

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**



**ELABORACIÓN DE UN CEMENTO A NIVEL DE  
LABORATORIO POR ACTIVACIÓN ALCALINA DE  
RESIDUOS CERÁMICOS DE LA INDUSTRIA DE LA  
CONSTRUCCIÓN**

PRESENTADO POR:

**EMILY ELIZABETH BELTRANENA MARTÍNEZ**  
**GLENDA BEATRIZ MOLINA QUINTANILLA**  
**RUBÉN BLADIMIR RAMÍREZ BAUTISTA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
**INGENIERO QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2018

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL :

**MSc. CRISTOBAL HERNAN RIOS BENITEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO :

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

DIRECTORA :

**INGA. TANIA TORRES RIVERA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción de Grado de:  
**INGENIERO QUÍMICO**

Título:

**ELABORACIÓN DE UN CEMENTO A NIVEL DE  
LABORATORIO POR ACTIVACIÓN ALCALINA DE  
RESIDUOS CERÁMICOS DE LA INDUSTRIA DE LA  
CONSTRUCCIÓN**

Presentado por:

**EMILY ELIZABETH BELTRANENA MARTÍNEZ  
GLENDA BEATRIZ MOLINA QUINTANILLA  
RUBÉN BLADIMIR RAMÍREZ BAUTISTA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director:

**ING. FERNANDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA**

San Salvador, Mayo 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director:

**ING. FERNANDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar le agradecemos a Dios todo poderoso por permitirnos culminar esta etapa de nuestras vidas y llegar al fin de la carrera universitaria.

Agradecemos enormemente a nuestra Alma Mater la Universidad de El Salvador, a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, así como también a todos los docentes que nos han guiado de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos.

Un especial agradecimiento a la empresa Lafarge Holcim por apoyarnos en la realización de los ensayos fisicomecánicos y al Ing. Numa Guevara por su asesoría en el transcurso del trabajo de graduación y por brindarnos su apoyo.

Al Lic. Ricardo Cabrero por abrirnos las puertas de su empresa y así poder recolectar los residuos de ladrillo cerámico.

También queremos agradecer a nuestras familias y amigos que de una forma u otra nos ayudaron en este camino.

*“La vida no es fácil, para ninguno de nosotros. Pero... ¡Qué importa! Hay que perseverar y, sobre todo, tener confianza en uno mismo. Hay que sentirse dotado para realizar alguna cosa y que esa cosa hay que alcanzarla, cueste lo que cueste.”*

**Marie Curie**

**EMILY, GLENDA Y RUBÉN**

## **DEDICATORIA**

Primeramente quiero dar infinitas gracias a El Eterno por permitirme llegar a un tiempo como este y poder finalizar mis estudios universitarios.

Agradezco enormemente a mi Padre Ricardo Beltranena por brindarme los recursos necesarios, estar a mi lado apoyándome y aconsejarme siempre a lo largo de mi vida, a mi Hermano mayor Ricardo Beltranena Martínez por su guía y orientación en mi carrera, a Aurelia Sevillano por su apoyo y atenciones en estos años, a mis hermanas Kathy y Sophia por estar en mi vida, a mi abuelitas Socorro Sigaran y Sara Beltranena por estar pendientes de mí siempre.

Gracias a los maestros que me formaron en especial a los catedráticos de la Universidad de El Salvador, a mis compañeros y amigos como: Cristina Cortez por su gran apoyo y amistad desde principios de la carrera, a Carlos Cruz y Mario Khalil por aportar con su conocimiento y ayudarme por medio de repasos académicos, a mis amigos con los cuales estude por muchas horas y compartí momentos de compañerismo: Yami García, Laura, Ricardo, Xenia, Abigail, Elba, Ise, Naty, Walter, Mareh, Yami Medina y a mis amigos que fueron parte de la Asociación de Estudiantes de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, a mis compañeros Glenda Molina y Rubén Ramírez por su esfuerzo y dedicación en este trabajo. En fin a todos aquellos compañeros, amigos y familiares que de alguna forma u otra estuvieron a mi lado apoyándome.

