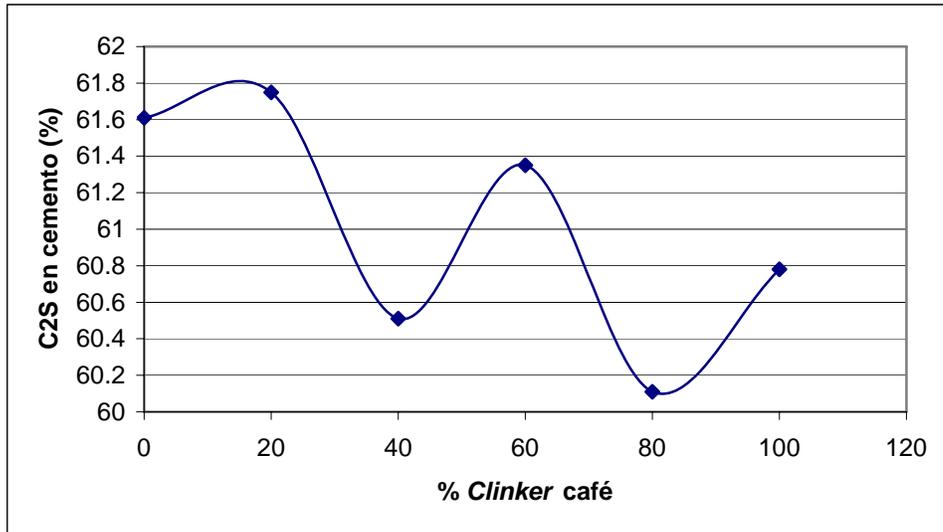


Figura 10. Blaine en cemento

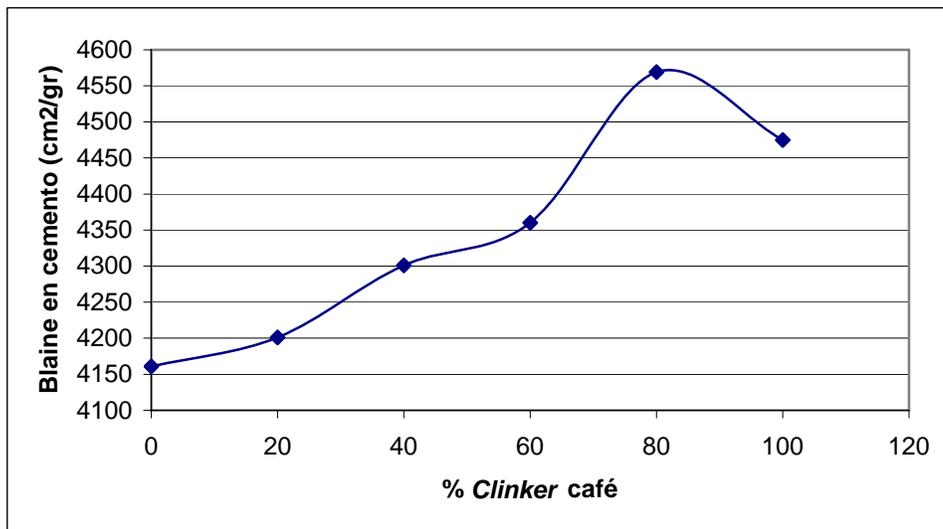


Figura 11. CaO en cemento fabricado

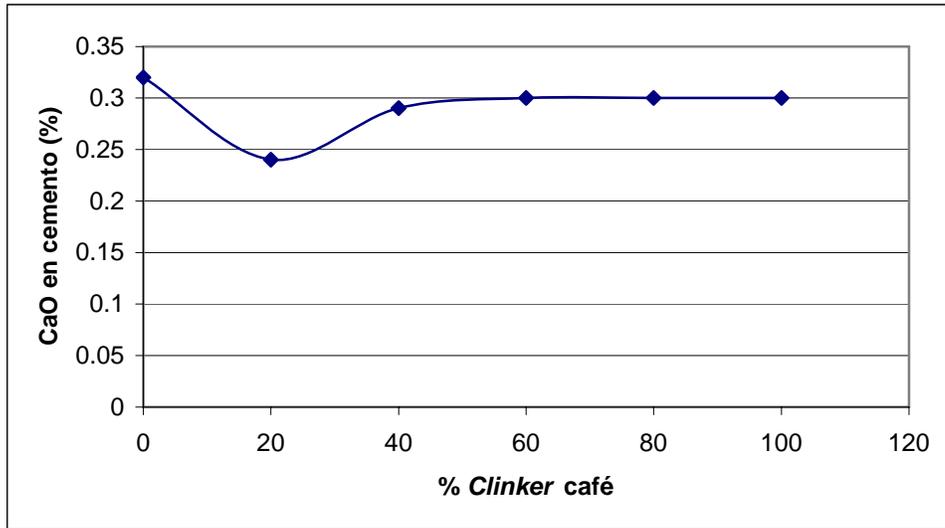


Figura 12. Resistencia a un día en cemento fabricado

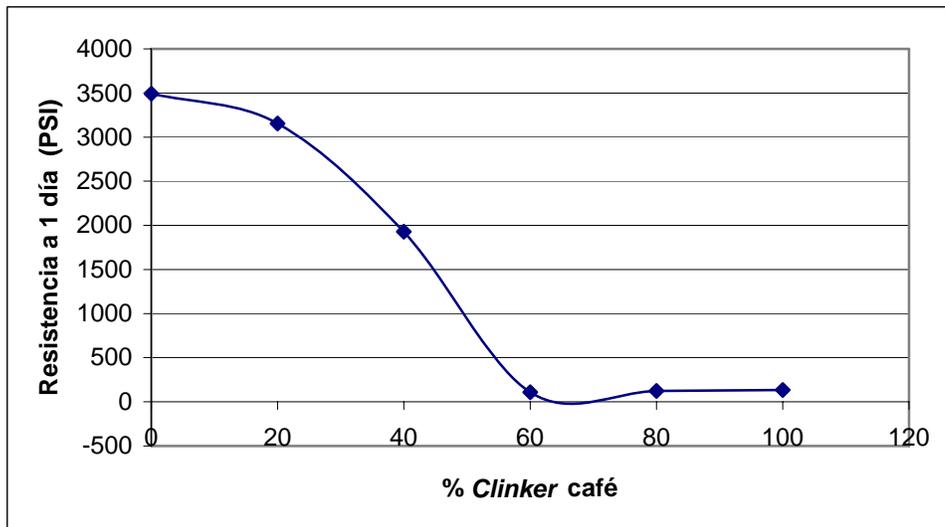


Figura 13. Resistencia a 3 días en cemento fabricado

