



UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA INDUSTRIAL

DISEÑO DE NUEVOS CRUDOS BAJOS EN ÁLCALIS PARA LA
DISMINUCIÓN DEL EFECTO DE LA EFLORESCENCIA EN EL
CEMENTO CPC 40 RS

Trabajo de Investigación
para obtener el Título de

Licenciatura en Ingeniería Química Industrial

Presenta:

Marian Guadalupe Hernández Bonilla
Adolfo Barrera Segura

Puebla, Pue., México

(Mayo) de (2022)



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de textos, imágenes, gráficas, 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 de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

NOMENCLATURA

GLOSARIO

RESUMEN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.1.1 Objetivo general.....	1
1.1.2 Objetivos específicos	1
1.2 Justificación	2
1.3 Acerca de Cycna de Oriente S.A. de C.V.....	2

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO	4
2.1 Materias primas	4
2.2 Clinker	6
2.2.1 Fases mineralógicas	7
2.2.2 Reacción de Clinkerización	10
2.2.3 Módulos de Bogue	12
2.3 Cemento Portland	14
2.3.1 Identificación	14
2.4 Fluorescencia de rayos-x	16
2.5 Proceso general para la elaboración del cemento portland.....	18
2.6 Eflorescencia	23
2.6.1 Tipos de sales en eflorescencia.....	24
2.6.2 Mecanismo.....	25
2.6.3 Clasificación de eflorescencia.....	26
2.6.4 Antecedentes	27
2.6.5 Prevención.....	28
2.6.6 Tratamiento.....	29
2.6.7 Contenido de álcalis.....	30

2.6.8	Fotómetro de flama.....	31
CAPÍTULO III		
PARTE EXPERIMENTAL.....		
3.1	Plan de ejecución del trabajo.....	32
3.2	Muestreo.....	33
3.2.1	Materias primas.....	33
3.2.2	Clinker.....	33
3.3	Preparación de materias primas.....	34
3.4	Análisis químico.....	37
3.5	Medición de álcalis.....	38
3.6	Preparación de harina cruda.....	39
3.7	Clinker nivel laboratorio.....	40
3.8	Placas de cemento.....	41
CAPÍTULO IV		
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		
4.1	Análisis químico de las materias primas.....	42
4.2	Resultados de álcalis totales y solubles.....	43
4.3	Propuestas de harinas cruda.....	45
4.3.1	Dosificación.....	47
4.3.2	Composición química.....	49
4.4	Comparación de álcalis.....	51
4.5	Eflorescencia en placas de cemento.....	53
4.6	Comparacion de álcalis con eflorescencia.....	57
CONCLUSIONES.....		
ANEXOS.....		
BIBLIOGRAFÍA.....		

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.2. Partes de un espectrómetro.....	17
Figura 2.3. Línea de proceso para la producción de cemento.	18
Figura 2.4. Placas de cemento con eflorescencia.	23
Figura 2.5. Mecanismo de eflorescencia.	25
Figura 2.6. Fotómetro de flama.	31
Figura 3.2. Banda transportadora de Clinker.....	33
Figura 3.3. Trituradora Retsch.....	34
Figura 3.4. Cuarteo de material.	34
Figura 3.5. Estufa de 100 °C.....	35
Figura 3.6. Molino de ultra finos.....	35
Figura 3.7. Bolsas plásticas.	36
Figura 3.8. Equipo de prensado APM y tableta de muestra.	37
Figura 3.9. Equipo AXIOS MAX.....	37
Figura 3.10. Análisis de Álcalis.....	38
Figura 3.11. Mezcla de 300 gr de harina cruda.	39
Figura 3.12. Nódulos de Harina Cruda y Clinker de laboratorio.	40
Figura 3.13. Mezcladora industrial y placas de cemento.	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Materias primas.	5
Tabla 2.2. Agregados.....	6
Tabla 2.3. Composición Química del Clinker.	7
Tabla 2.4. Composición Mineralógica del Clinker.....	9
Tabla 2.5. Componentes de los cementos.	14
Tabla 2.6. Características especiales del cemento.....	15
Tabla 2.7. Especificaciones Físicas del cemento.....	15
Tabla 2.8. Proceso general de producción de cemento.....	22
Tabla 2.9. Tipos de sales en la eflorescencia.....	25
Tabla 2.10. Tratamientos para la eliminación de eflorescencia.	29
Tabla 3.1. Plan de ejecución de trabajo.....	32

Tabla 4.1. Composición química de las materias primas.	42
Tabla 4.2. Resultados de álcalis solubles y totales.	43
Tabla 4.3. Análisis Químico de Harina Cruda del proceso.	45
Tabla 4.4. Cálculo de módulos de Bogue de Harina Cruda del proceso.	46
Tabla 4.5. Sustitución de materias primas en Caliza-Mezcla.	47
Tabla 4.6. Sustitución de materias primas y composición en correctores.	48
Tabla 4.7. Comparación de composiciones Químicas.	49
Tabla 4.8. Comparación de Módulos de Bogue.	50
Tabla 4.9. Comparación de Álcalis.	51
Tabla 4.10. Comparación de Álcalis equivalentes totales.	51
Tabla 4.11. Comparación de Álcalis Equivalentes Solubles.	52
Tabla 4.12. Presencia de Florescencia en placas de cemento.	56
Tabla 4.13. Comparación de álcalis con eflorescencia.	57

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1. Comparación de Sodio total contra soluble.	44
Gráfica 4.2. Comparación de Potasio total contra soluble.	44

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 2.1. Dosificación de Harina Cruda.	5
Fórmula 2.2. Dosificación de cemento.	5
Fórmula 2.3. Módulo de saturación de Cal.	12
Fórmula 2.4. Módulo de Sílice.	13
Fórmula 2.5. Módulo de Fundente.	13
Fórmula 2.6. Ecuación de álcalis equivalentes.	30
Fórmula 4.1. Área de la placa de cemento.	53

NOMENCLATURA

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
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	Óxido de Azufre
Na_2O	Óxido de Sodio
K_2O	Óxido de Potasio
CO_3Ca	Carbonato de Calcio
H_2O	Agua
$\text{C}_2\text{S} (\text{SiO}_2 \cdot 2\text{Ca})$	Silicato Dicálcico (Belita)
$\text{C}_3\text{S} (\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Ca})$	Silicato Tricalcico (Alita)
$\text{C}_3\text{A} (\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Ca})$	Aluminato Tricalcico (Aluminato)
C_4AF ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)	Ferrito aluminato Tetracálcico (Ferrita)

GLOSARIO

1. **AGLOMERANTE:** Aquel material que son capaces de unir fragmentos de una o más sustancias y dar cohesión al conjunto por efectos de tipo exclusivamente físicos.
2. **AGREGADOS:** Materias primas utilizadas para la dosificación de cemento.
3. **ALCALIS:** Compuestos alcalinos conformados por Sodio y Potasio.
4. **CALIZA-MEZCLA:** Materias primas dosificadas en la pre-homogenización.
5. **CEMENTO PORTLAND:** Es un material conglomerante hidráulico, es decir, que fragua en el agua. Al mezclarse con agua forma una pasta que se va endureciendo por medio de reacciones de hidratación.
6. **CLINKERIZACIÓN:** Es un proceso Químico que introduce materias primas homogenizadas en hornos rotatorios para la formación de Clinker.
7. **CLINKER:** Es el producto resultante de la Harina Cruda después de que pasa por el proceso de clinkerización, siendo este el que más se utiliza para el proceso de fabricación de cemento Portland.
8. **CONGLOMERANTE:** Aquel material que es capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y llevar a cabo cohesión al conjunto por efecto de transformaciones químicas en su masa, que originan nuevos compuestos.
9. **CORRECTORES:** Materias primas utilizadas para la dosificación de Harina Cruda.
10. **DOSIFICACIÓN:** Unión de 2 o más materias primas en proporciones reguladas para realizar una mezcla.

11. EFLORESCENCIA: Fenómeno Físico-Químico que provoca manchas blanquecinas en el cemento.

12. FRAGUADO: Proceso en el cual se lleva a cabo el endurecimiento y pérdida del hormigón, debido a la desecación y re-cristalización de los hidróxidos metálicos originarios de la reacción química entre el agua de amasado y los óxidos metálicos presentes en el Clinker

13. HARINA CRUDA: Materias primas compuestas por caliza-mezcla y correctores.

RESUMEN

En la actualidad el efecto de la eflorescencia en el proceso de fraguado del cemento, es algo indeseable debido al color blanco que aparece sobre las superficies. Dicho efecto provoca una apariencia de humedad filtrada la cual no es agradable a la vista. Por tanto, esto es un tema que se sigue estudiando.

La eflorescencia es básicamente un depósito de sales en la superficie de la construcción. Industrias cementeras como CYCNA de ORIENTE S.A. DE C.V están investigando acerca de cómo disminuir y/o eliminar este fenómeno en los cementos que producen. Datos preliminares muestran que el cemento tipo CPC 40 RS producido en esta planta es el que presenta mayor eflorescencia. Dicho efecto se puede presentar por diferentes factores; sea por condiciones ambientales, tipos de suelo, materiales con altos contenidos de álcalis, entre otros; los cuales se siguen estudiando.

Este proyecto se limita a diseñar crudos bajos en álcalis con el objetivo de cumplir con la norma internacional ASTM C150/C150 M-16 “Standard Specification for Portland Cement” para después calcinar dichas propuestas; y así realizar placas de cemento a nivel laboratorio que sirvan como referencia para reproducir el efecto de Eflorescencia. Finalmente, realizar las observaciones pertinentes que puedan surgir de este proyecto.

El plan de ejecución para este proyecto cuenta con 2 partes principales:

- 1 Análisis de información: Conceptos generales que nos ayuden entender el proceso de fabricación del cemento y que es la eflorescencia.
- 2 Parte experimental: Análisis químico de las materias primas para determinar el contenido de álcalis, diseño de las propuestas, calcinación de muestras diseñadas y realización de placas de cemento.

A partir de los primeros análisis químicos de álcalis realizados al cemento tipo CPC 40 RS, se observa que dichos datos se tienen fuera de especificación con respecto a la norma; por lo que es un primer indicio que aparezca eflorescencia debido al exceso de álcalis.

Por datos confidenciales de proveedor-empresa, no es posible hacer un análisis económico de las propuestas viables para el proceso.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Diseñar diferentes propuestas de Harina Cruda y llevar a cabo la calcinación de éstas para la formación de Clinker y realizar placas de cemento CPC 40 RS libre del fenómeno de la eflorescencia; Cumpliendo con los parámetros o estándares de álcalis equivalentes de acuerdo a lo establecido a la norma internacional ASTM C150/C150 M-16 “standard specification for portland cement”, la cual establece que el contenido de sodio y potasio en el cemento no debe ser mayor al 0.658%.

1.1.2 Objetivos específicos

- Proponer diferentes diseños de crudos bajos en sodio y potasio.
- Analizar y determinar las concentraciones de álcalis en las diferentes materias primas, productos de proceso y productos finales.
- Preparar y Calcinar Harina Cruda a nivel laboratorio para la formación de Clinker.
- Calcular y comparar los álcalis equivalentes del cemento de proceso y las propuestas calcinadas.
- Realizar placas de cemento con las diferentes propuestas establecidas y evaluarlas.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La empresa CYCNA de Oriente S.A. de C.V, ha observado que los cementos que se fabrican presentan el fenómeno de eflorescencia probablemente a la gran cantidad de álcalis que tienen algunas materias primas tales como Arcilla y Arena. Por esta razón, se desea realizar nuevas propuestas de crudo bajos en sodio y potasio.

Con este proyecto se pretende demostrar que si se cumple la norma ASTM C150/C150 M-16 de álcalis equivalentes, se podrá reducir o eliminar el efecto de la eflorescencia presente en el cemento CPC 40 RS.

1.3 ACERCA DE CYCNA DE ORIENTE S.A. DE C.V.

Ubicada en Palmar de Bravo, PUEBLA, México y forma parte de la Industria de Fabricación de Cemento y Productos de Concreto. Tiene un total de 500 empleados en todas sus ubicaciones. Está certificada desde el año 2009, y ha refrendado cada 2 años esta distinción, llevando a cabo prácticas ambientales que van más allá de las exigencias normativas. Tiene las siguientes certificaciones:

- **Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).** Otorga la Certificación de INDUSTRIA LIMPIA a aquellas industrias que llevan a cabo un proceso productivo ambientalmente responsable, garantizando el cumplimiento normativo ambiental.
- **El Organismo Nacional de Normalización de la Construcción y Edificación S.C. (ONNCCE).** Realiza la revisión y actualización de las normas de cemento en México, así como su armonización con normas internacionales, lo que garantiza que la producción de nuestro cemento goce de un prestigio nacional, así como del respaldo y preferencia de los clientes.
- **BUREAU VERITAS CERTIFICATION.** Certifica los sistemas de CYCNA DE ORIENTE en calidad, cuidado al medio ambiente y seguridad y salud ocupacional.