Y una especial dedicatoria a mi Madre que en paz descanse Emilia del Rosario Martínez de Beltranena, sé que su anhelo era ver que yo culminara una carrera profesional, gracias por ser mi inspiración.

*“Pon en manos del SEÑOR todas tus obras, y tus proyectos se cumplirán”*

**Proverbios 16:3 NVI**

**EMILY BELTRANENA**

## **DEDICATORIA**

A Dios por bendecirme con inteligencia, fuerza y voluntad en cada uno de los retos que me enfrentaron durante este largo camino de mi vida.

A mis padres Rita Bautista de Ramírez y Porfirio Adalberto Ramírez gracias por sus consejos, ánimos y apoyo brindado, por educarme con valores y por creer en mi aun cuando yo mismo dejaba de hacerlo.

A mis hermanas Claudia Beatriz Ramírez y Sabrina Inés Ramírez por animarme, llenar mis días de alegría y por impulsarme a ser cada día una mejor persona.

A Laury Gutiérrez por su compañía, su cariño, por creer en mis capacidades y por su apoyo en este trabajo de graduación.

A mis compañeros y amigos que compartimos durante los años de universidad muchas noches de desvelo, algunos días duros pero siempre apoyándonos, en especial a Astrid Trujillo, Celeste Aguilar, Adal Sandoval, Erick Nolasco, Julio Benites, Luis pacheco, Erick Medina, Salvador Colocho. Gracias a todos por su apoyo y por hacer de cada momento compartido un momento ameno.

A mis compañeras de este trabajo de graduación, Glenna Molina y Emily Beltranena, con quienes comparto la alegría de alcanzar este logro.

A la empresa Devatec por creer y confiar en mis capacidades y brindarme la oportunidad de formar parte de su equipo, por apoyarme con los permisos para asistir a las clases y en este último año con los permisos para reunirme con mis compañeras y avanzar con este proyecto.

A todos mis familiares y amigos cercanos que siempre estuvieron pendientes de mi formación académica y que de una u otra manera estuvieron apoyándome.

**RUBÉN RAMÍREZ**

## **RESUMEN**

La industria cementera es una industria en donde se explotan recursos naturales emitiendo a la atmosfera diversos tipos de gases contaminantes (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>), es por ello que surge la necesidad de desarrollar nuevos materiales cementantes en cuya fabricación se emitan menos gases contaminantes y se obtengan con un apreciable ahorro energético.

Dentro de estos materiales alternativos se encuentran aquellos que proceden de la activación alcalina de aluminosilicatos. Estos activadores se suelen incluir en la mezcla como una disolución, los activadores más empleados son hidróxidos y silicatos alcalinos.

Se comenzó elaborando un cemento a nivel de laboratorio por activación alcalina de residuos cerámicos de la industria de la construcción, la experimentación se llevó a cabo en dos etapas: en la primera etapa se trituraron los residuos cerámicos utilizando una trituradora de mandíbula y finalmente una trituradora de disco hasta obtener un tamaño de partícula donde solo el 1.8% del material es retenido en la malla N°100, la segunda etapa consistió en la activación de los residuos cerámicos triturados con solución activadora alcalina compuesta por hidróxido de sodio y silicato de sodio, luego se dejó reposar en estufa a una temperatura constante de 65°C.

A través de la caracterización química del material activado se observó la falta de las fases calcita (CaCO<sub>3</sub>) y portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>), estos son productos necesarios para la hidratación parcial del cemento e indicadores del potencial cementante de la mezcla, por lo que fue necesario la adición de óxido de calcio y se determinó la relación de mezcla 50:50 material activado alcalinamente con óxido de calcio.



Como parte de la metodología se realizaron diferentes tipos de ensayos según la norma para morteros de mampostería ASTM C-91 (ya que esta es la más aplicada en los tipos de cementos que se elaboran en El Salvador), teniendo como resultado que cumple la norma únicamente el ensayo de consistencia con un valor de 9 mm en el aparato de vicat, sin embargo, se pudo determinar en análisis de difracción de rayos X que se formó un material cementante, dado lo anterior se procedió a probar posibles aplicaciones como repellado o enfoscado, estuco y para reparación de piezas quebradas.