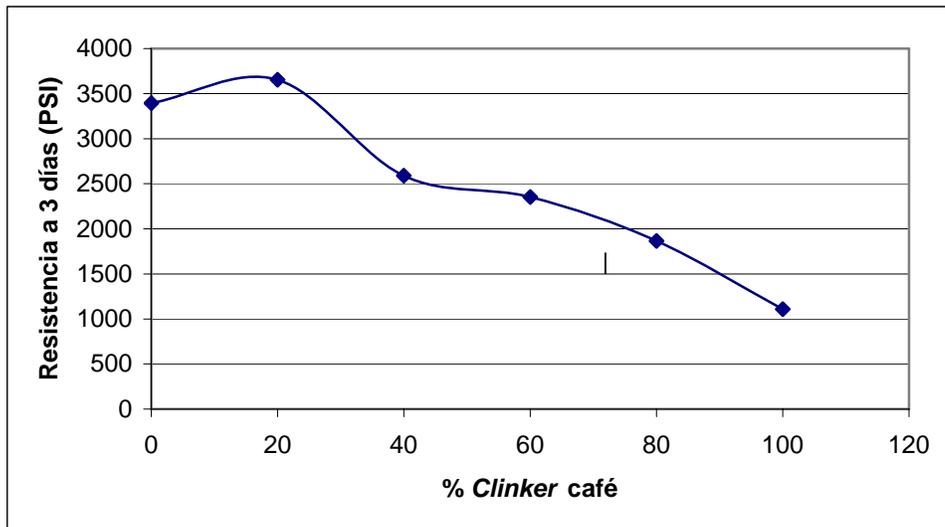


Figura 14. Resistencias a 7 días en cemento fabricado

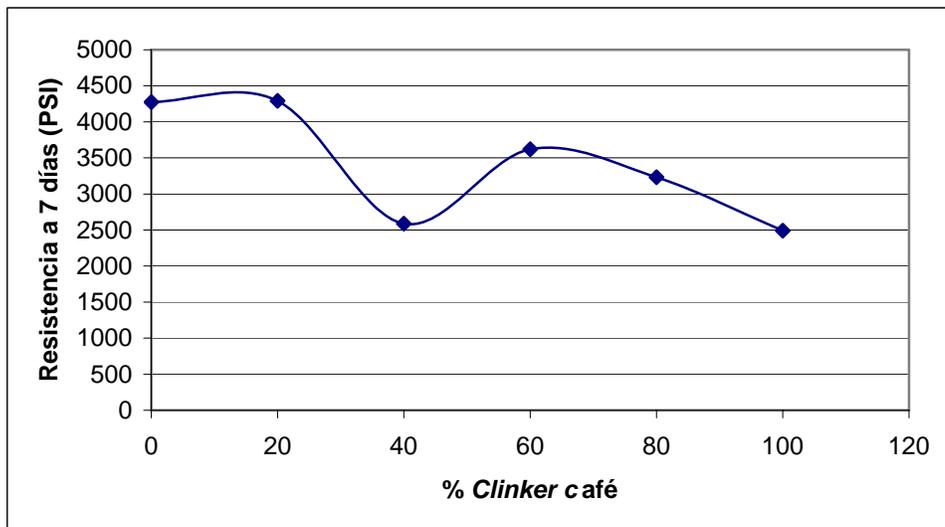


Figura 15. Resistencias a 28 días en cemento fabricado

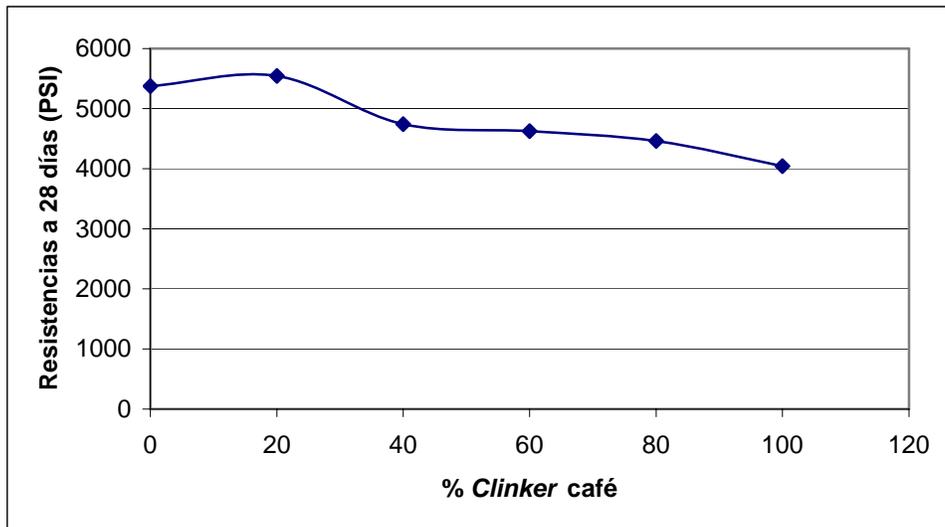


Figura 16. Tiempo de fraguado en cemento fabricado

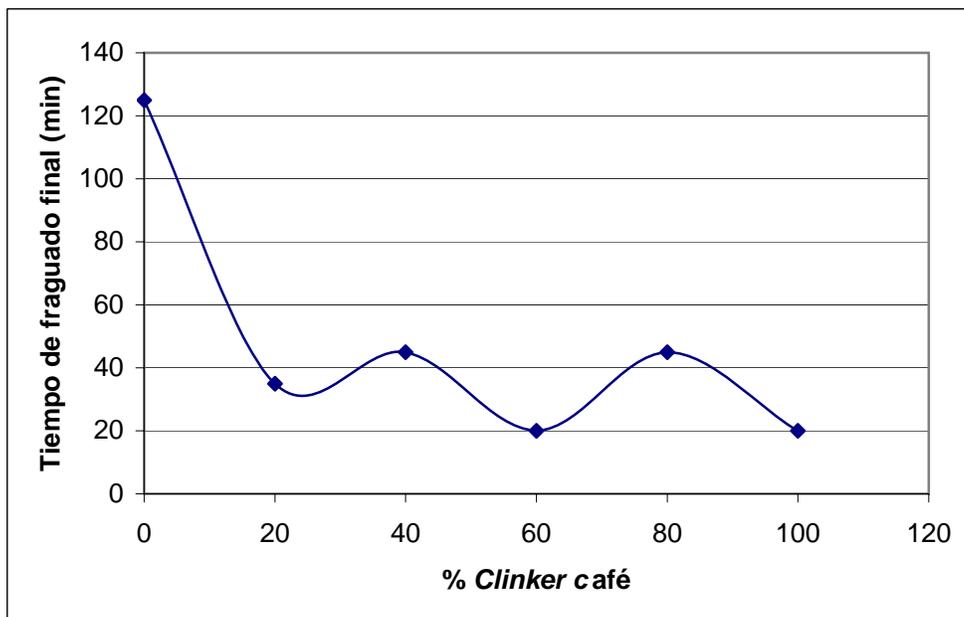


Figura 17. Expansión en cemento fabricado