- **ISO 9001**; Norma internacional que especifica los requisitos para un sistema de Gestión de Calidad.
- **ISO 14001**; Norma internacional que ayuda a gestionar e identificar los riesgos ambientales.
- **OHSAS 18001**. Norma internacional encargada de la Gestión de la Seguridad y Salud Ocupacional.
- **ESR**; El Centro Mexicano para la Filantropía (Cemefi) reconoce a las empresas de México que se han sumado al reto de implantar una gestión Socialmente Responsable.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 MATERIAS PRIMAS

Para la elaboración de cemento portland, se requiere utilizar minerales de origen natural tanto productos industriales, dichos minerales contienen compuestos claves para la elaboración de cemento (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3). Estos componentes raramente se encuentran en las proporciones deseadas en una sola materia prima, por lo tanto, se debe de elegir una mezcla de estas para llegar a la composición deseada. En CYCNA de Oriente, utilizan las siguientes materias primas (Tabla 2.1):

MATERIAS PRIMAS	DESCRIPCIÓN	FIGURA
Caliza	Es una roca sedimentaria compuesta principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3), es la materia prima principal para la fabricación de cemento.	
Arcilla	Material natural silíceo-aluminoso, su composición química son principalmente los óxidos de sílice (SiO_2), aluminio (Al_2O_3) y fierro (Fe_2O_3).	



<p>Arena</p>	<p>Son rocas o minerales de tamaño muy pequeño (entre 0,063 y 2 mm) compuesta principalmente por óxido de sílice (SiO₂).</p>	
<p>Hematita</p>	<p>Es la forma mineral del óxido férrico (Fe₂O₃), generalmente de color rojizo.</p>	

Tabla 2.1. Materias primas.

Se fabrica una pre-mezcla la cual consiste de un 80%-90% de la mezcla total que contiene Caliza, Arcilla y Arena, a esta combinación de materiales se llama Caliza-Mezcla. Después son agregados otras materias como Arena, Arcilla y Hematita, las cuales tienen compuestos claves que ayudan a llegar a la composición final deseada por la industria cementera, a estas materias primas se les llama correctores. A la combinación de Caliza-Mezcla con correctores se le llama Harina Cruda.

$$(Caliza + Mezcla) + Correctores = Harina Cruda$$

Fórmula 2.1. Dosificación de Harina Cruda.

Los agregados son aquellos materiales que se adicionan al Clinker en el proceso de molienda del cemento y contienen propiedades adicionales que ayudan al fraguado, la cantidad de estos materiales va a depender del tipo de cemento que se requiera fabricar. Los agregados que utilizan es caliza, yeso y puzolana (Tabla 2).

$$Clinker + Agregados = Cemento$$

Fórmula 2.2. Dosificación de cemento.


MATERIAS PRIMAS	DESCRIPCIÓN	FIGURA
Puzolana	Materiales silíceos o aluminio-silíceos los cuales por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.	
Yeso	En su forma natural, es una roca sedimentaria constituida por sulfato de calcio hidratado, utilizada para regular el tiempo de fraguado.	

Tabla 2.2. Agregados.

2.2 CLINKER

Según la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017, el Clinker es un producto artificial obtenido por sinterización de Harina Cruda, es decir, por la calcinación y sinterización a la

temperatura y durante el tiempo necesario, y por enfriamiento adecuado, a fin de que dichos productos tengan la composición química y la constitución mineralógica requerida.

La Harina Cruda es mezclada lo suficientemente fina, homogénea y adecuadamente dosificada a partir de materias primas que contienen cal (CaO), sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃), óxido férrico (Fe₂O₃) y pequeñas cantidades de otros compuestos mineralógicos, los cuales se clinkerizan. (ONNCCE, 2017)

Su composición Química (Tabla 2.3) puede variar de acuerdo a los crudos propuestos y la calidad del Clinker de la planta cementera. (Duda, 1977)

COMPUESTO	RANGO DE PORCENTAJES
CaO	58%-67%
SiO ₂	16%-26%
Al ₂ O ₃	4%-8%
Fe ₂ O ₃	2%-5%

Tabla 2.3. Composición Química del Clinker.

2.2.1 Fases mineralógicas

Los minerales del Clinker no son una combinación pura, sino fases de cristales mixtos que contiene componentes de otras fases en pequeñas cantidades en enlace cristalino, así como

también las restantes fases químicas que acompañan al Clinker incapaces de formar fases autónomas. Para caracterizar a las principales fases se les dio en nombre de Alita, Belita, Aluminato y Ferrita. (Duda, 1977)

(A) Silicato Tricálcico $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S)

La Alita es el principal compuesto del Clinker, con más cantidad de CaO en el sistema binario CaO-SiO₂, determina de modo decisivo las propiedades cementantes; endurece rápidamente y alcanza resistencias rápidas, tiene 6 modificaciones polimórficas de cristalización.

(B) Silicato dicálcico $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S)

La Belita se produce cuando el Clinker no está totalmente saturado de CaO, teniendo 4 modificaciones polimórficas y dependiendo condiciones de reactor se obtendrá más de una que de otra. Endurece mucho más lentamente que la Alita, sin embargo, en un lapso de tiempo alcanza las mismas resistencias.

(C) Ferrito aluminato tetracálcico $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)

La Ferrita contribuye poco al endurecimiento hidráulico y la reactividad del Clinker, contiene la mayor parte de Aluminio y Hierro lo que provoca el color gris, y si el Clinker es calcinado en condiciones reductoras, provoca un color marrón.

(D) Aluminato tricálcico $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)

El Aluminato puro cristaliza en forma cúbica, sin embargo, cambia a ortorómbica y monoclinica debido a la incorporación de metales alcalinos. Reacciona muy rápidamente en agua, pero sus propiedades hidráulicas no son muy acentuadas y mejora las resistencias iniciales en el cemento.

La composición de las fases mineralógicas va a depender del grado de conversión de la reacción de Clinkerización, las condiciones de operación del reactor y la calidad del

Clinker, para que un Clinker sea de buena calidad, su composición debe de ser conforme a la Tabla 2.4. (Yepes, 2015)

FASE	FORMULA	RANGO
Silicato Di cálcico (Belita)	C_2S ($SiO_2.2Ca$)	5%-30%
Silicato Tricálcico (Alita)	C_3S ($SiO_2.3Ca$)	46%-79%
Aluminato Tricálcico (Aluminato)	C_3A ($Al_2O_3.3Ca$)	6%-18%
Ferrito Aluminato Tetracálcico (Ferrita)	C_4AF ($Al_2O_3.4CaO.FeO_3$)	4%-16%

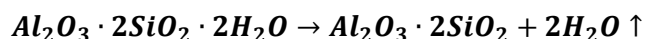
Tabla 2.4. Composición Mineralógica del Clinker.

2.2.2 Reacción de Clinkerización

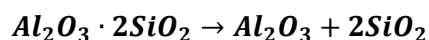
El proceso de Clinkerización consta de dos fases principales, la desintegración de los componentes de la Harina Cruda y la formación de nuevos compuestos (Sánchez, 2022). Las reacciones se van llevando a cabo a diferentes temperaturas a lo largo del precalentador y el Horno rotatorio (Fig. 2.1):

110°C.- Toda la humedad de los diferentes materiales alimentados se evapora. Esto se conoce como secado.

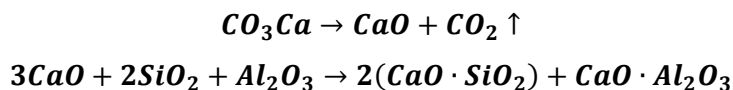
450°C.- Los materiales que tengan agua químicamente unida la pierden y están listos para reaccionar. Esto se llama deshidratación.



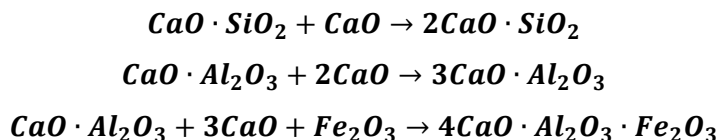
600°C.- Los materiales que perdieron agua en el proceso anterior, empiezan a desintegrar sus componentes y a reaccionar.



600°C.- La caliza pierde el gas carbónico y se convierte en cal viva, lista para reaccionar con el medio ambiente (descarbonatación). Esta cal debe ser llevada rápidamente a la zona de sinterización, ya que de otra manera reaccionará con los gases de combustión y formará anillos o costras, que pueden provocar taponés. La cal viva reacciona con los compuestos libres.

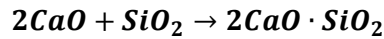


800°C.- Los compuestos formados de sílice y aluminio reaccionan con la cal para la formación de Belita, Aluminato y Ferrita.



1300°C.- El Aluminato empieza a reaccionar con la Ferrita para formar fase líquida. En este líquido se disuelven todos los demás materiales incrementando la reacción entre ellos. Como se trata de un líquido muy adhesivo, empieza a penetrar en los poros del ladrillo refractario, aislados y enfriándose, con lo cual queda pegado a su superficie y se inicia la formación de la costra.

1338°C.- Los materiales disueltos en la fase líquida reaccionan, formándose toda la Belita.



1400°C.- Se ha formado totalmente la fase líquida, un líquido muy viscoso, que le da consistencia a la costra y posteriormente a los nódulos. La Belita formada empieza a reaccionar con la cal que se encuentra en exceso para formar Alita.

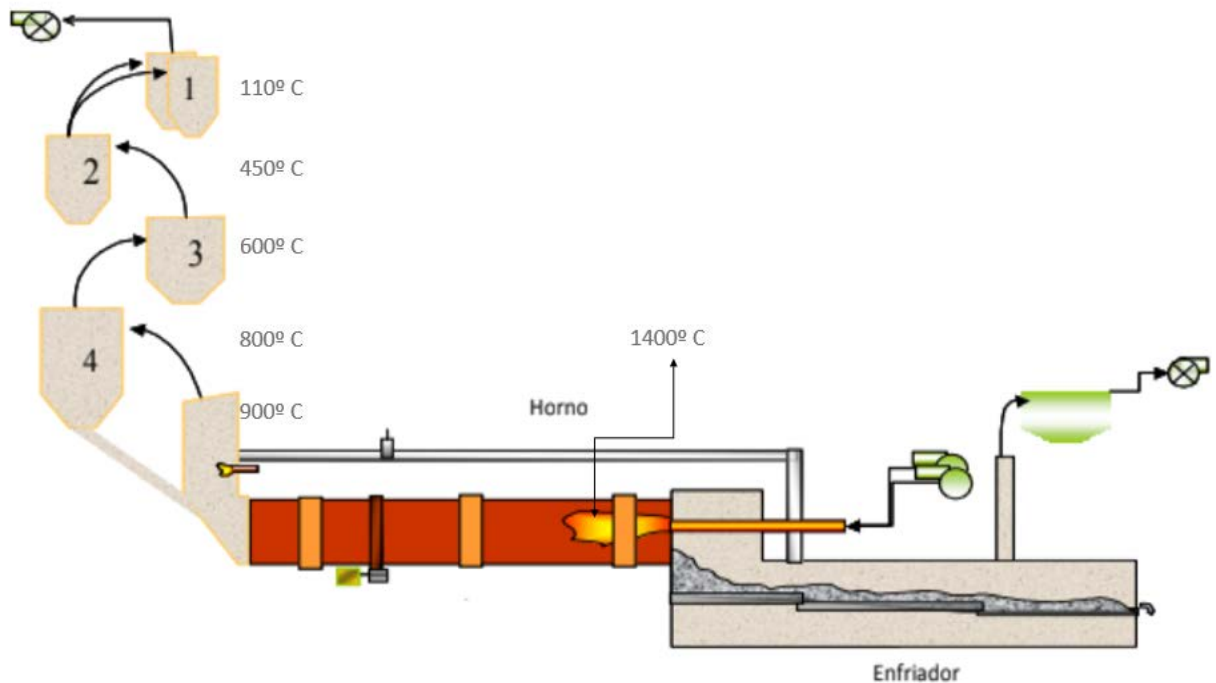


Figura 2.1. Etapas de la reacción de Clinkerización dentro del Horno.

2.2.3 Módulos de Bogue

El investigador R. H. Bogue estableció ecuaciones para calcular anticipadamente cada uno de los compuestos que se pudiera formar conociendo el análisis Químico de las materias primas.

La industria cementera usa estas relaciones adimensionales para conocer el comportamiento del producto a través del Horno y poder dosificar adecuadamente la Harina Cruda con las materias primas que tiene cada industria cementera. Actualmente se utilizan los módulos como un parámetro de control de la calidad del Clinker y de la composición de la mezcla de Harina Cruda. (Duda, 1977)

(A) Módulo de saturación de Cal

La saturación de Cal ocurre cuando toda la sílice se encuentra combinada como Alita, se ha combinado todo el óxido férrico y la alúmina como Ferrita y el exceso de alúmina se ha combinado como Aluminato. Es decir, la relación óptima de Oxido de Calcio para la formación de los productos finales.

$$SC = \frac{100 * CaO}{2.85 * SiO_2 + 1.18 * Al_2O_3 + 0.65 * Fe_2O_3}$$

Fórmula 2.3. Módulo de saturación de Cal.

- El rango típico para el módulo debe estar entre 94-98.
- Un valor mayor de 98 representaría un producto difícil de producir y consumo alto de combustible y Oxido de Calcio sin reaccionar.
- Un valor menor a 90 representaría un producto fácil de calcinar, exceso de costra dentro del Horno y Clinker con resistencias bajas.