## ÍNDICE GENERAL

|  |            |
|--|------------|
| <b>RESUMEN .....</b>   | <b>i</b>   |
| <b>ÍNDICE GENERAL.....</b>                                     | <b>iii</b> |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>                                 | <b>vii</b> |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>                                   | <b>ix</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                      | <b>1</b>   |
| <b>CAPITULO I.....</b>   | <b>2</b>   |
| <b>1. GENERALIDADES y CONCEPTOS BASICOS .....</b>              | <b>2</b>   |
| 1.1. GENERALIDADES DE ELABORACION DE CEMENTO .....             | 2          |
| 1.1.1. PROCESO DE PRODUCCIÓN .....                             | 2          |
| 1.1.2. COMPONENTES DEL CEMENTO.....                            | 5          |
| 1.1.3. PROPIEDADES DEL CEMENTO.....                            | 8          |
| 1.1.4. TIPOS DE CEMENTO .....                                  | 11         |
| 1.1.5. CEMENTO DE MAMPOSTERÍA .....                            | 14         |
| 1.1.5.1. TIPOS DE CEMENTO DE MAMPOSTERÍA .....                 | 14         |
| 1.1.5.2. PROPIEDADES DEL CEMENTO DE MAMPOSTERÍA .....          | 15         |
| 1.2. MORTEROS .....  | 16         |
| 1.2.1. COMPONENTES DE LOS MORTEROS .....                       | 16         |
| 1.2.2. TIPOS DE MORTEROS .....                                 | 18         |
| 1.3. LADRILLO CERÁMICO.....                                    | 19         |
| 1.3.1. DEFINICIÓN DE LADRILLO CERÁMICO .....                   | 20         |
| 1.3.2. PROCESO DE PRODUCCIÓN.....                              | 20         |
| 1.3.2.1. RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MATERIAS<br>PRIMAS..... | 22         |