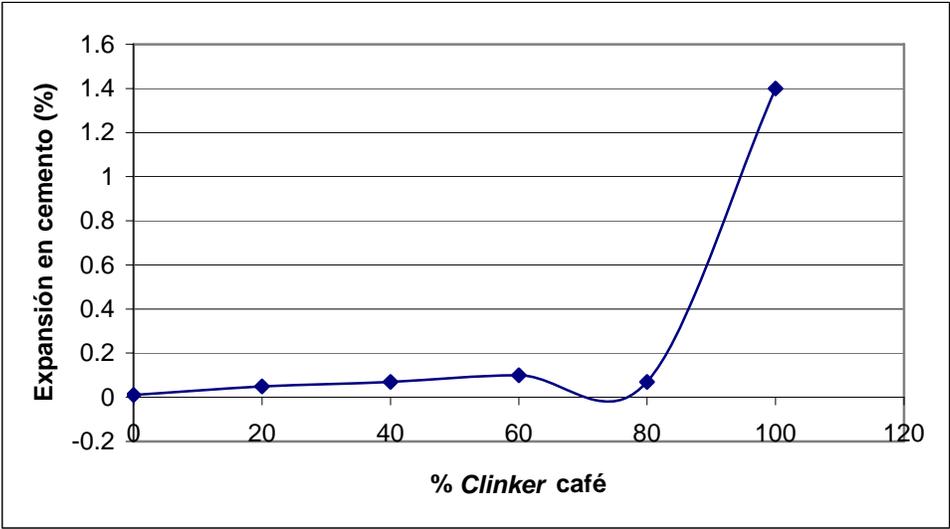


Figura 18. Molturabilidad en clinker

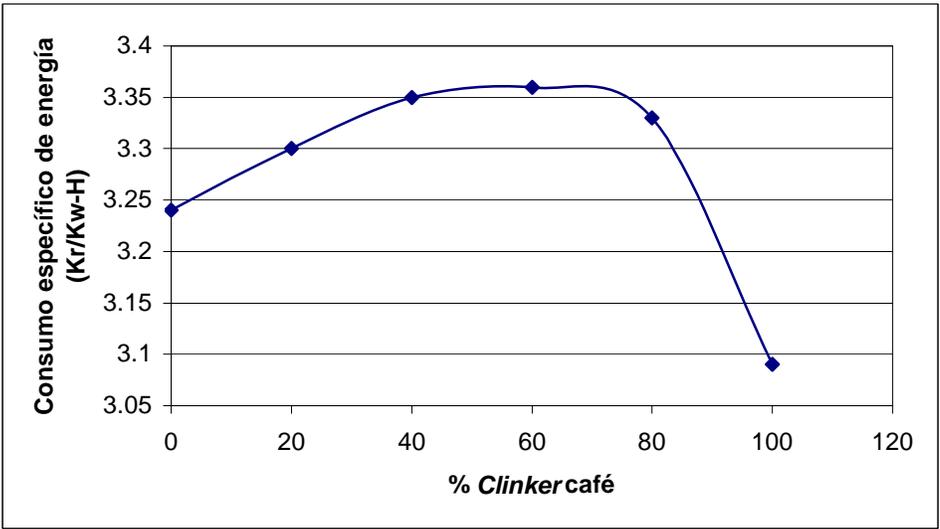


Figura 19. Gráfica representativa variación de color en clinker

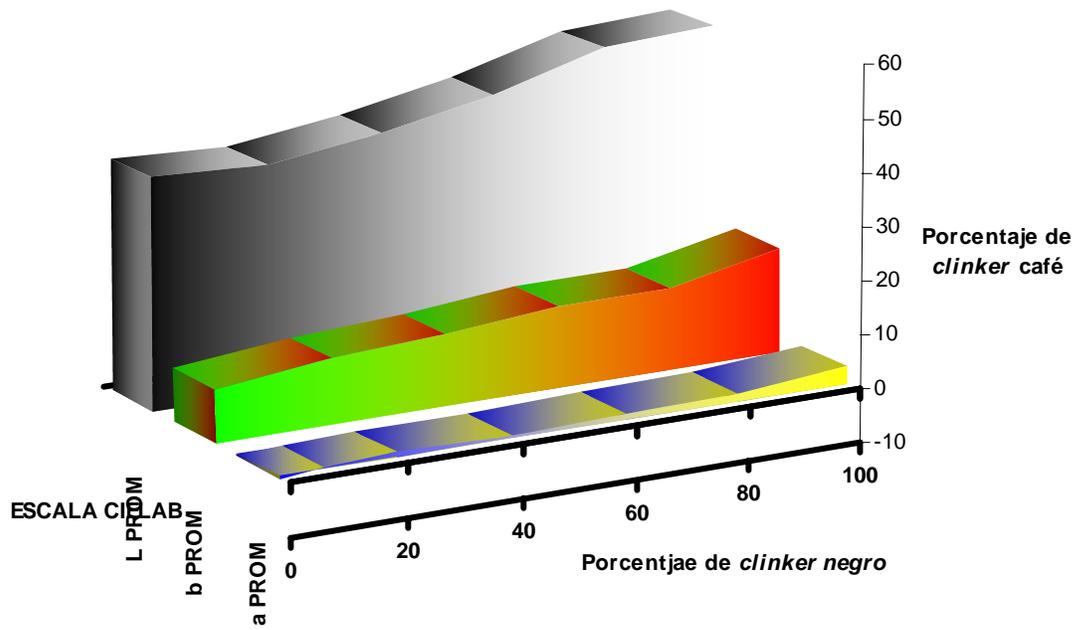
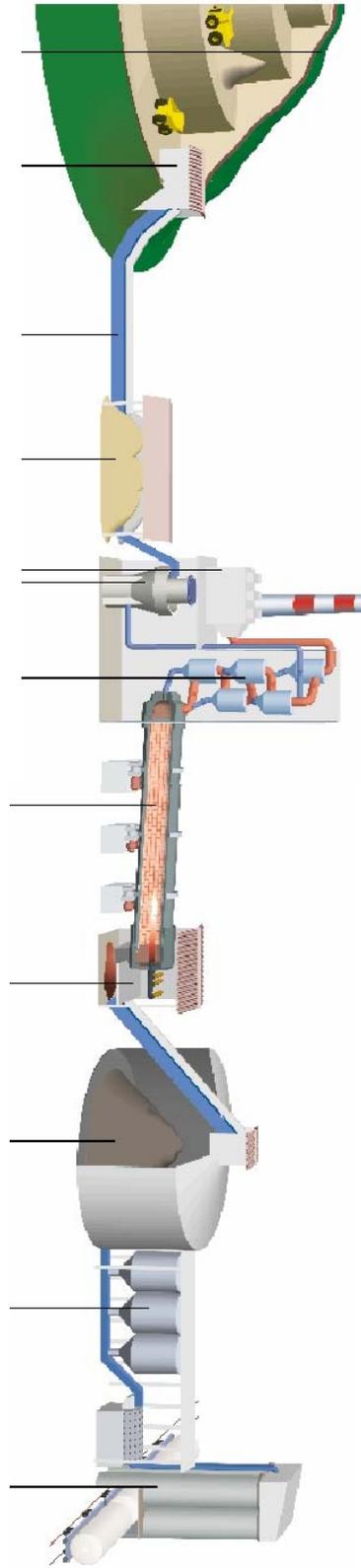


Fig 21. DIAGRAMA DE PROCESO

A continuación se presente el índice del diagrama de proceso de producción de cemento a nivel industrial:

1. Extracción de materias primas.
2. Trituración de materias primas.
3. Transporte de materias primas.
4. Almacenaje y homogenización de material.
5. Alimentación a horno.
6. Unidad de precalentamiento.
7. Horno tubular.
8. Enfriamiento y recuperación de energía.
9. Almacenaje.
10. Molienda y producción de cemento.
11. Almacenaje y despacho de cemento.

Fuente: Holcim LTD. **Corporate Sustainable Development Report** (2002)



FOTOS

Figura 22. Vista estudio de microscopía clinker reducido

C3S irregular con tendencia a esférico, poco C2S presencia de nidos, abundante aluminato tricálcico con tendencia a prismático.