(B) Módulo de Sílice

El módulo de Sílice es la relación de sólidos entre líquidos, que permite que la reacción de Clinkerización ocurra a temperaturas menores, provocando la fase líquida.

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

Fórmula 2.4. Módulo de Sílice.

- El rango típico para el módulo debe estar entre 2-3.
- Un valor mayor a 3 representaría un producto difícil de combinar, Clinker polvoso y poca fase líquida.
- Un valor menor a 2 representaría un proceso inestable, formación de anillos y exceso de fase líquida.

(C) Módulo de Fundente

Es la relación entre los dos fundentes, influye significativamente en las características de la fase líquida del Clinker.

$$MF = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Fórmula 2.5. Módulo Fundente.

- El rango típico para el módulo debe estar entre 1.4-1.8.
- Un valor mayor a 2.5 representaría una fase líquida muy viscosa.
- Un valor menor a 1.3 representaría exceso de fase líquida y Clinker sin reaccionar.

2.3 CEMENTO PORTLAND

Según la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017, Cemento Portland Compuesto es el cemento que resulta de la integración de Clinker Portland, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza, este puede ser componente único. (ONNCCE, 2017)

2.3.1 Identificación

Dependiendo el tipo de cemento, la proporción de los componentes debe ser de acuerdo a la Tabla 2.5.

Tipo	Denominación	Clinker Portland + Sulfato de Calcio	Escoria Granulada de Alto Horno	Materiales Puzolánicos	Humo de Sílice	Caliza
CPC	Cemento Portland Compuesto	50%-94%	6%-35%	6%-35%	1%-10%	0%-5%
CPO	Cemento Portland Ordinario	95%-100%	0.00	0.00	0.00	0.00
CPP	Cemento Portland Puzolánico	50%-94%	0.00	6%-50%	0.00	0.00

Tabla 2.5. Componentes de los cementos.

Si el cemento tiene especificada una resistencia a 3 días, se le añade una letra R para resistencias rápidas. En el caso que algún cemento tenga una característica especial se le añade (Tabla 2.6).

Características especiales	Descripción
RS	Resistente a los Sulfatos
BRA	Baja Reactividad Álcali agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

Tabla 2.6. Características especiales del cemento.

El cemento se debe identificar por el tipo y clase de resistencia a que pertenecen y deben cumplir con las especificaciones de expansión y contracción (Tabla 2.7).

Clase Resistente	Resistencia a la compresión (N/mm ²)		Tiempo de fraguado (min)		
	3 días mínimo	28 días min	Máximo	inicial mínimo	inicial máximo
30	-	30	50	45	600
30 R	20	30	50	45	600
40	-	40	-	45	600
40R	30	40	-	45	600

Tabla 2.7. Especificaciones Físicas del cemento.

2.4 FLUORESCENCIA DE RAYOS-X

En la industria cementera se usan diferentes tipos de métodos para el análisis de la composición química de los materiales. Uno de los más utilizados es la fluorescencia de rayos-X.

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra. (Burgos, 2020)

Es un método analítico para determinar la composición química de todo tipo de materiales, pueden ser sólidos, líquidos y polvos. Es utilizado por la eficacia, precisión, rapidez y costos relativamente bajos, para el cual se utiliza un espectrómetro.

Para el análisis se utiliza un espectrómetro (Fig. 2.2), el cual consta de dos partes, el tubo de radiación de rayos-x y el sistema de detección, este puede ser fija o secuencial. El secuencial consta de un goniómetro y este puede medir intensidades de diferentes longitudes.

El espectrómetro inunda de radiación la muestra, el cual difracta los rayos-X con diferentes longitudes de onda en diferentes direcciones, colocando el detector en cierto ángulo y así la intensidad de los rayos-x con cierta longitud de onda puede ser medida. (Brouwer)

La industria cementera se utiliza esta técnica para el análisis de las materias primas, Harina Cruda, Clinker y Cemento.

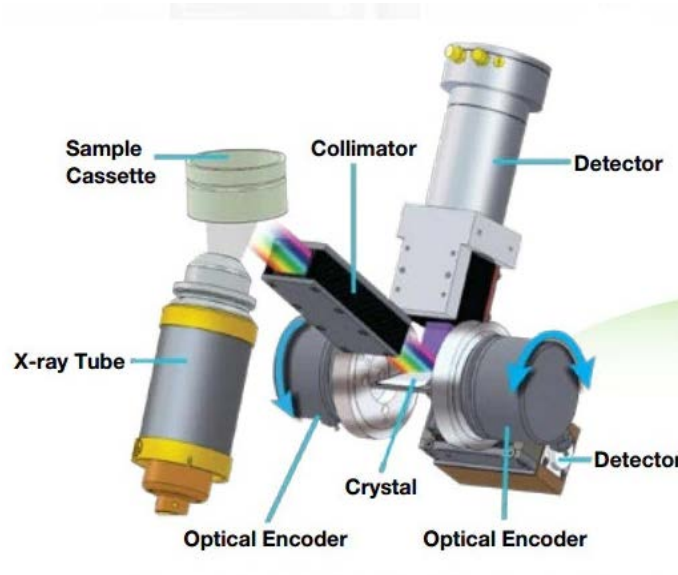


Figura 2.2. Partes de un espectrómetro.

2.5 PROCESO GENERAL PARA LA ELABORACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

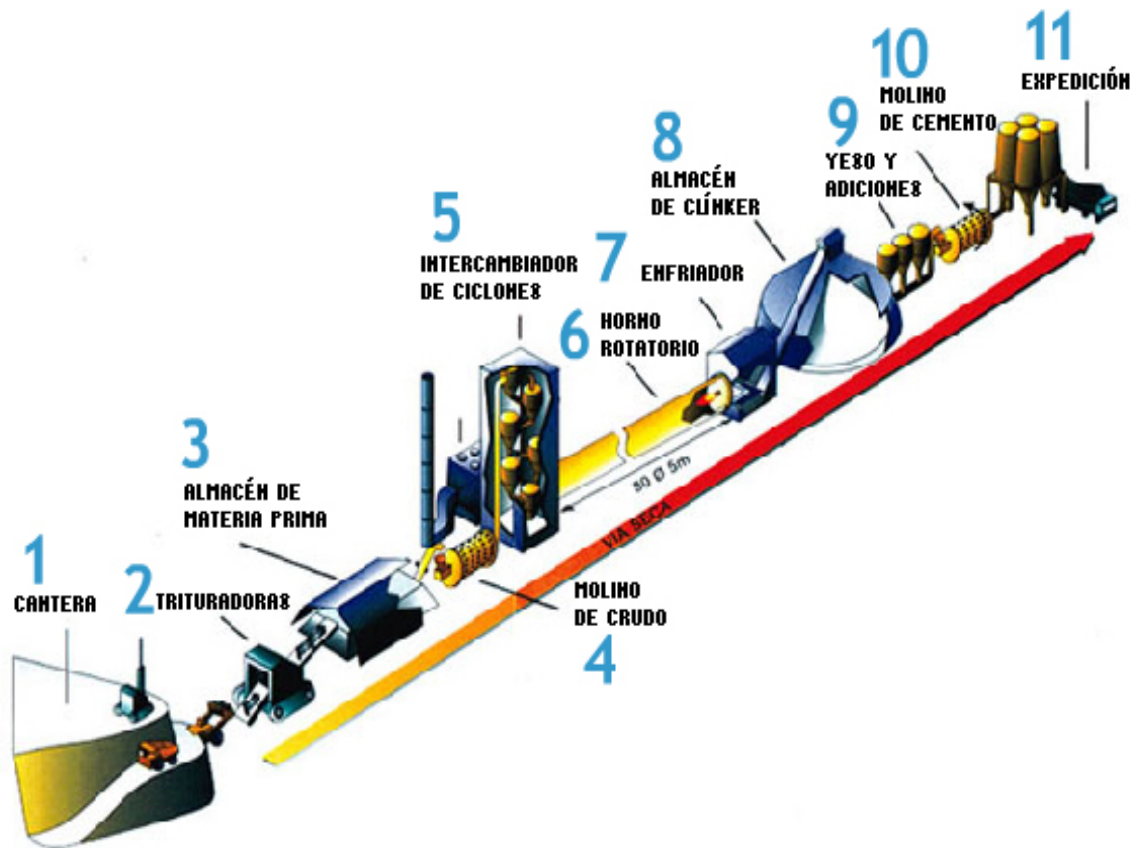


Figura 2.3. Línea de proceso para la producción de cemento.

Para la fabricación de cemento portland, se requiere una secuencia de pasos (Fig. 2.3), en el cual se utilizan diversos equipos industriales con la finalidad de transformar materias primas en cemento listo para la venta. Para la elaboración de cemento portland, CYCNA de Oriente lleva a cabo el proceso de fabricación de cemento vía seca (Tabla 2.8):

LÍNEA	FIGURA
<p style="text-align: center;">Extracción de caliza</p> <p>El proceso comienza con la extracción piedra caliza de la cantera por medio de detonaciones previamente monitoreadas por control de calidad, los cuales se denominan bancos de caliza.</p>	
<p style="text-align: center;">Pre-homogeneización</p> <p>Una vez extraída la caliza, ésta se transporta junto con la arena y arcilla y pasan a un triturador de placas, el cual ayuda a disminuir el tamaño de los materiales y al mismo tiempo prepara la "caliza- mezcla". Esta mezcla se transporta por medio de bandas a un almacén llamado "pre-homogenizador" el cual tiene como objetivo almacenar y homogeneizar la mezcla de caliza, arcilla y arena según la composición deseada por la industria cementera.</p>	

Dosificación de crudo

En esta etapa, se empieza a preparar la mezcla del crudo. Una vez almacenado los materiales, estos son transportados por bandas hacia tolvas dosificadoras, las cuales tienen como función mezclar las materias primas de acuerdo a una composición especificada por el departamento de control de calidad y controlada por el Químico de turno.



Molino de crudo

La mezcla es llevada a un molino vertical, en el cual el material es alimentado en el centro de una mesa y este es empujado hacia la zona de molienda por el giro de la misma y pulverizado con rodillos.

Una vez que el material alcanza un determinado tamaño (75 micras), es levantado por un flujo de gases que pasa por los alrededores de la mesa de trabajo. Estos gases tienen doble función, el secado de los materiales y el transporte al separador.



Precalentador

La mezcla es transportada a los silos de crudo y posteriormente se llevará al precalentador. Este proceso cuenta con etapas o ciclones, los cuales a medida que va descendiendo la mezcla, se incrementara la temperatura. En cada etapa se llevan a cabo procesos físico-químicos endotérmico y es el responsable de suministrar la energía de activación al reactor, con una temperatura inicial de 100°C hasta 900°C. En este proceso ocurre la descarbonatación.



Horno

El horno es un reactor PFR tipo tubular rotatorio, con un largo de 60 metros y un diámetro de 4 m. El tiempo de residencia del material en el horno es de aproximadamente 20 minutos. La mezcla al entrar al horno, llega con una temperatura de 900°C aproximadamente y esta alcanza al final del horno una temperatura de 1450°C. En la parte final del horno, se produce la fusión de varios de los componentes. En la parte final del horno existe un sistema de enfriamiento súbito, formando gránulos de 3/4 pulgada, conocidos como Clinker. Después de que ocurre el proceso de clinkerización, es necesario el proceso de enfriamiento que consiste en una disminución de temperatura súbita para poder transportarlo.



<p style="text-align: center;">Dosificación de cemento</p> <p>Cuando ya se tiene preparado el Clinker es almacenado, posteriormente este y junto con sus agregados se transportan a tolvas dosificadoras. De acuerdo al tipo de cemento a fabricar, se dosificarán agregados.</p>	
<p style="text-align: center;">Molienda de Cemento</p> <p>Los agregados dosificados junto con el Clinker son transportados a un molino vertical muy parecido al de Crudo, con la finalidad de reducir el tamaño a 45 micras, esto es importante para garantizar la homogenización, así como parámetros de calidad.</p>	
<p style="text-align: center;">Envasado y Embarque.</p> <p>El producto de los molinos de cemento es enviado a los silos de almacenamiento para su homogenización, el cual ahí permanece hasta que lo envasan en sacos de papel o lo surten a granel y es enviado al cliente.</p>	

Tabla 2.8. Proceso general de producción de cemento.

2.6 EFLORESCENCIA

De acuerdo a la norma ACI 116R define la eflorescencia como un depósito de sales usualmente blanco, que se forma en la superficie cuando la sustancia en solución emerge del interior del concreto y seguidamente se precipita por reacción, como son la carbonatación o evaporación.

La eflorescencia aparece en la superficie de los muros, formando la mayoría de las veces manchas blanquecinas. La aparición de este fenómeno es desagradable (Fig. 2.4), y suele ocasionar la corrosión de elementos metálicos que se encuentran en contacto con ella. (Marcel, 2005)

A pesar la que eflorescencia no daña la calidad estructural del cemento, visualmente las machas con forma irregulares que se forman no son estéticas. Este fenómeno no es muy evidente en los concretos blancos y puede aparecer sin notarse. Pero en los concretos de otros colores como son los oscuros, el depósito de estas sales es muy evidente. Se ha demostrado que este fenómeno desaparece con el tiempo, pero puede tardar hasta 15 años por lo que el propietario no esperara este lapso de tiempo.