|                    |   |           |
|--------------------|---|-----------|
| 1.3.2.2.           | MOLIENDA DE MATERIA PRIMA .....   | 22        |
| 1.3.2.3.           | CONFORMADO DE PIEZAS CERÁMICAS .....  | 24        |
| 1.3.2.4.           | SECADO .....  | 26        |
| 1.3.2.5.           | COCCIÓN DE PRODUCTOS CERÁMICOS.....   | 27        |
| 1.3.2.6.           | PREPARACIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL<br>PRODUCTO .....                            | 28        |
| 1.3.3.             | INDUSTRIA DE LADRILLOS CERÁMICOS EN<br>EL SALVADOR.....                       | 29        |
| 1.3.3.1.           | CLASIFICACIÓN ARANCELARIA DE PRODUCTOS<br>CERÁMICOS.....                      | 29        |
| 1.3.3.2.           | RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LADRILLOS<br>CERÁMICOS EN EL SALVADOR .....       | 30        |
| 1.4.               | CEMENTO CERÁMICO .....  | 32        |
| 1.4.1.             | PROCESO DE ACTIVACIÓN ALCALINA.....   | 32        |
| 1.4.2.             | COMPONENTES EN LA ACTIVACIÓN ALCALINA.....                                    | 36        |
| <b>CAPITULO II</b> | .....   | <b>39</b> |
| <b>2.</b>          | <b>DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA ELABORACIÓN DE<br/>CEMENTO CERÁMICO .....</b> | <b>39</b> |
| 2.1.               | METODOLOGÍA .....   | 39        |
| 2.1.1.             | ETAPA 1: PROCESAMIENTO DE RESIDUOS CERÁMICOS .....                            | 40        |
| 2.1.2.             | ETAPA 2: ELABORACIÓN DEL CEMENTO CERÁMICO .....                               | 42        |
| 2.2.               | PRUEBAS REALIZADAS A NIVEL DE LABORATORIO .....                               | 45        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPITULO III.....</b>  | <b>47</b> |
| <b>3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y FISICOMECÁNICA DEL<br/>CEMENTO CERÁMICO ELABORADO .....</b> | <b>47</b> |
| 3.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL RESIDUO DE LADRILLO<br>CERÁMICO TRITURADO .....            | 47        |
| 3.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE CEMENTO CERAMICO<br>ELABORADO.....                        | 49        |
| 3.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA .....  | 52        |
| 3.2.1. TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA .....   | 53        |
| 3.2.2. ENSAYO DE FINURA.....  | 53        |
| 3.2.3. ENSAYO DE CONSISTENCIA NORMAL.....   | 53        |
| 3.2.4. ENSAYO DE TIEMPO DE FRAGUADO .....   | 54        |
| 3.2.5. ARENA ESTÁNDAR .....   | 54        |
| 3.2.6. PREPARACIÓN DEL MORTERO.....   | 55        |
| 3.2.7. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....  | 56        |
| 3.2.8. ENSAYO DE EXPANSIÓN EN AUTOCLAVE .....   | 57        |
| <b>CAPITULO IV.....</b>   | <b>58</b> |
| <b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>  | <b>58</b> |
| 4.1. RESULTADO A ENSAYO DE FINURA.....  | 58        |
| 4.2. RESULTADO DE ENSAYO DE CONSISTENCIA.....   | 59        |
| 4.3. RESULTADO DE ENSAYO DE CONSISTENCIA.....   | 61        |
| 4.4. RESULTADO ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. ....                                  | 63        |
| 4.5. RESULTADO DE ENSAYO DE EXPANSIÓN EN AUTOCLAVE .....                                    | 64        |
| 4.6. RESUMEN DE RESULTADOS.....   | 65        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPITULO V.....</b>   | <b>67</b> |
| <b>5. EVALUACIÓN DE POSIBLES APLICACIONES Y COSTOS DEL MATERIAL CEMENTANTE ELABORADO .....</b> | <b>67</b> |
| 5.1.1. APLICACIÓN COMO REPELLADO O ENFOSCADO .....   | 67        |
| 5.1.2. APLICACIÓN DEL MATERIAL CEMENTANTE COMO ESTUCO.....                                     | 69        |
| 5.1.3. APLICACIÓN DEL MATERIAL CEMENTANTE COMO REPARACIÓN DE PIEZAS QUEBRADAS .....            | 70        |
| 5.2. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE ELABORACIÓN .....   | 71        |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>  | <b>73</b> |
| <b>RECOMENDACIONES .....</b>   | <b>75</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>76</b> |
| <b>GLOSARIO .....</b>  | <b>80</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>  | <b>82</b> |
| ANEXO A1. MANUAL DE PRACTICAS DE LABORATORIO .....   | 82        |
| ANEXO A2. CALCULOS PARA ESTIMACION DE COSTOS DE MATERIAL CEMENTANTE.....                       | 89        |
| ANEXO A3. PROCESO DE ACTIVACIÓN ALCALINA .....   | 91        |
| ANEXO A4. ENSAYOS FISICOMECAVICOS EN LABORATORIO.....  | 94        |
| ANEXO A5. SOLICITUD DE VISITA A EMPRESA HOLCIM .....   | 96        |
| ANEXO A6. CARTA DE PETICIÓN DE INFORMACIÓN A BANCO CENTRAL DE RESERVA .....                    | 98        |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <b>Figura 1.1</b> | Etapas en el proceso de producción del cemento .....   | 4  |
| <b>Figura 1.2</b> | Etapas básicas en el proceso de producción de cerámicos. ....  | 21 |
| <b>Figura 1.3</b> | Fotografía de trituración de arcilla en molino de bolas por vía<br>semi-húmeda.....  | 23 |
| <b>Figura 1.4</b> | Fotografía del transporte de piezas de conformado hacia horno,<br>luego de moldeo .....  | 25 |
| <b>Figura 1.5</b> | Residuos cerámicos de una industria de ladrillos cerámicos en<br>El Salvador. ....   | 31 |
| <b>Figura 1.6</b> | Clasificación de los materiales activados alcalinamente, con<br>comparaciones entre el OPC y los sulfoaluminatos cálcicos..... | 34 |
| <b>Figura 2.1</b> | Diagrama general de la metodología experimental. ....  | 39 |
| <b>Figura 2.2</b> | Fotografía de la recolección de materia prima en planta<br>procesadora de ladrillos cerámicos. ....                            | 40 |
| <b>Figura 2.3</b> | Trituradora de mandíbula y material triturado.....   | 41 |
| <b>Figura 2.4</b> | Pulverizadora de discos y material molido. ....  | 41 |
| <b>Figura 2.5</b> | Solución activadora. ....  | 42 |
| <b>Figura 2.6</b> | Mezcla de la solución activadora con los residuos cerámicos.....   | 43 |
| <b>Figura 2.7</b> | Secado en estufa de material mezclado.....   | 43 |
| <b>Figura 2.8</b> | Cemento cerámico. ....   | 44 |
| <b>Figura 2.9</b> | Cemento cerámico almacenado herméticamente. ....   | 44 |
| <b>Figura 3.1</b> | Gráfico de la composición química de material cerámico<br>residual triturado.....  | 49 |
| <b>Figura 3.2</b> | Difractograma obtenido de la caracterización química cemento<br>cerámico.....  | 50 |
| <b>Figura 3.3</b> | Pruebas obtenidas de material activado con cal. ....   | 51 |
| <b>Figura 3.4</b> | Difractograma obtenido de la caracterización química de<br>material activado con cal en proporción 50:50. ....                 | 52 |
| <b>Figura 3.5</b> | Aparato de Vicat utilizado en pruebas. ....  | 54 |