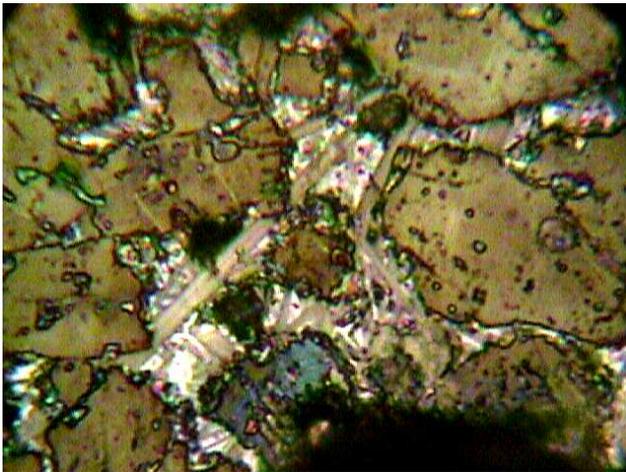


Figura 23. Vista estudio de microscopía *clinker* reducido

Cristales con tendencia a canibalismo poca fase líquida.

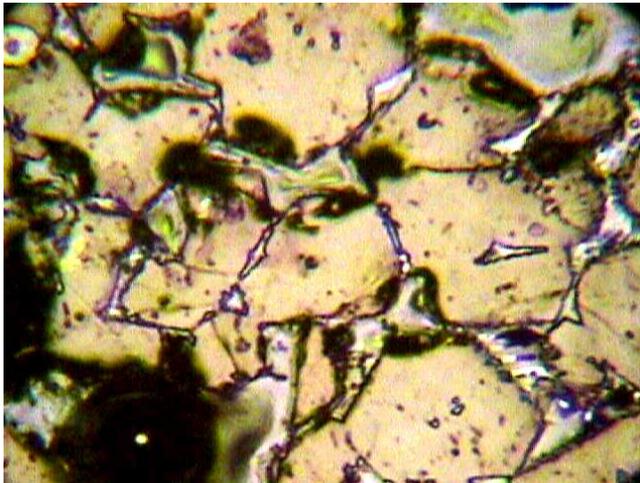
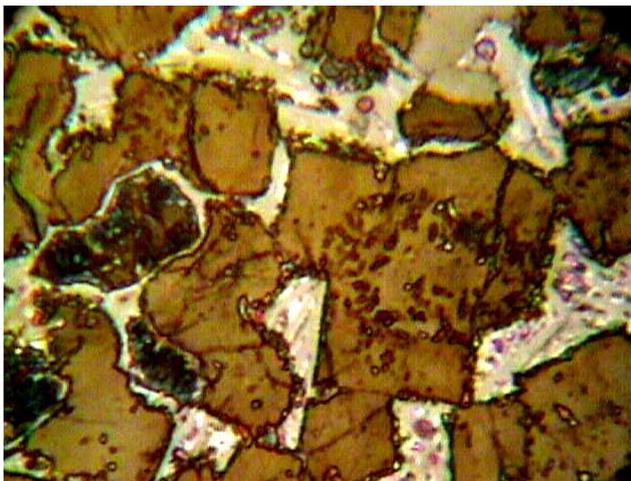


Figura 24. Vista estudio de microscopía *clinker* reducido

Ferrita opaca, aluminato abundante, aluminato prismático.



Procedimientos para análisis de cemento y materias primas

A continuación se describen los distintos procedimientos utilizados para el análisis de las materias primas y del cemento, dichos procedimientos han sido previamente establecidos en los Manuales de Laboratorio de Control de Calidad y del Centro Tecnológico de Cementos Progreso S.A.

Análisis realizados a materias primas

Fineza en tamiz #325 El presente procedimiento se aplicó al *clinker* como al yeso, se coloca un tamiz # 325 en el aparato llamado Alpine el cual se utiliza para medir la finura, se coloca la muestra sobre el tamiz, seguidamente se coloca una tapadera plástica sobre el tamiz teniendo cuidado de que quede herméticamente sellado, luego se programa el tiempo de análisis. Luego se tara el material que queda sobre el tamiz; la fineza se obtiene utilizando la ecuación definida por el método, el resultado es expresado en porcentaje.

Superficie específica (Blaine) Análisis practicado a las muestras de clinker, esta prueba se efectúa por medio del permeabilímetro; primero se coloca una papel filtro en la celda de permeabilidad y se coloca un papel filtro sobre el disco de metal sobre el cual a su vez se colocará el material a analizar, se coloca sobre el cemento un disco de papel filtro junto con el émbolo con el propósito de presionar levemente el material. Luego se conecta la celda de permeabilidad del manómetro a la unión esmerilada, se evacúa el aire se toma el tiempo que tarda el líquido en alcanzar las marcas establecidas. El tiempo en segundos se ingresa a la ecuación establecida para el método y el resultado es expresado en cm^2/gr .