Figura 2.4. Placas de cemento con eflorescencia.

Fuente: Fotografía de CYCNA DE ORIENTE.

2.6.1 Tipos de sales en eflorescencia

Diversas sales han sido encontradas en el análisis de la eflorescencia, generalmente son sulfatos, carbonatos de iones alcalinos (sodio y potasio), alcalino-térreos (calcio y magnesio), cloruros y nitratos. La Tabla 2.9 muestra las sales con sus propiedades:

SALES	PROPIEDADES
CaCO₃	Carbonato de calcio: Exudación de aspecto de velo blanco. No es peligrosa y proviene de la carbonatación del agua de cal.
K₂CO₃ Na₂CO₃	Carbonato de Potasio / Carbonato de sodio: No es peligrosa y es producida por la carbonatación de álcalis.
CaSO₄	Sulfato de calcio: Puede expansionar en formación con los aluminatos de cemento.
K₂SO₄ Na₂SO₄	Sulfato de sodio/Sulfato de potasio: Fácilmente cristalizables y solubles.
MgSO₄	Sulfato de magnesio: Se presenta con escasa frecuencia, muy soluble y fácilmente cristalizables.
NaNO₃ KNO₃	Nitrato de sodio / Nitrato de potasio: Forman el salitre. Muy solubles y cristalizables, se caracterizan por provenir de material en descomposición.
NaCl	Cloruro de sodio: Muy soluble y cristalizables. No es peligrosa.
CaCl₂	Cloruro de calcio: Proviene de aditivos del NaCl con cal al mortero. Muy soluble y peligrosa debido a que ataca los pigmentos y favorece el crecimiento de mohos.
BaCO₃ BaSO₄	Carbonato de Bario / Sulfato de Bario: Muy poco solubles, por ello se utilizan en la fabricación de ladrillos para que desplacen las formaciones de sales más

	solubles.
--	-----------

Tabla 2.9. Tipos de sales en la eflorescencia.

Fuente: Osuna, J. (14 de abril de 2015).

2.6.2 Mecanismo

Algunas de estas sales solubles en agua son transportadas por acción de la capilaridad a través de los poros o red capilar y se depositan en la superficie del material cuando se evapora el agua de la mezcla por efecto tanto de los rayos solares como del aire y condiciones climáticas del medio ambiente (Construmática, 2015). Esta eflorescencia al depositarse en la superficie del material, adquiere la característica de un polvillo fino de color variable dependiendo del tipo de sales que estén formados los cristales (Chapman, 2014).



Figura 2.5. Mecanismo de eflorescencia.

2.6.3 Clasificación de eflorescencia

Existen dos tipos de eflorescencia:

(A) Eflorescencia primaria

Este tipo de eflorescencia aparece por la humedad de la construcción recién terminada, generalmente desaparece a los pocos meses y es inevitable (Chapman, 2014). Las sales solubles que se presentan son potasio, cloro o sodio. Estas se precipitan por primera vez hacia el exterior cuando la construcción ha finalizado. A partir de aquí, ya se pueden ir observando manchas de color variable en el exterior.

(B) Eflorescencia secundaria

Al contrario de la eflorescencia primaria, estas aparecen en construcciones con más de un año de antigüedad, esto es debido a la porosidad de los materiales que fueron usados en la obra, humedades persistentes, defectos en la obra. Este tipo de eflorescencia son evitables con la técnica adecuada al momento de la construcción, sin embargo, si aparecen en la posterioridad son más difíciles de tratar que la de tipo primaria (Construmática, 2015).

2.6.4 Antecedentes

En general, para que se presenten eflorescencias en la superficie de concreto, deben coexistir aspectos tales como: existencia de sales solubles; una fuente de agua que esté en contacto con estas sales y que formen una solución salobre, y una vía para que dicha solución se traslade a la superficie, donde se evapora y deja un depósito de sal. (Vidaud, 2013).

De acuerdo a Construmatica las causas derivadas por los materiales dependen mucho del tipo instrumento que se utilice en la obra. Los materiales pueden contener grandes cantidades de sales, debido a la composición química de estas al momento de manufacturarlas y a las altas temperaturas que se someten.

Entre las causas de las eflorescencias derivadas por el medio ambiente se tiene (Chapman, 2014):

- El viento y la lluvia por permitir el ingreso del agua al mortero y a la cerámica, lo que produce la disolución de las sales.
- El agua utilizada en la construcción, lo que para algunos lugares puede contener elevadas sales como por ejemplo el agua de pozo.
- El suelo donde se construye debido a que en muchas ocasiones contiene grandes cantidades de sales que originan la eflorescencia, por ello cuando se tiene contacto directo con las paredes y muros, agregando la humedad del mismo es muy probable que se acumulen estos cristales.

2.6.5 Prevención

Para evitar la aparición de eflorescencias es importante e indispensable prevenir y tratar todo tipo de humedades, sobre todo aquellas que son causadas por filtración interna o por capilaridad (Chapman, 2014). A continuación, se presentan los consejos para evitar la eflorescencia:

- Mantener tapados todos los elementos de la construcción y no apilarlos sobre una superficie salina.
- Si el terreno donde se ubicará la vivienda es relativamente húmedo, se debe con anterioridad impermeabilizar todos los muros y tratar las posibles fisuras o filtraciones que existan.
- Vigilar y evitar sobre todo que durante la construcción se mojen excesivamente los ladrillos y otros materiales de construcción.
- Evitar la penetración anormal de agua o humedad en los muros o paredes, sobre todo en las caras que son menos expuestas a la evaporación.
- Es de vital importancia que el constructor no utilice adhesivos o morteros que contengan cantidades considerables de azufre o sulfatos.

2.6.6 Tratamiento

Es importante considerar el tipo de tratamiento se aplicará para la eliminación de eflorescencia ya que la selección de un tratamiento no adecuado puede dar lugar a manchas en la pared ajenas a la eflorescencia. Sin embargo, existe un método sencillo para eliminar la eflorescencia consiste en disolver los cristales presentes con agua a presión y después retirarlos con un cepillo de cerdas duras. La Tabla 2.10, muestra el tipo de tratamiento que se debe seleccionar de acuerdo al color de la eflorescencia:

COLOR	NATURALEZA	METODO DE CURADO
Blancas	Sulfatos	<ul style="list-style-type: none"> • Cepillado y lavado con agua. • Lavado con jabón sódico al 1%.
	Carbonatos	<ul style="list-style-type: none"> • Lavado con agua. • Lavado con ácido clorhídrico (HCl). Al 1.5.
	Sulfatos y carbonatos	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamientos usando siliconas para impermeabilizar el ladrillo.
Amarillo/verdoso	Vanadio	<ul style="list-style-type: none"> • Lavar con agua destilada y una solución de soda caustica. • Tratar con derivados de ácido Etilendiaminotetraacético (EDTA).
	No vanadio	<ul style="list-style-type: none"> • Lavar con ácido acético diluido unas 15 veces y peróxido de hidrogeno de 20 volúmenes.

Tabla 2.10. Tratamientos para la eliminación de eflorescencia.

Fuente: Rincón, J., & Romero, M. (2000). Fundamentos y clasificación de las eflorescencias en ladrillos de construcción. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.

2.6.7 Contenido de Álcalis

El cemento Portland es la fuente más importante de álcalis en el concreto, estos son comúnmente expresados en términos de óxido de sodio equivalente; $\%Na_2O_{eq} = \%Na_2O + 0.658*\%K_2O$ (Latifee, 2013). Los álcalis en forma de $\%Na_2O_{eq}$ usualmente varían entre 0.2 a 1.3 % en masa de cemento (Hewlett and Liska, 2019). En comparación con los otros óxidos que componen el cemento (ej: sílice, calcio) el sodio equivalente es relativamente pequeño, pero estos son altamente solubles y determinan la alcalinidad de la solución de poros. Se ha reportado en la literatura que la concentración de iones $-OH$ en la solución de poros está directamente relacionada con los óxidos equivalentes del cemento (Lindgärd et al., 2012).

La norma ASTM C1778-19a establece que durante la hidratación del cemento se generan soluciones alcalinas con pH mayores a 12.5 que consiste, principalmente, en hidróxidos alcalinos disueltos (iones de K^+ , Na^+); Generalmente la fuente más importante de álcalis en el concreto convencional es el cemento. El contenido de álcali se expresa como el contenido del óxido de sodio y potasio, evaluados de acuerdo a la norma ASTM C150/C150 M-16 para cementos hidráulicos usando la siguiente fórmula (ASTM, 2016):

$$\%Na_2O + \%0.658K_2O = \%Na_2O_{equivalente}$$

Fórmula 2.6. Ecuación de álcalis equivalentes.

2.6.8 Fotómetro de Flama

El fotómetro de flama se basa en el hecho de que los componentes metálicos de la tierra, álcalis y alcalinos (Fig. 2.6), pueden ser térmicamente disociados en una flama y que parte de los átomos que se producen, estarán excitados con un mayor nivel de energía. Cuando estos átomos vuelven al estado de equilibrio emiten radiación que está situada principalmente en la región visible del espectro. Cada elemento emitirá radiación a la longitud de onda específica de ese elemento.

Por encima de ciertos rangos de concentración, la intensidad de emisión es directamente proporcional al número de átomos que vuelven al estado de equilibrio. Esto es a su vez proporcional a la cantidad absoluta de compuestos volatilizados en la flama, por tanto: la luz emitida es proporcional a la concentración de la muestra. Puede deducirse que, si la luz emitida por el elemento en su longitud de onda característica es aislada por un filtro óptico y la intensidad de esta luz medida por un fotodetector, entonces se obtiene una señal eléctrica proporcional a la concentración de la muestra. Tal señal eléctrica puede ser procesada y obtenida la lectura en forma digital o analógica (Jenway).



Figura 2.6. Fotómetro de flama.

CAPÍTULO III

PARTE EXPERIMENTAL

3.1 PLAN DE EJECUCIÓN DEL TRABAJO

Para la realizar este experimento se realizaron las siguientes actividades (Tabla 3.1):

DEL 8 FEB AL 26 JULIO DEL 2021	PLAN DE EJECUCION DE ACTIVIDADES					
ACTIVIDADES	MESES (SEMANAS)					
	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO
Introducción	■					
Pruebas de calidad	■					
Teoría del proceso	■					
Muestreo		■				
Molienda de materiales		■				
Análisis químico de Materias primas			■			
Análisis de Álcalis totales			■			
Análisis de Álcalis solubles			■			
Diseño de nuevos crudos			■			
Preparación de nuevos crudos			■	■		
Calcínación de propuestas			■	■		
Preparación para los análisis			■	■	■	
Análisis químico vía rayos x de cada propuesta				■	■	
Análisis químico de los Clinker vía rayos X					■	■
Preparación de placas de cemento					■	■
Observación de la eflorescencia en cada placa						■
Conclusiones						■

Tabla 3.1. Plan de ejecución de trabajo.

3.2 MUESTREO

Para realizar los análisis químicos, primero se tuvo que muestrear y preparar las materias primas de acuerdo a los procedimientos internos de la planta cementera y la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017. (ONNCCE, 2017)

3.2.1 Materias primas

El muestreo que se aplicó fue de tipo aleatorio simple. Para cada materia prima se recolectó alrededor de 5 kg (Fig. 3.1).



Figura 3.1. Muestreo de materias primas.

3.2.2 Clinker

El Clinker que sale del enfriador como producto obtenido de la Harina cruda, pasa por unas bandas que llevan directo al silo de Clinker (Fig. 3.2), dentro de estas bandas se muestrea el producto conforme al procedimiento interno de la planta cementera.



Figura 3.2. Banda transportadora de Clinker.

3.3 PREPARACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

Una vez finalizado el muestreo en campo, se llevan las muestras al laboratorio para empezar a preparar los materiales. De acuerdo al instructivo de trabajo, se deben de realizar los siguientes pasos:

- (A) **Reducción de tamaño del material:** Como primer paso se llevan las materias primas a la trituradora Retsch con la finalidad de reducir su tamaño a un promedio de 1 cm (Fig. 3.3).



Figura 3.3. Trituradora Retsch.

- (B) **Cuarteo:** El material reducido en tamaño pasa de 3 a 4 veces por el cuarteo (Fig. 3.4) con la finalidad de reducir la cantidad de material que pasará por el molino de ultra finos y este aun siga siendo una muestra representativa.



Figura 3.4. Cuarteo de material.

(C) Secado: Una vez el material cuarteado, se pasan a una estufa de 100°C (Fig. 3.5) para que la humedad que tenga el material se evapore y este pueda ser analizado de manera que el agua de los materiales no afecte en el análisis y pueda ser prensado con facilidad.



Figura 3.5. Estufa de 100 °C.

(D) Molienda de ultra finos: Después se pasa por el molino Herzog o también denominado molino de ultra finos (Fig. 3.6), para pulverizar la muestra y que el tamaño de partícula se en promedio a 75 micras, esto nos ayudara a que el material se pueda prensar, los materiales se combinen y que reaccione con mayor facilidad.



Figura 3.6. Molino de ultra finos.