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Figura 3.6</b>  | Aguja de Gillmore utilizada en las pruebas. ....  | 54 |
| <b>Figura 3.7</b>  | Arena estandarizada utilizada en pruebas. ....  | 55 |
| <b>Figura 3.9</b>  | Ensayo de mesa de flujo. ....   | 56 |
| <b>Figura 3.8</b>  | Elaboración de la mezcla para el mortero. ....  | 56 |
| <b>Figura 3.10</b> | Almacenamiento de morteros.....   | 57 |
| <b>Figura 4.1</b>  | Resultado de Ensayo de resistencia a la compresión .....                                  | 64 |
| <b>Figura 5.1</b>  | Fotografía de pruebas obtenidas en el repello de bloques de<br>ladrillo de hormigón ..... | 68 |
| <b>Figura 5.2</b>  | Imagen ilustrativa de aplicación de estuco comercial.....                                 | 69 |
| <b>Figura 5.3</b>  | Fotografía de la reparación obtenida de objetos de porcelana.....                         | 70 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| <b>Tabla 1.1</b>  | Componentes mineralógicos principales del cemento .....   | 6  |
| <b>Tabla 1.2</b>  | Óxidos químicos del cemento .....   | 7  |
| <b>Tabla 1.3</b>  | Propiedades de los componentes mineralógicos del cemento. ....  | 7  |
| <b>Tabla 1.3a</b> | Propiedades de los componentes mineralógicos del cemento.<br>(Continuación) .....                         | 8  |
| <b>Tabla 1.4</b>  | Clasificación del cemento de mampostería.....   | 14 |
| <b>Tabla 1.5</b>  | Requisitos físicos que un cemento de mampostería debe cumplir. ....                                       | 15 |
| <b>Tabla 1.6</b>  | Partidas arancelarias en las que clasifican los productos de<br>cerámica, yeso y sus manufacturas. ....   | 30 |
| <b>Tabla 1.7</b>  | Estimación de residuos generados por la industria de ladrillos<br>cerámicos en El Salvador 2010-2016..... | 31 |
| <b>Tabla 2.1</b>  | Resultados de pruebas de laboratorio para activación del<br>material cerámico .....                       | 45 |
| <b>Tabla 3.1</b>  | Caracterización química de desperdicio de ladrillo cerámico<br>en estudio.....                            | 48 |
| <b>Tabla 4.1</b>  | Pruebas obtenidas en laboratorio de la composición en masa y<br>consistencia normal de cemento. ....      | 59 |
| <b>Tabla 4.2</b>  | Pruebas obtenidas en laboratorio de la composición porcentual<br>y consistencia normal de cemento. ....   | 60 |
| <b>Tabla 4.3</b>  | Pruebas obtenidas en laboratorio de la composición porcentual<br>y consistencia normal de cemento. ....   | 61 |
| <b>Tabla 4.4</b>  | Resultados obtenidos de la composición porcentual y tiempos<br>de pruebas de fraguado. ....               | 62 |
| <b>Tabla 4.5</b>  | Resultados obtenidos en mesa de flujo para uso en ensayos<br>de cemento hidráulico. ....                  | 63 |
| <b>Tabla 4.6</b>  | Cuadro resumen de Ensayos según Norma ASTM C-91.....  | 65 |
| <b>Tabla 5.1</b>  | Precios actuales de reactivos en el mercado Salvadoreño.....  | 71 |
| <b>Tabla 5.2</b>  | Precio estimado de un kilogramo de cemento .....  | 72 |



## INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción de edificaciones civiles, desecha una gran cantidad de desperdicios generados en la construcción, remodelación o demolición de estructuras o edificaciones.

Es de conocimiento común que los desechos son apartados durante la construcción ya que no son útiles para el trabajo y luego son destinados a ciertos lugares para ser botados, lo cual empeora el problema ambiental ya que queda al olvido y no puede ser degradado en un corto plazo.

Viendo la problemática de la gran cantidad de residuos que se generan en el ámbito de la construcción y que estos no tienen ningún uso, se ha pensado en utilizar los desechos y desperdicios que son arrojados y no se les da ningún tratamiento, en especial el de los ladrillos que se utilizan para la colocación de pisos nuevos o remodelar los pisos antiguos, además de residuos generados en su proceso de producción y comercialización; estos pueden ser aprovechados para darles una reutilización, como un nuevo material para la misma industria de la construcción.

A través de este trabajo de graduación se pretende dar una propuesta para la reutilización de desechos de ladrillos cerámicos, por medio de la elaboración de un cemento que los utilizará como materia prima, este cemento consiste en la trituración de determinadas cantidades de residuos, luego de ser molidos se mezclan con soluciones activadoras alcalinas hasta lograr hacer una consistencia pastosa, que con ayuda de la aplicación de calor podrá transformarse en el producto deseado o cemento.

# **CAPITULO I**

## **1. GENERALIDADES Y CONCEPTOS BASICOS**

En este capítulo se presentan las generalidades y conceptos básicos necesarios para llevar a cabo la investigación.

También se presenta información relacionada con la industria del cemento tal como el proceso de producción, componentes, propiedades y tipos de cemento, especialmente el cemento de mampostería. Además información relacionada con respecto al proceso de producción de ladrillo cerámico en El Salvador.

Por último se describe de forma general en que consiste el proceso de activación alcalina y su uso en diferentes materiales para el desarrollo de nuevos cementantes que en cuya fabricación se emitan menos gases contaminantes.

### **1.1. GENERALIDADES DE ELABORACION DE CEMENTO**

El cemento es un material inorgánico pulverulento e hidráulicamente activo, es decir, que al ser amasado con agua forma un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión<sup>1</sup>, el cual endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas.

#### **1.1.1. PROCESO DE PRODUCCIÓN**

Si bien el proceso de fabricación de cemento a partir de desechos cerámicos requiere de un proceso y materias primas diferentes al que se utilizan para elaborar

---

<sup>1</sup>Fuerza de atracción que mantiene a las moléculas unidas

un cemento tipo Portland es necesario mencionar de forma general cada una de las etapas que se siguen para su fabricación y de esta forma evaluar las diferencias y similitudes entre cada uno de ellos.

#### **a) Materia prima**

Los ingredientes básicos para elaborar el cemento son la cal, la sílice y la alúmina, estos ingredientes se pueden encontrar en la naturaleza en diversas formas y por lo general de manera abundante. Por ejemplo la cal se extrae del carbonato de calcio que se encuentra en la roca caliza, la sílice proviene de la arcilla (la arcilla puede ser el mismo suelo arcilloso o alguna roca sedimentaria constituida básicamente de arcilla como la lutita arcillosa), al igual que la alúmina, por estas razones generalmente las plantas productoras de cemento se encuentran muy cerca de los bancos de materiales que proveen estos ingredientes básicos.