Análisis químico completo Los análisis químicos se realizarán tanto al *clinker*, yeso y cemento para analizar su calidad y grado de pureza ARL 8660 XRF el cual utiliza la

espectrometría por fluorescencia y por difracción para efectuar los análisis, de la siguiente forma.

Se prepara una pastilla con una mezcla de 5 partes de un fundente inerte por 1 parte de muestra (puede ser *clinker* o cemento), se lleva a una temperatura de 1100 C durante 7 minutos. Esta pastilla es ingresada en el equipo en un contenedor especial para su análisis.

Ahora se explica los mecanismos de análisis del equipo mencionado: éste bombardea con rayo de luz X a los elementos presentes en la pastilla, estos rayos excitan al electrón exterior de los elementos a tal grado de sacarlo de su orbital, al salir el electrón es detectado por un sensor especial (este sensor es específico para cada elemento), que detecta la cantidad de electrones liberados dependiendo de la cantidad en que este elemento esté presente en la pastilla, lo contabiliza en forma de cuentas y lo traslada a porcentajes, según correlaciones estandarizadas según el material que se esté analizando.

Presencia de Fe+2 El análisis se efectúa al *clinker* y al cemento, se utiliza un método gravimétrico, el cual consiste en una titulación de muestra dispersa en un medio ligeramente ácido con el reactivo alfa-alfa-dypiridil, el cual detecta la presencia de Fe+2 con la aparición de un color rojizo en el viraje de la titulación, dependiendo el tono del color con la cantidad de Fe+2 presente en la muestra.

Molturabilidad Esta prueba se realizó utilizando un molino de bolas cilíndrico de acero inoxidable cuyas dimensiones son 20.3 cm de diámetro por 20.3 cm de alto. El molino es impulsado entre dos rodos de corcho accionados por un motor eléctrico de un caballo de fuerza; el molino utiliza como cuerpos molturadores bola de acero de 15 y 35 mm de diámetro con un 50 % de cada tamaño de bola siendo 8.5 Kg la carga de bola total estandarizada para el molino. La prueba se realiza alimentando 1000 g de *clinker* de tamaño 4.37mm a 2.37mm al molino, luego de cerrarlo y se pone a moler durante 30 minutos, luego se destapa y se tamiza el material en los tamices #8 y #80. Se pesa el material retenido en dichos tamices, calculando la molturabilidad restando al peso

inicial de muestra el peso del material retenido en el tamiz # 8 y el resultado dividirlo entre una constante del método teniendo así la molturabilidad en (Kg/(Kw-H). Los resultados de dicha prueba se pueden encontrar en la tabla XII en la sección de resultados.

Análisis de microscopía en *clinker* El presente procedimiento se realizó pesando 150gr de *clinker* luego se tritura por unos segundos en un molino de cilindro con un anillo y un cilindro interno como cuerpos molturadores, seguidamente se tamiza la muestra primero por una malla #8 y luego por una #10; el material retenido en la malla # 10 se introduce en un molde para elaborar una pastilla, a dicho material se le agrega una resina y un líquido adherente y se deja secar por 16 hrs. La pastilla obtenido es tratado con lija de 15,30 y 45 micrones para luego pulirla con utilizando para ello polvos de 0.1, 0.03 y 0.05 micrones. Después de dicho tratamiento se observa bajo el microscopio, las fotos obtenidas de dichos análisis se pueden encontrar en la sección de apéndice.

Pruebas químicas al cemento.

Análisis químico completo. Analizar una muestra en forma de pastilla prensada por medio del espectrómetro.

Presencia de Fe+2 . Se utiliza el método gravimétrico basado en una titulación de una muestra dispersa en un medio ligeramente ácido por medio del reactivo alfa-alfa-dipiridil.

Análisis gravimétrico de SO₃. Este análisis se efectúa disolviendo la muestra en agua desilada y ácido clorhídrico, diluir y calentar a ebullición; agregar cloruro de bario y luego filtrar. Tarar luego calcinar en una mufla de 900 °C a 1000 °C por algunos minutos. Al enfriarse tarar nuevamente, la resta de lastaras por el radio molecular del trióxido de azufre respecto al sulgato de bario dará el valor expresado en porcentaje.