(E) Almacenamiento: Para almacenar las muestras se optó por bolsas de plástico las cuales se etiquetan con el nombre del material y fecha (Fig. 3.7).

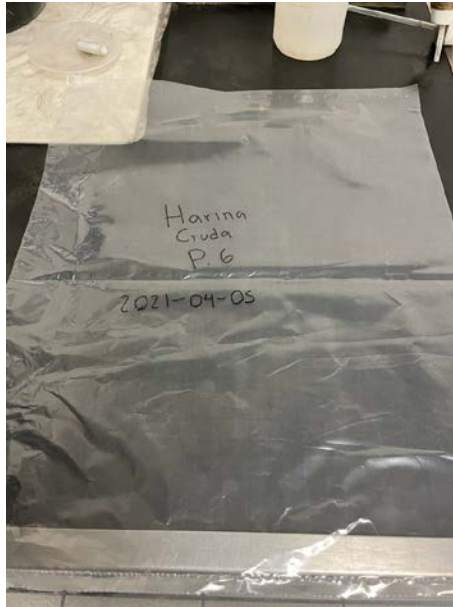


Figura 3.7. Bolsas plásticas.

3.4 ANÁLISIS QUÍMICO

(A) **Prensado:** Para analizar las muestras, antes se tienen que pasar en una prensa Hidráulica para formar una tableta (Fig. 3.8), el equipo de POLISYUS POLAB APM lo realiza de forma semiautomática, para eso se pesaron 12 gramos de la muestra en una balanza analítica, posteriormente se colocó en un cubilete, este se llevó al equipo APM, el cual prensa en una tableta el material a una presión de 80 KN y realiza la limpieza de la tableta lista para su análisis en Rayos X.



Figura 3.8. Equipo de prensado APM y tableta de muestra.

(B) **Rayos X:** Para el análisis Químico se usó el Espectrómetro de Florescencia AXIOS MAX (Fig. 3.9), el cual calcula la concentración de acuerdo a una curva de calibración establecida (Anexo 1).



Figura 3.9. Equipo AXIOS MAX.

3.5 MEDICIÓN DE ÁLCALIS

Álcalis solubles

Para el análisis de álcalis solubles, se mide la concentración de acuerdo al instructivo interno de la industria cementera. Se pesan 0.5 gramos de la muestra y se depositan en un vaso precipitado de 250 ml con 100 ml de agua des-ionizada y un agitador magnético. Posteriormente se colocan en una parrilla agitadora por 10 minutos. Filtrar en papel Whatman No. 41 y un matraz volumétrico de 500 ml y medir en fotómetro de flama (Fig. 3.10).



Figura 3.10. Análisis de Álcalis.

3.6 PREPARACIÓN DE HARINA CRUDA

Para la preparación de Harina Cruda, se agregó las materias primas según la dosificación propuesta, usando una base de cálculo de 300 gramos totales, se mezcló todos los materiales previamente preparados en una bolsa plástica, homogenizando con agitaciones constantes durante 15 minutos, así como se muestra en la Fig. 3.11.



Figura 3.11. Mezcla de 300 gr de harina cruda.

3.7 CLINKER NIVEL LABORATORIO

Para la cocción de Clinker, se pesan 200 gramos de crudo y se coloca en una bolsa plástica, posteriormente se agrega alcohol etílico para hacer una masa con consistencia suave. Una vez hecha la masa se realiza nódulos de aproximadamente 1.5 cm de diámetro. Se coloca en un vidrio de reloj y se lleva a la estufa a 100°C durante 4 horas para que se evapore el alcohol. Finalmente se calcina en una mufla a 1450°C durante 40 minutos en un crisol de platino con la finalidad de emular el proceso de Clinkerización dentro del Horno (Fig. 3.12).



Figura 3.12. Nódulos de Harina Cruda y Clinker de laboratorio.

3.8 PLACAS DE CEMENTO

Basándose en la composición de un CPC 40 RS de la industria cementera, se elaboraron placas de cemento:

- 86% Clinker
- 10% Caliza
- 4% Yeso

El Clinker Previamente hecho en el laboratorio, se la agrega las proporciones de materias primas faltantes para hacer un cemento CPC 40 RS a una base de 100 gramos totales, agregando 1 gramo de pigmento para cemento color negro y así poder observar mejor el fenómeno de la eflorescencia (Se homogenizo en una bolsa plástica todos los materiales).

La mezcla se hizo de acuerdo al instructivo interno de la industria, agregando una proporción de 2.75 gramos de arena graduada, 0.45 gramos de agua por cada gramo de cemento, posteriormente se mezcla todos los materiales en una mezcladora industrial a 270 rpm y dejando reposar durante 24 horas a temperatura ambiente en charolas de moldeo (Fig. 3.13).



Figura 3.13. Mezcladora industrial y placas de cemento.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MATERIAS PRIMAS

Se analizaron todas las materias primas como se mostró en el capítulo 3.4. A continuación, se presentan los resultados:

Compuestos	MATERIAS PRIMAS									
	Caliza	Arena 1	Arena 2	Arcilla 1	Arcilla 2	Arcilla 3	Arcilla 4	Puzolana	Hematita	Yeso
%SiO ₂	1.14	74.16	95.17	56.00	56.96	39.13	79.71	60.52	18.68	7.67
%Al ₂ O ₃	0.33	13.52	0.95	17.96	18.24	30.69	12.45	0.65	0.65	1.23
%Fe ₂ O ₃	0.12	1.31	0.22	6.22	6.03	10.74	1.17	3.52	62.16	0.43
%CaO	54.44	1.83	0.53	5.74	4.82	2.45	0.66	7.59	8.21	29.10
%MgO	0.28	0.12	0.09	2.54	1.58	0.06	0.09	0.85	0.00	1.55
%SO ₃	0.07	0.01	0.25	0.06	0.05	0.11	1.26	0.43	0.16	39.29
%Na ₂ O	0.00	4.27	0.00	2.60	2.57	0.65	0.40	2.83	0.01	0.13
%K ₂ O	0.05	3.77	0.24	0.95	0.80	0.00	0.71	2.73	0.11	0.21

Tabla 4.1. Composición química de las materias primas.

En la Tabla 4.1 muestra el análisis químico de cada materia prima. En color verde se observa el compuesto clave de cada uno de los materiales y en color amarillo se observa cuantos álcalis tiene en porcentaje masa.

En este análisis se observa que la Arena 1 tiene más álcalis que los otros correctores de Silicio, por lo tanto, para reducir la proporción de Sodio y Potasio en la mezcla de Crudo, se necesita reducir la cantidad de Arena 1 en el proceso o cambiarla por alguna de las otras opciones. Se observa que la Arcilla 3 y Arcilla 4, son opciones viables por la baja cantidad de álcalis que aportan.

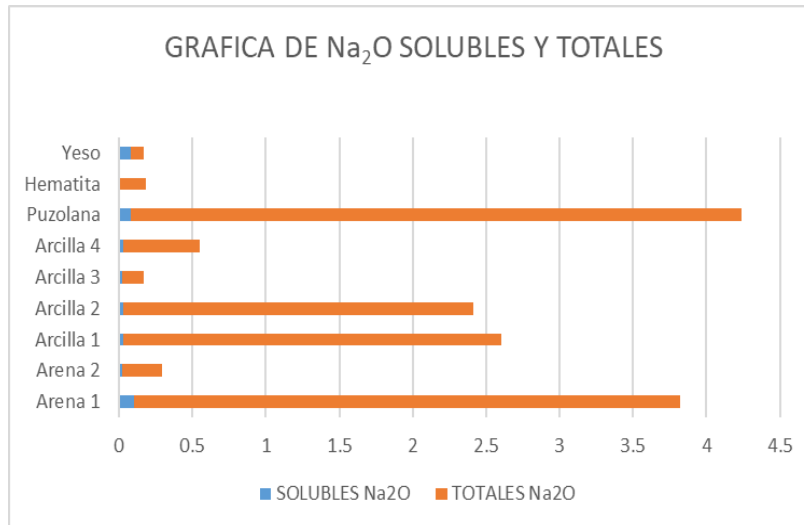
4.2 RESULTADOS DE ÁLCALIS TOTALES Y SOLUBLES

Como se vio en el capítulo 2.6.7, uno de los factores de la presencia de eflorescencia está en la solubilidad de Sodio y Potasio. Se analizó en el laboratorio Químico los álcalis solubles de cada una de las materias primas como se mostró en el capítulo 3.5.

VIA HUMEDA				
Materia Prima	SOLUBLES		TOTALES	
	% K ₂ O	% Na ₂ O	% K ₂ O	% Na ₂ O
Caliza	0.00	0.06	0.55	0.27
Arena 1	0.03	0.10	3.50	3.72
Arena 2	0.00	0.02	0.27	0.27
Arcilla 1	0.00	0.03	0.88	2.57
Arcilla 2	0.00	0.03	0.24	2.38
Arcilla 3	0.00	0.02	0.12	0.15
Arcilla 4	0.00	0.03	0.66	0.52
Puzolana	0.00	0.08	3.11	4.16
Hematita	0.00	0.01	0.24	0.17
Yeso	0.00	0.08	0.03	0.09

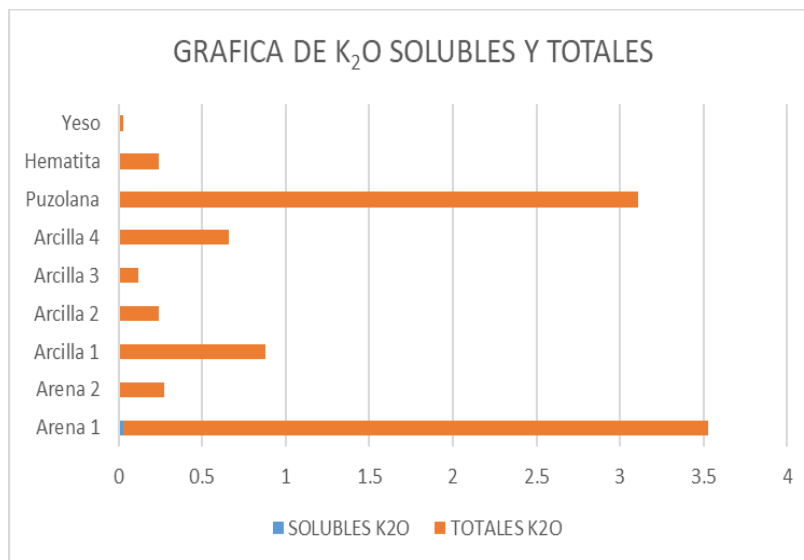
Tabla 4.2. Resultados de álcalis solubles y totales.

La Tabla 4.2 muestra que la materia prima con más solubilidad de álcalis es la Arena 1, sin embargo, se puede observar que no hay relación entre álcalis totales y álcalis solubles, por ejemplo, el caso de la Arcilla 1, a pesar de que tiene un alto porcentaje de álcalis totales, no tiene gran cantidad de álcalis solubles.



Gráfica 4.1. Comparación de Sodio total contra soluble.

En la Gráfica 4.1 se observa que poca materia prima de esta industria cementera tiene un porcentaje de Sodio soluble que se pudiera considerar para la dosificación de un Crudo, resaltando el resultado de Arena 1 y Puzolana, como materias primas a considerar.



Gráfica 4.2. Comparación de Potasio total contra soluble.

En la Gráfica 4.2 se observa que ninguna materia prima tiene un porcentaje de potasio soluble considerable para la dosificación de un crudo, siendo este un factor que no afecta la presencia de eflorescencia para esta industria cementera.

4.3PROPUESTAS DE HARINAS CRUDA

Las materias primas que se usan para dosificación de Harina Cruda en esta industria cementera son: Arcilla 1, Arcilla 2, Arena 1, Arena 2, Hematita. Se analizó Químicamente la Harina Cruda como se vio en el capítulo 3.4, con el objetivo de tener un parámetro de referencia de la cantidad de álcalis.

Compuesto	Crudo de Proceso
%SiO ₂	14.15
%Al ₂ O ₃	3.38
%Fe ₂ O ₃	2.36
%CaO	43.12
%MgO	0.64
%SO ₃	0.17
%Na ₂ O	0.59
%K ₂ O	0.34

Tabla 4.3. Análisis Químico de Harina Cruda del proceso.

En la Tabla 4.3 muestra la composición Química de la Harina Cruda del proceso, resaltando con color amarillo la cantidad de Sodio y Potasio. Se sabe que, con esta cantidad de Álcalis en el proceso, provoca el efecto de la eflorescencia, se pretende demostrar que reduciendo esta cantidad de Álcalis se puede disminuir o eliminar este efecto.

Con el análisis Químico de la Harina Cruda del proceso, se calcularon los módulos de Bogue con las Fórmulas (3, 4 y 5).

Módulos	Calculados
SC	95.52
MS	2.47
MF	1.43

Tabla 4.4. Cálculo de módulos de Bogue de Harina Cruda del proceso.

La Tabla 4.4 muestra que los parámetros de control de la industria, tienen las condiciones óptimas de operación para la elaboración de un Clinker de Calidad, como se vio en el capítulo 2.2.3.