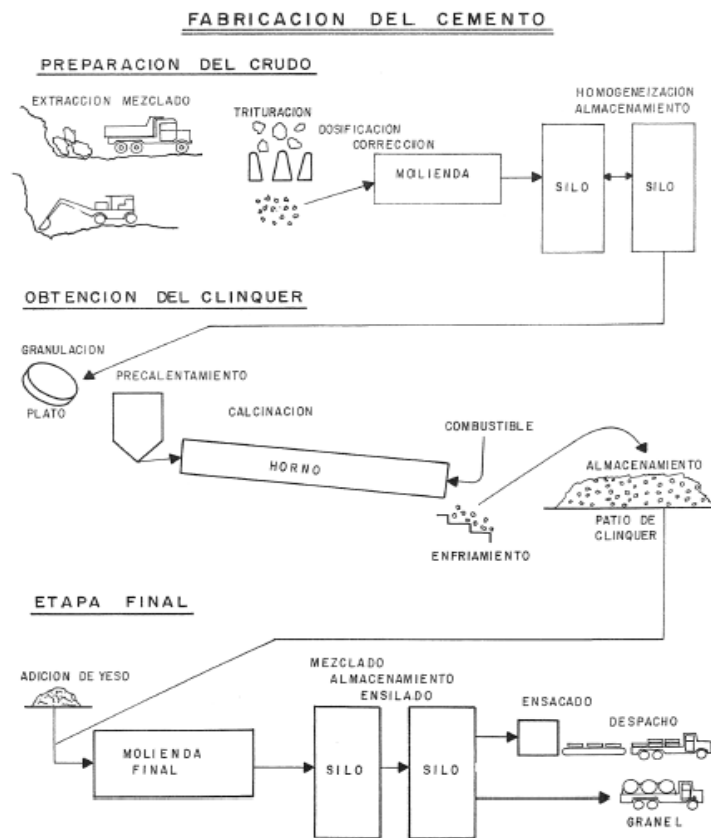
En la elaboración de los cementos también se requiere de otros minerales secundarios entre los que se encuentran el hierro, el magnesio, el sodio y el potasio, la mayoría de ellos se pueden encontrar en los bancos de arcilla, de no ser así, la planta debe abastecerse del mineral que adolecen sus bancos propios. Otro material básico en la elaboración de los cementos es el yeso, el cual generalmente se trae de fuera pues es muy difícil que la planta haya sido ubicada donde todos los insumos estén a la mano (Gomez, 2013).

#### **b) Fabricación**

El proceso básico de fabricación del cemento es relativamente simple, existen dos métodos para la elaboración del cemento, ellos son el método vía húmeda y el método vía seca. En el método vía húmeda se forma una suspensión con los materiales calcáreo-arcillosos previamente molidos, la suspensión es transportada por todo el sistema como un fluido por medio de tuberías. En el método por vía

seca la mezcla íntima de los materiales calcáreo-arcillosos se transporta por corrientes de aire, para algunos productores de cemento la diferencia más notable entre los dos métodos se encuentra en que en el método vía húmeda se consume más energía en el proceso de cocción debido a que primero se debe evaporar el exceso de agua antes de iniciar la fusión de los materiales con las altas temperaturas.

La Figura 1.1 ilustra el método vía seca para el caso en que la arcilla provenga de una roca, de acuerdo con esta figura las etapas más importantes en la producción del cemento son las siguientes: explotación de las canteras de arcilla y caliza, triturado, molienda y obtención de la harina cruda, calcinación, adición del yeso y molienda del Clinker, finalmente almacenamiento y envasado.



**Figura 0.1 Etapas en el proceso de producción del cemento**  
Fuente: (Porrero, Ramos y Velazco, 2014)

Una etapa muy importante en el proceso de fabricación del cemento es la calcinación y obtención del Clinker. La harina cruda obtenida en la etapa de molienda de los ingredientes en bruto es transportada hacia el horno giratorio, el cual se calienta hasta 1500°C por medio de una flama localizada en la parte baja del horno, el horno presenta una ligera inclinación para que el material alimentado por la parte superior (harina cruda) se deslice lentamente durante la cocción hacia la parte inferior. La harina cruda al entrar en el horno sufre una serie de cambios importantes, inicialmente se seca y al llegar a unos 600°C el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) proveniente de la roca caliza pierde el bióxido de carbono, convirtiéndose en cal viva ( $\text{CaO}$ ).