Análisis gravimétrico de CaO. Este procedimiento se realiza al clinker y al cemento, de la siguiente forma se coloca 1.000 g de muestra (si es *clinker* debe molerse en molino Herzog) en un erlenmeyer. Adicionar etilenglicol (calentado a 80 C) y fenolftaleína al 0.1 %, calentar y agitar la solución durante algunos minutos; después de transcurrido el tiempo, adicionar solución de acetato de amonio hasta observar un viraje por medio del cambio de color (rosa a gris), obteniéndose la cal multiplicando los mililitros consumidos por un factor de la solución titulante, obteniendo el resultado como porcentaje.

Residuo insoluble. Este análisis se realiza agregando a la muestra ácido clorhídrico concentrado, disolver y calentar a ebullición; filtrar y agregar hidróxido de sodio calentar por algunos minutos. Romper el papel filtro y dejarlo en reposo dentro de un beaker sobre una plancha caliente. Adicionar dos gotas de rojo de metilo y ácido clorhídrico concentrado hasta observar cambio de color (amarillo a rosa). Agregar ácido clorhídrico y filtrar por gravedad. Tarar y luego calcinar a 950 °C por un tiempo, después enfriar y pesar nuevamente, utilizar la diferencia de peso en la ecuación utilizada por el método, el resultado es expresado en porcentaje.

Pérdida al fuego. Calcinar una muestra de cemento previamente tarada y colocada en un crisol de platino en una mufla; después enfriar el crisol y pesar de nuevo. Por medio de la diferencia de pesos se obtiene el dato para calcular la PF por medio de la ecuación deducida para el método.

Pruebas físicas a realizar al cemento

Finura en tamiz # 325. Se coloca un tamiz # 325 en el aparato llamado Alpine el cual se utiliza para medir la finura, se coloca la muestra de cemento sobre el tamiz,

seguidamente se coloca una tapadera plástica sobre el tamiz teniendo cuidado que quede herméticamente sellado, luego se programa el tiempo de análisis. Luego se tara el material que queda sobre el tamiz; la fineza se obtiene utilizando la ecuación definida por el método, el resultado es expresado en porcentaje.

Superficie específica (*Blaine*). Esta prueba se efectúa por medio del permeabilímetro; primero se coloca una papel filtro en la celda de permeabilidad y se coloca un papel filtro sobre el disco de metal sobre el cual a su vez se colocará el cemento a analizar se coloca sobre el cemento un disco de papel filtro junto con el émbolo con el propósito de presionar levemente el material. Luego se conecta la celda de permeabilidad del manómetro a la unión esmerilada, se evacúa el aire se toma el tiempo que tarda el líquido en alcanzar las marcas establecidas. El tiempo en segundos se ingresa a la ecuación establecida para el método y el resultado es expresado en cm^2/gr .

Tiempo de fraguado en cemento. Se efectúa elaborando en un molde establecido, una mezcla de cemento y agua solamente. Después de 30 minutos aproximadamente de haber sido elaborado, se evalúa el tiempo de fraguado por medio de un aparato llamado Aguja de Vicat, el cual mide el tiempo de fraguado introduciendo una aguja, la cual soporta un peso determinado estandarizado y calibrado al volumen del bloque de cemento, cada 10 minutos se introduce la aguja en distintas partes del bloque hasta que ésta indique el valor que se desea y se toma el tiempo, siendo éste el tiempo de fraguado.

Expansión en autoclave. Se elaboran barras de cemento en forma de cubo rectangular de medidas definidas, las cuales se dejan secar por 24 horas; al día siguiente se mide su longitud y se introduce en un recipiente llamado autoclave con 1 litro de agua, el recipiente es completamente hermético, dentro del recipiente se obtiene una presión de 300 PSI por 3 horas, luego de cumplido el tiempo se extrae la barra del recipiente y se espera hasta que alcance la temperatura ambiente, luego se mide su longitud el resultado se expresa en porcentaje.

Resistencia a la compresión. Para realizar esta prueba, se fabrican cubos de una combinación de cemento, arena de sílica (este tipo de arena estandarizada cumple con especificaciones ASTM C778), las dimensiones del cubo son 50*50 mm; se dejan secar en un medio acuoso. A los tiempos 1, 3, 7 y 28 días de haber sido elaborados son sometidos a compresión en un equipo el cual los somete a una presión de 2 KN/seg (kilonewton/segundo), al momento de fracturarse el cubo se obtiene la información de la presión que resiste en N/mm² (newton/milímetro cuadrado).