Las propuestas se diseñaron a partir de las composiciones analizadas de cada materia prima y la cantidad de álcalis totales y solubles que tienen. Se propusieron 6 nuevos diseños de Harina Cruda. Se establecieron parámetros de control similares a las de la empresa:

- SC= 96-98
- MS= 2.43-2.47
- MF= 1.40-1.50

4.3.1 Dosificación

Se usó la herramienta de Excel para calcular las composiciones Químicas de las propuestas usando la Tabla 4.1 y las Fórmulas (1 y 2). El balance de materia de las composiciones Químicas de cada propuesta se muestra en el Anexo 2.

En las propuestas, se sustituyeron materias primas y se decidió conservar la composición de la Caliza-Mezcla que es:

- 85% Caliza
- 3% Arena
- 12% Arcilla

CALIZA MEZCLA			
Proceso	Caliza	Arena 1	Arcilla 1
A	Caliza	Arena 1	Arcilla 1
B	Caliza	Arena 2	Arcilla 3
C	Caliza	Arcilla 4	Arcilla 1
D	Caliza	Arcilla 4	Arcilla 2
E	Caliza	Arena 1	Arcilla 3
F	Caliza	Arena 1	Arcilla 2

Tabla 4.5. Sustitución de materias primas en Caliza-Mezcla.

En la Tabla 4.5 podemos observar que se sustituyó la Arena 1 por Arena 2 y Arcilla 4. Observando la Tabla 4.1, podemos inferir que la Arcilla 4 tiene composición Química parecida a una Arena, pero con menor contenido de álcalis, por esta razón se decidió sustituir la Arena 1 por la Arcilla 4. También la Arcilla 1 cambio por Arcilla 2 y 3.

En la dosificación de correctores, se sustituyeron tanto materias primas como composiciones para llegar a los módulos de Bogue deseados (Tabla 4.6).

CORRECTORES					
Proceso	Caliza Mezcla	Arcilla 2	Arena 2	Hematita	Total
	89.48%	7.11%	1.90%	1.51%	100.00%
A	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Total
	90.17%	3.28%	4.73%	1.82%	100.00%
B	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	TOTAL
	89.95%	0.03%	8.10%	1.92%	100.00%
C	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	TOTAL
	90.10%	3.67%	4.41%	1.82%	100.00%
D	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	TOTAL
	89.92%	3.83%	4.30%	1.95%	100.00%
E	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	TOTAL
	88.18%	0.34%	9.39%	2.09%	100.00%
F	Caliza Mezcla	Arcilla 2	Arena 2	Hematita	TOTAL
	91.91%	3.97%	2.14%	1.98%	100.00%

Tabla 4.6. Sustitución de materias primas y composición en correctores.

Se sustituyó la Arcilla 2 por Arcilla 3. Se decidió conservar la Arena 2 por contenido menor de álcalis y la cantidad de SiO₂ que tiene, facilitando llegar a la composición deseada.

4.3.2 Composición Química

Una vez calculado el balance de materia de las propuestas, se comparó con el del proceso, obteniendo valores similares en los 4 óxidos principales (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y CaO). Esto es esperado por el parámetro de control elegido y obteniendo valores bajos de álcalis.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE HARINA CRUDA							
Compuestos	Proceso	A	B	C	D	E	F
% SiO_2	14.15	14.20	14.24	14.16	14.12	14.23	14.22
% Al_2O_3	3.38	3.48	3.50	3.47	3.46	3.45	3.43
% Fe_2O_3	2.36	2.31	2.33	2.31	2.3	2.38	2.39
% CaO	43.12	43.54	43.71	43.46	43.31	43.64	43.92
% MgO	0.64	0.50	0.3	0.51	0.37	0.30	0.57
% SO_3	0.17	0.03	0.05	0.12	0.11	0.03	0.02
% Na_2O	0.59	0.42	0.17	0.34	0.27	0.23	0.49
% K_2O	0.34	0.27	0.12	0.19	0.14	0.16	0.29

Tabla 4.7. Comparación de composiciones Químicas.

La Tabla 4.7 muestra la composición química de la Harina Cruda del proceso y las propuestas, se observa que la Harina Cruda del proceso tiene la mayor cantidad de Álcalis, tanto de Sodio como Potasio. Por lo tanto, se puede afirmar que, al variar las materias primas reduce la cantidad de álcalis en la Harina Crudo.

Se calcularon los módulos de Bogue con las Fórmulas (3, 4 y 5) y se obtuvo valores dentro de rango (Tabla 4.8). Siendo propuestas calcinables.

MÓDULOS DE BOGUE							
Módulos	Proceso	A	B	C	D	E	F
SC	95.52	95.99	96.01	96.03	95.99	96.00	96.70
MS	2.47	2.45	2.43	2.45	2.45	2.44	2.44
MF	1.43	1.50	1.50	1.50	1.50	1.47	1.43

Tabla 4.8. Comparación de Módulos de Bogue.

4.4 COMPARACIÓN DE ÁLCALIS

Usando la Tabla 4.1 y la composición química de un cemento CPC 40 RS (Capítulo 3.8). Se calculó la composición química de los cementos como se muestra en el Anexo 2.

El contenido total de álcalis se muestra en la Tabla 4.9:

	Proceso	Propuesta A	Propuesta B	Propuesta C	Propuesta D	Propuesta E	Propuesta F
%Na ₂ O	0.76	0.56	0.23	0.45	0.36	0.31	0.65
%K ₂ O	0.41	0.36	0.17	0.27	0.20	0.22	0.39

Tabla 4.9. Comparación de Álcalis.

Se calculó el contenido Álcalis Equivalentes, usando la Fórmula 6 con la Tabla 4.9.

Propuesta	Álcalis Equivalentes totales
Proceso	1.04 %
A	0.79 %
B	0.34 %
C	0.63 %
D	0.49 %
E	0.45 %
F	0.91 %

Tabla 4.10. Comparación de Álcalis equivalentes totales.

La Tabla 4.10 muestra el contenido total de álcalis que tiene el cemento CPC 40 RS del proceso y las propuestas. Se tomó como base el resultado de álcalis equivalentes totales del proceso, sabiendo que, con esta cantidad se forma el fenómeno de la eflorescencia. Las propuestas B, C, D y E se encuentran dentro de la norma ASTM C150/C150 M-16.

Como ya se mencionó en capítulos anteriores la cantidad de álcalis solubles también es considerable. Con la misma fórmula, se calculó la cantidad de álcalis equivalentes solubles que tiene cada propuesta (Anexo 3).

Propuesta	Álcalis Equivalentes solubles
Proceso	0.0803 %
A	0.0806 %
B	0.0760 %
C	0.0774 %
D	0.0780 %
E	0.0784 %
F	0.0820 %

Tabla 4.11. Comparación de Álcalis Equivalentes Solubles.

La Tabla 4.11 muestra la cantidad de álcalis solubles que tiene el proceso y cada propuesta, se observa que no encuentra relación entre la cantidad de álcalis solubles conforme a lo totales. Entonces podemos inferir que la solubilidad de los álcalis va depender de la materia prima utilizada en la preparación de Harina Cruda, sin importar la cantidad de álcalis totales que tenga cada materia prima.

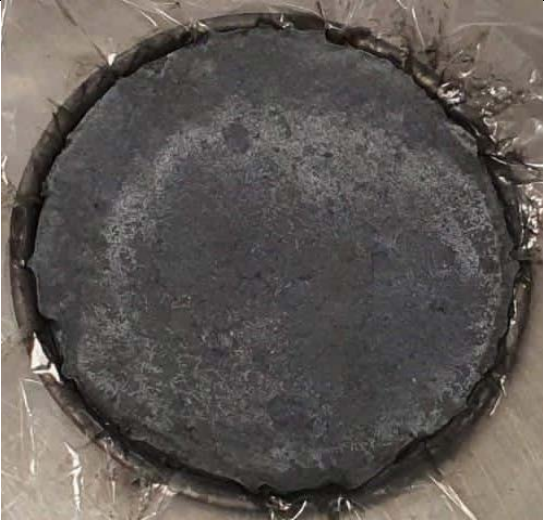
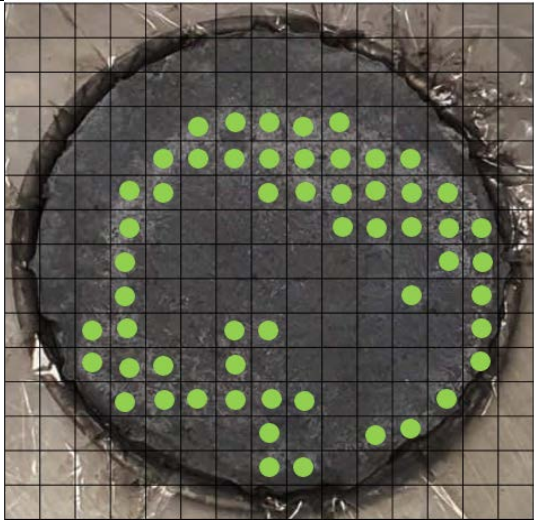
4.5 EFLORESCENCIA EN PLACAS DE CEMENTO

Para calcular cuantitativamente el porcentaje de eflorescencia en cada placa, fue por medio de cuadrículas, lo primero que se realizó fue estandarizar el tamaño de cuadrícula, la cual fue de 15 x 15 cuadrados, posteriormente se calculó el área de la placa de cemento, para ello se calculó el área total de la cuadrícula la cual fue de 225 unidades cuadradas, y se restó el área de las esquinas dando como resultado para cada placa la siguiente operación:

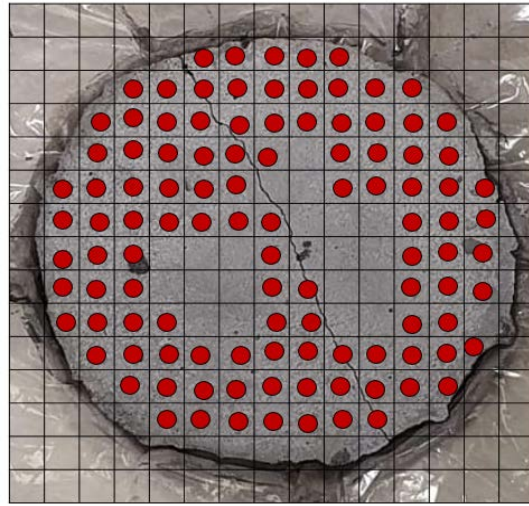
$$\text{Área total} - \text{Área de las esquinas} = \text{Área de la placa de cemento}$$

Fórmula 4.1. Área de la placa de cemento.

El siguiente paso que se realizó fue indicar con círculos de color las áreas con eflorescencia y se calculó el porcentaje de eflorescencia dividiendo el número de cuadros con eflorescencia entre el área total de la placa. En la Tabla 4.12 se muestran los resultados de cada placa:

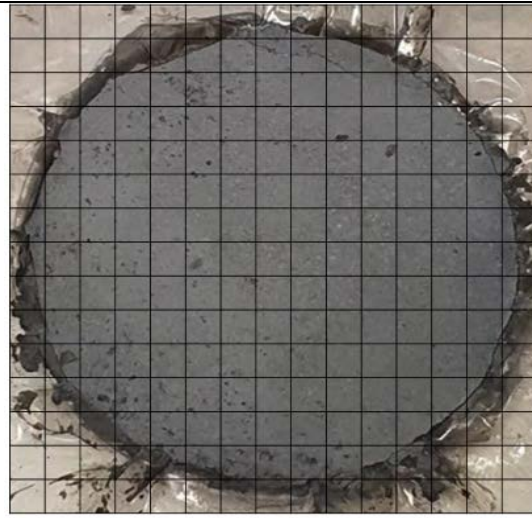
CPC 40 RS DE PROCESO	
	
Descripción: El área con eflorescencia de esta placa fue de 55 u ² , dando como resultado 38.7% de eflorescencia.	

PROPUESTA A



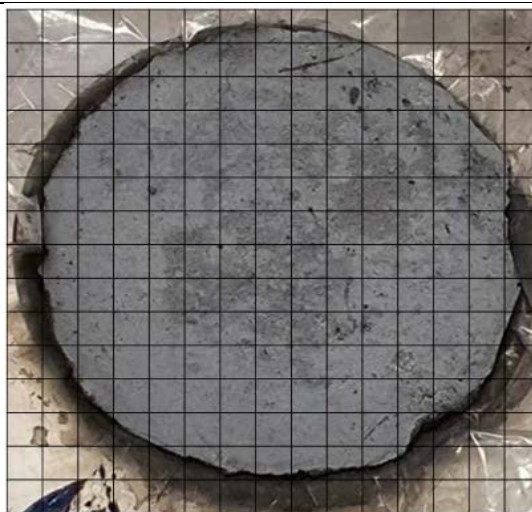
Descripción: El área con eflorescencia de esta placa fue de 108 u^2 , dando como resultado 76% de eflorescencia.

PROPUESTA B



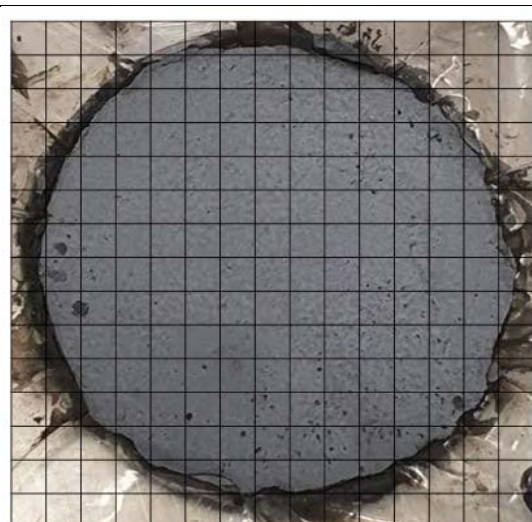
Descripción: No se presentó el efecto de la eflorescencia.

PROPUESTA C


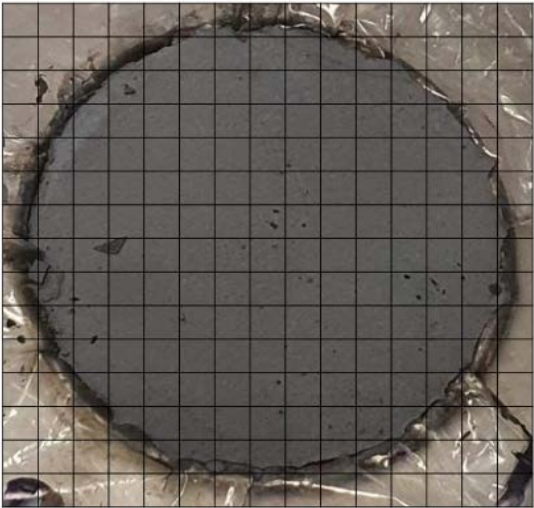


Descripción: No se presentó eflorescencia.

PROPUESTA D



Descripción: No se presentó eflorescencia.

PROPUESTA E	
	
Descripción: No se presentó eflorescencia.	

PROPUESTA F	
	
Descripción: El área con eflorescencia de esta placa fue de 131 u ² , dando como resultado 92.3% de eflorescencia.	

Tabla 4.12. Presencia de Florescencia en placas de cemento.

4.6 COMPARACION DE ÁLCALIS CON EFLORESCENCIA

	Álcalis equivalentes		Eflorescencia
	Totales	Solubles	%
Proceso	1.08	0.0803	38.70
Propuesta A	0.79	0.0806	76.00
Propuesta B	0.34	0.0760	0.00
Propuesta C	0.63	0.0774	0.00
Propuesta D	0.49	0.0780	0.00
Propuesta E	0.45	0.0784	0.00
Propuesta F	0.91	0.0820	90.1

Tabla 4.13. Comparación de álcalis con eflorescencia.

La Tabla 4.13 muestra que la propuesta F es la que tiene más porcentaje de eflorescencia a pesar de que no es la que tiene mayores álcalis equivalentes totales, sin embargo, tiene la mayor cantidad de álcalis solubles equivalentes. Esto demuestra que, aunque es un factor a considerar los álcalis totales, la solubilidad de los álcalis en las materias primas es un factor más importante para el diseño de Harina Cruda.

De igual manera, muestra que a partir de 0.0784 de álcalis equivalentes solubles, se logra eliminar el efecto de la eflorescencia por completo, teniendo 4 propuestas libres de este fenómeno (Propuesta B, Propuesta C, Propuesta D, Propuesta E).

CONCLUSIONES

Después del estudio desarrollado en CYCNA de ORIENTE, empresa que nos ha proporcionado apoyo para la realización de este proyecto en su cemento tipo CPC 40 RS y que previamente se encontraba investigando debido al efecto de la eflorescencia, llegamos a las siguientes conclusiones.

Al tomar este proyecto, como primer paso investigamos que es la eflorescencia, en dicha investigación hallamos que este fenómeno físico-químico es consecuencia de diferentes factores por lo que decidimos acotarlo para que pudiésemos controlar en el proceso de fabricación de cemento que son las materias primas y la concentración de álcalis que tienen cada una de ellas.

Haciendo un planteamiento en la fabricación de este cemento, tomamos en cuenta que el inicio de este proceso comienza con la mezcla de materias primas, dedicando nuestros esfuerzos en el análisis de los álcalis para el diseño de Crudos bajos en concentración de sodio y potasio. Después de realizar los diversos análisis de álcalis totales y álcalis solubles, observamos que las materias primas que presentan mayor cantidad de álcalis totales son Arena 1, Arcilla 1 y Puzolana; de las cuales la Arena 1 y Puzolana tienen mayor cantidad de sodio soluble, deduciendo que los álcalis solubles no dependen de los totales y que cada materia proporcionará diferentes concentraciones de álcalis solubles, por lo que diseñamos propuestas de Harina Cruda regulando o quitando estos materiales.

Al elaborar las propuestas a nivel laboratorio, hallamos que los cementos que rebasaban la norma ASTM C150/C150 M-16 de Álcalis equivalentes presentaban el efecto de la eflorescencia, comprobando la hipótesis establecida en los objetivos, así mismo nos dimos cuenta que el porcentaje de eflorescencia depende de la solubilidad de los álcalis y que a partir del 0.078% de álcalis equivalentes solubles, se logra eliminar este efecto. Obteniendo las propuestas B, C, D y E libre del efecto de la eflorescencia.

Demostrando que, si es posible eliminar el efecto de la eflorescencia en el cemento CPC 40 RS de la empresa CYCNA de ORIENTE mediante la reducción de la concentración de álcalis en la dosificación de Harina Cruda, siendo un método que se pueda hacer desde el inicio del proceso, ya que un tratamiento en el producto terminado posterior a su aplicación sería difícil ya que este cemento es utilizado para la fabricación de mega obras.

Esta investigación puede ser tomada para plantas cementeras que tengan problemas de eflorescencia resultado de altas concentraciones de álcalis en sus materias primas.

ANEXOS

Anexo 1. Validación de Estándares de Calibración AXIOS MAX.

CEMOXI es un conjunto de estándares sintéticos los cuales manejan el análisis de elementos principales de perlas fusionadas en el producto final del cemento y las materias primas del cemento. Se puede utilizar como calibración primaria de perlas fundidas o bien, para verificar los estándares internos de cliente para aplicaciones de polvo comprimido. El espectrómetro PANalytical Axios-Cement con estándares CEMOXI y con algoritmo FP del software Súper Q conforman un sistema único que produce de manera consistente análisis de elementos mayores y menores de muy alta calidad en una amplia variedad de cementos y materias primas utilizadas en su fabricación, incluyendo piedra caliza, arcilla y yeso. Los estándares se entregan como polvos para que el cliente los prepare como perlas fundidas, utilizando el fundente, las proporciones de dilución y metodología del cliente. Los CEMOXI-00 son aplicables a todos los laboratorios de la industria del cemento (CEMOXI).

COMPONENTE	NIST-1880 a		NIST-1889 a	
	CEMENTO PORTLAND		CEMENTO PORTLAND (MEZCLADO CON CALIZA MEZCLA)	
	FRACCION MASA CERTIFICADA (%)	VALOR MEDIDO (%)	FRACCION MASA CERTIFICADA (%)	VALOR MEDIDO (%)
SiO ₂	20.31 ± 0.28	20.58	20.66 ± 0.16	20.77
Al ₂ O ₃	5.18 ± 0.10	5.25	3.89 ± 0.120	3.92
Fe ₂ O ₃	2.81 ± 0.04	2.78	1.937 ± 0.054	1.919
CaO	63.83 ± 0.46	63.39	65.34 ± 0.33	64.96
MgO	1.72 ± 0.04	1.75	0.814 ± 0.028	0.796
SO ₃	3.25 ± 0.06	3.20	2.69 ± 0.11	2.74
K ₂ O	0.92 ± 0.05	0.92	0.605 ± 0.015	0.612
Na ₂ O	0.19 ± 0.02	0.23	0.195 ± 0.010	0.213
P ₂ O ₅	0.22 ± 0.02	0.23	0.110 ± 0.004	0.113
TiO ₂	0.25 ± 0.03	0.26	0.227 ± 0.010	0.219
Mn ₂ O ₃	0.127 ± 0.005	0.123	0.2588 ± 0.0073	0.256
SrO	0.0883 ± 0.021	0.091	0.042 ± 0.004	0.047
ZnO	0.005 ± 0.001	0.005	0.0048 ± 0.0003	0.005
TOTAL	98.90			

Anexo 2. Cálculo de Álcalis en la propuestas de cemento CPC 40 RS .

A	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA			
	Caliza	Arena 1	Arcilla 1	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS
Compuestos	Caliza	Arena 1	Arcilla 1	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS
% SiO ₂	1,14	74,16	56,00	8,95	39,13	95,17	18,68	14,20	21,72	1,14	7,67	19,10
% Al ₂ O ₃	0,33	13,52	17,96	2,68	30,69	0,95	0,65	3,48	5,32	0,33	1,23	4,66
% Fe ₂ O ₃	0,12	1,31	6,22	0,91	10,74	0,22	62,16	2,31	3,54	0,12	0,43	3,07
% CaO	54,44	1,83	5,74	48,00	2,45	0,53	8,21	43,54	66,61	54,44	29,1	63,89
% MgO	0,28	0,12	2,54	0,55	0,06	0,09	0,00	0,50	0,76	0,28	1,55	0,75
% SO ₃	0,07	0,01	0,06	0,01	0,11	0,25	0,16	0,03	0,04	0,07	39,29	1,61
% Na ₂ O	0,00	4,27	2,60	0,44	0,65	0,00	0,01	0,42	0,64	0,00	0,13	0,56
% K ₂ O	0,05	3,77	0,95	0,28	0,00	0,24	0,11	0,27	0,41	0,05	0,21	0,36
%	0,85	0,03	0,12	90,17	3,28	4,73	1,82	100,00	86,00	10,00	4,00	100,00

B	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA			
	Caliza	Arena 2	Arcilla 3	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS
Compuestos	Caliza	Arena 2	Arcilla 3	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS
% SiO ₂	1.14	95.21	39.16	6.86	39.16	95.11	18.67	14.24	21.79	1.14	7.67	19.16
% Al ₂ O ₃	0.33	0.96	30.69	3.78	30.69	0.97	0.65	3.50	5.36	0.33	1.23	4.69
% Fe ₂ O ₃	0.12	0.22	10.74	1.24	10.74	0.22	62.16	2.33	3.56	0.12	0.43	3.09
% CaO	54.44	0.49	2.24	48.37	2.42	0.58	8.21	43.71	66.88	54.44	29.1	64.13
% MgO	0.28	0.09	0.06	0.32	0.06	0.10	0.00	0.30	0.45	0.28	1.55	0.48
% SO ₃	0.07	0.25	0.11	0.03	0.11	0.25	0.16	0.05	0.08	0.07	39.29	1.64
% Na ₂ O	0.00	0.00	0.65	0.19	0.65	0.00	0.01	0.17	0.26	0.00	0.13	0.23
% K ₂ O	0.05	0.24	0.00	0.11	0.00	0.24	0.11	0.12	0.18	0.05	0.21	0.17
%	0.85	0.03	0.12	89.95	0.03	8.1	1.92	100.00	86.00	10.00	4.00	100.00

C	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA			
	Caliza	Arcilla 4	Arcilla 1	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS
Compuestos	Caliza	Arcilla 4	Arcilla 1	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS
% SiO ₂	1.14	79.71	56.00	9.09	39.14	95.18	18.68	14.16	21.67	1.14	7.67	19.06
% Al ₂ O ₃	0.33	12.45	17.96	2.54	30.68	0.95	0.64	3.47	5.31	0.33	1.23	4.65
% Fe ₂ O ₃	0.12	1.17	6.22	0.86	10.74	0.22	62.16	2.31	3.53	0.12	0.43	3.07
% CaO	54.44	0.66	5.74	47.94	2.44	0.53	8.21	43.46	66.49	54.44	29.1	63.79
% MgO	0.28	0.09	2.54	0.56	0.06	0.09	0.00	0.51	0.78	0.28	1.55	0.76
% SO ₃	0.07	1.26	0.06	0.11	0.11	0.25	0.16	0.12	0.18	0.07	39.29	1.73
% Na ₂ O	0.00	0.40	2.60	0.35	0.65	0.00	0.01	0.34	0.52	0.00	0.13	0.45
% K ₂ O	0.05	0.71	0.95	0.20	0.00	0.24	0.11	0.19	0.29	0.05	0.21	0.27
%	0.85	0.03	0.12	90.1	3.67	4.41	1.82	100.00	86.00	10.00	4.00	100.00

D	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA			
	Caliza	Arcilla 4	Arcilla 2	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS
Compuestos	Caliza	Arcilla 4	Arcilla 2	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS
% SiO ₂	1.14	79.71	56.96	9.08	39.16	95.21	18.70	14.12	21.61	1.14	7.67	19.00
% Al ₂ O ₃	0.33	12.45	18.24	2.48	30.69	0.96	0.65	3.46	5.29	0.33	1.23	4.63
% Fe ₂ O ₃	0.12	1.17	6.03	0.74	10.74	0.22	62.16	2.30	3.52	0.12	0.43	3.05
% CaO	54.44	0.66	4.82	47.86	2.44	0.49	8.19	43.31	66.26	54.44	29.1	63.60
% MgO	0.28	0.09	1.58	0.40	0.06	0.09	0.00	0.37	0.56	0.28	1.55	0.57
% SO ₃	0.07	1.26	0.05	0.10	0.11	0.25	0.16	0.11	0.17	0.07	39.29	1.72
% Na ₂ O	0.00	0.40	2.57	0.27	0.65	0.00	0.01	0.27	0.41	0.00	0.13	0.36
% K ₂ O	0.05	0.71	0.80	0.14	0.00	0.24	0.11	0.14	0.21	0.05	0.21	0.20
%	0.85	0.03	0.12	89.92	3.83	4.3	1.95	100.00	86.00	10.00	4.00	100.00

E	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA			
	Caliza	Arena 1	Arcilla 3	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS
% SiO ₂	1.14	74.16	39.13	5.41	39.16	95.12	18.68	14.23	21.77	1.14	7.67	19.14
% Al ₂ O ₃	0.33	13.52	30.69	3.68	30.69	0.97	0.65	3.45	5.28	0.33	1.23	4.63
% Fe ₂ O ₃	0.12	1.31	10.74	1.16	10.74	0.22	62.16	2.38	3.64	0.12	0.43	3.16
% CaO	54.44	1.83	2.45	49.22	2.44	0.59	8.21	43.64	66.77	54.44	29.1	64.03
% MgO	0.28	0.12	0.06	0.33	0.06	0.10	0.00	0.30	0.46	0.28	1.55	0.49
% SO ₃	0.07	0.01	0.11	0.00	0.11	0.24	0.16	0.03	0.04	0.07	39.29	1.61
% Na ₂ O	0.00	4.27	0.65	0.26	0.65	0.00	0.01	0.23	0.35	0.00	0.13	0.31
% K ₂ O	0.05	3.77	0.00	0.15	0.00	0.24	0.11	0.16	0.24	0.05	0.21	0.22
%	0.85	0.03	0.12	88.18	0.34	9.39	2.09	100.00	86.00	10.00	4.00	100.00

F	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA			
	Caliza	Arena 1	Arcilla 2	Caliza Mezcla	Arcilla 2	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS
% SiO ₂	1.14	74.16	56.96	10.39	56.98	95.22	18.71	14.22	21.76	1.14	7.67	19.13
% Al ₂ O ₃	0.33	13.52	18.24	2.91	18.24	0.96	0.65	3.43	5.25	0.33	1.23	4.60
% Fe ₂ O ₃	0.12	1.31	6.03	1.00	6.04	0.22	62.16	2.39	3.66	0.12	0.43	3.18
% CaO	54.44	1.83	4.82	47.39	4.84	0.50	8.20	43.92	67.20	54.44	29.1	64.40
% MgO	0.28	0.12	1.58	0.55	1.59	0.09	0.00	0.57	0.87	0.28	1.55	0.84
% SO ₃	0.07	0.01	0.05	0.01	0.05	0.25	0.16	0.02	0.03	0.07	39.29	1.60
% Na ₂ O	0.00	4.27	2.57	0.42	2.57	0.00	0.01	0.49	0.75	0.00	0.13	0.65
% K ₂ O	0.05	3.77	0.80	0.27	0.80	0.24	0.11	0.29	0.44	0.05	0.21	0.39
%	0.85	0.03	0.12	91.91	3.97	2.14	1.98	100.00	86.00	10.00	4.00	100.00

Anexo 3. Cálculo de Álcalis equivalentes solubles.

Proceso	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA				Álcalis eq.
Compuestos	Caliza	Arena 1	Arcilla 1	Caliza Mezcla	Arcilla 2	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS	
	0.85	0.03	0.12	89.48	7.11	1.9	1.51	100	86.00	10	4	100	
% Na ₂ O	0.0600	0.1000	0.0300	0.0576	0.0200	0.0200	0.0100	0.0535	0.0818	0.0600	0.0800	0.0796	0.0803
% K ₂ O	0.0000	0.0300	0.0000	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008	0.0012	0.0000	0.0000	0.0011	

A	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA				Álcalis eq.
Compuestos	Caliza	Arena 1	Arcilla 1	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS	
	0.85	0.03	0.12	90.17	3.28	4.73	1.82	100.00	86.00	10.00	4.00	100.00	
% Na ₂ O	0.0600	0.1000	0.0300	0.0576	0.0200	0.0200	0.0100	0.0537	0.0822	0.0600	0.0800	0.0799	0.0806
% K ₂ O	0.0000	0.0300	0.0000	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008	0.0012	0.0000	0.0000	0.0011	

B	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA				Álcalis eq.
Compuestos	Caliza	Arena 1	Arcilla 1	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS	
	0.85	0.03	0.12	89.95	0.03	8.1	1.92	100.00	86.00	10.00	4.00	100.00	
% Na ₂ O	0.0600	0.0200	0.0200	0.0544	0.0200	0.0200	0.0100	0.0508	0.0776	0.0600	0.0800	0.0760	0.0760
% K ₂ O	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

C	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA				Álcalis eq.
Compuestos	Caliza	Arena 1	Arcilla 1	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS	
	0.85	0.03	0.12	90.1	3.67	4.41	1.82	100	86.00	10.00	4.00	100.00	
% Na ₂ O	0.0600	0.0300	0.0300	0.0555	0.0200	0.0200	0.0100	0.0518	0.0793	0.0600	0.0800	0.0774	0.0774
% K ₂ O	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

D	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA				Álcalis eq.
Compuestos	Caliza	Arena 1	Arcilla 1	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS	
	0.85	0.03	0.12	89.92	3.83	4.3	1.95	100	86.00	10.00	4.00	100.00	
% Na ₂ O	0.0600	0.0300	0.0300	0.0561	0.0200	0.0200	0.0100	0.0523	0.0800	0.0600	0.0800	0.0780	0.0780
% K ₂ O	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

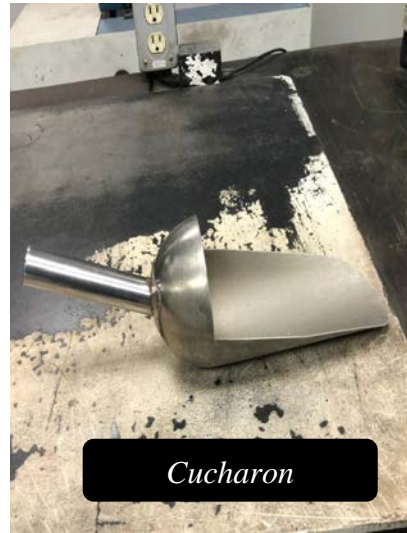
E	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA				Álcalis eq.
Compuestos	Caliza	Arena 1	Arcilla 1	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS	
	0.85	0.03	0.12	88.18	0.34	9.39	2.09	100.00	86.00	10.00	4.00	100.00	
% Na ₂ O	0.0600	0.1000	0.0200	0.0568	0.0200	0.0200	0.0100	0.0522	0.0799	0.0600	0.0800	0.0779	0.0784
% K ₂ O	0.0000	0.0300	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0008	0.0000	0.0000	0.0007	

F	CALIZA MEZCLA			CORRECTORES					PROPUESTA				Álcalis eq.
Compuestos	Caliza	Arena 1	Arcilla 1	Caliza Mezcla	Arcilla 3	Arena 2	Hematita	Harina Cruda	Clinker	Caliza	Yeso	CPC 40 RS	
	0.85	0.03	0.12	91.91	3.97	2.14	1.98	100.00	86.00	10.00	4.00	100.00	
% Na ₂ O	0.0600	0.1000	0.0300	0.0576	0.0300	0.0200	0.0100	0.0548	0.0838	0.0600	0.0800	0.0812	0.0820
% K ₂ O	0.0000	0.0300	0.0000	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008	0.0013	0.0000	0.0000	0.0011	

Anexo 4: Materiales para el muestreo y preparación de materias primas.



Guantes

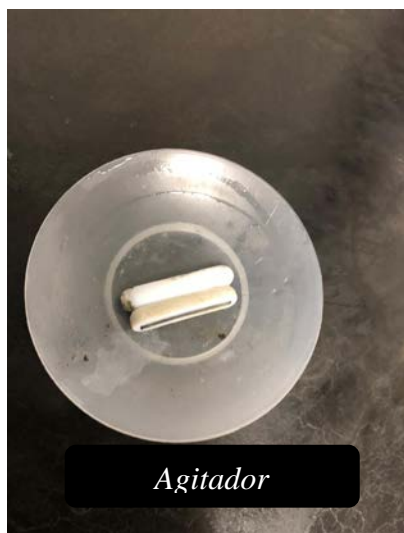


Cucharon

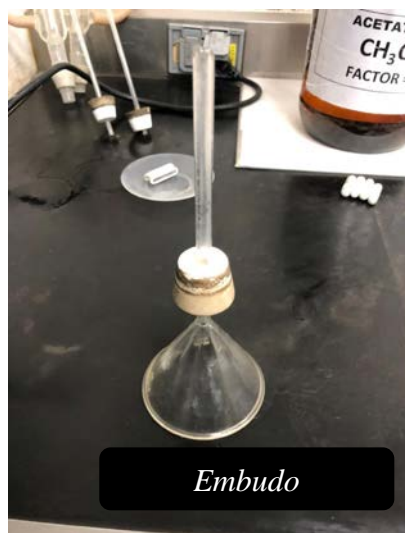


Cubeta

Anexo 6: Materiales para el análisis de álcalis solubles.



Agitador



Embudo



Espátula



*Papel filtro Whatman
número 41*



Balanza analítica



Parrilla

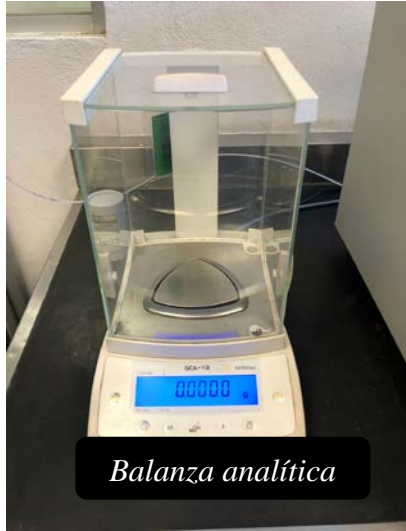


*Matraz volumétrico de
500 ml*



*Fotómetro de
flama*

Anexo 7: Equipos y materiales para la elaboración de Clinker a nivel laboratorio.





Crisol de platino



Vidrio de reloj



Espátula



Mufla de 1450 °C

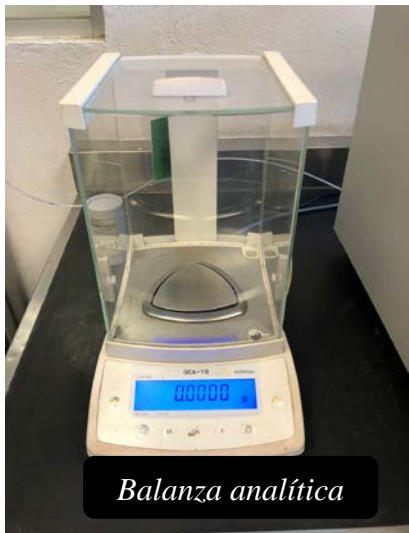
Anexo 8: Equipos y materiales para la elaboración de las placas de cemento.



Mezcladora



Bolsa de plástico



Balanza analítica



Espátula



Placas moldeadoras



Agua Ionizada



Arena Sílica

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM. (2016). Standard Specification for Portland Cement . West Conshocken: ASTM C150/C150M-16.
- Brouwer, P. (s.f.). Teoría de FRX de acuerdo con los principios. PANalytical.
- Castillo, E. G. (2005). Las eflorescencias: tipologías y causas. Arte y cemento.
- CEMOXI. (s.f.). Estandares sintéticos para cementos y materias primas asociadas. PANalytical.
- Construmatica. (23 de Mayo de 2018). Eflorescencias. Barcelona, España.
- Duda, I. W. (1977). Manual tecnológico del cemento . Barcelona: Editores tecnicos asociados, S.A.
- fortaleza, C. (s.f.). Tips tecnicos eflorescencia. Obtenido de www.cementosfortaleza.com:
<https://www.cementosfortaleza.com/documents/58826/3821725/eflorescencias.pdf/447afc76-8315-40f8-9c67-95d3f55811c1>
- Jenway. (s.f.). Fotómetro de flama. Dunmow, Essex, England.
- Marcel, B. (15 de Abril de 2005). Daños de un pavimento de marmol. (1. Bilbao : Arte y Cemento, Ed.) Arte y cemento: revista de la construcción y su entorno, 152.
- ONNCCE. (2017). Industria de la construcción-Cementos hidráulicos-Especificaciones y métodos de ensayo. México: NMX-C-414-ONNCCE-2017.
- ROMERO, J. M. (2000). Fundamentos y clasificación de las eflorescencias en ladrillos de construcción. España.
- Sánchez, Y. V. (2022). ACADEMIA. Obtenido de Proceso de Clinkerización:
https://www.academia.edu/5119231/LECCION23_Proceso_COCCION
- TOXEMENT. (2020). DOCUMENTO REACTIVIDAD ÁLCALI - AGREGADO.
- Vidaud, I. y. (Abril de 2013). Eflorescencias en el concreto. IMCYC.

Yepes, M. A. (2015). Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland.
San Vicente: Publicaciones de la Universidad de Alicante.