Posteriormente cerca de los 1200°C se produce una fusión de ingredientes que da como resultados la formación de silicatos de calcio y aluminatos de calcio, así como otros compuestos secundarios. Debido al movimiento de los ingredientes durante la calcinación se van formando unas pequeñas bolas en el horno, estas bolas de material cocido se llaman Clinker. El Clinker es ya el cemento, con el único defecto de que requiere de la adición del yeso y de la molienda, sin la presencia del yeso el Clinker molido fraguaría muy rápidamente entorpeciendo el proceso normal de fraguado<sup>2</sup>.

### **1.1.2. COMPONENTES DEL CEMENTO**

Cuando se habla del cemento, implícitamente se alude al cemento Portland o cemento sobre la base de Portland, ya que son los productos aglomerantes que se usan casi exclusivamente con fines estructurales. Para otros aglomerantes distintos, también empleados en construcción, se suele añadir a la palabra cemento, alguna

---

<sup>2</sup> Pérdida de plasticidad que sufre la pasta de cemento.

otra que los especifique (cemento de escoria, cemento puzolánico, cemento súper sulfatado, etc.) (Porrero, Ramos y Velazco, 2014).

Los componentes principales del cemento Portland lo constituyen los silicatos y los aluminatos de calcio, estos compuestos se forman por la asociación química de diferentes óxidos como el óxido de calcio (CaO), que se representa químicamente en forma abreviada por la letra C, la sílica (SiO<sub>2</sub>), que se representa por S, la alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que se representa por A y el óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) representado por F.

Los compuestos principales resultado del proceso de fusión química en el horno son cuatro, sus nombres, formulas químicas abreviadas y abreviaciones comunes se citan en la Tabla 1.1 a continuación:

**Tabla 0.1 Componentes mineralógicos principales del cemento**

| <b>COMPONENTE</b>             | <b>FORMULA QUIMICA</b>                                | <b>FORMULA ABREVIADA</b> |
|-------------------------------|---|--------------------------|
| Silicato tricálcico           | 3CaO-SiO <sub>2</sub>                                 | C <sub>3</sub> S         |
| Silicato dicálcico            | 2CaO-SiO <sub>2</sub>                                 | C <sub>2</sub> S         |
| Aluminato tricálcico          | 3CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                   | C <sub>3</sub> A         |
| Ferritoaluminato tetracálcico | 4CaO-Al <sub>2</sub> O-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> FA        |

Fuente: (Porrero, Ramos y Velazco, 2014).

Adicionalmente se forman compuestos secundarios como MgO, SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O y otros. Los dos últimos óxidos<sup>3</sup>, el de potasio y el de sodio se conocen como los álcalis del cemento, normalmente estos compuestos se restringen en un 0.6% por peso en forma combinada, esta restricción obedece a que arriba de este porcentaje y bajo condiciones ambientales favorables, los álcalis reaccionan en forma expansiva con algunos agregados de origen volcánico, provocando la desintegración del concreto.

---

<sup>3</sup> Compuesto químico, formado por al menos un átomo de oxígeno y un átomo de algún otro elemento.

Para producir un cemento Portland se espera que la presencia de los diferentes óxidos se encuentre dentro de los rangos indicados por la Tabla 1.2. Como se puede observar, los óxidos de calcio y de sílice son los más abundantes en los cementos, su variación en porcentaje, al igual que la de los demás óxidos está regida por las proporciones de los ingredientes en bruto alimentados al proceso de producción, pequeñas variaciones en los porcentajes de óxidos arrojan variaciones muy importantes en los compuestos principales del cemento. (Gomez, 2013).

**Tabla 0.2 Óxidos químicos del cemento**

| <b>COMPONENTE</b> | <b>FORMULA QUIMICA</b>              | <b>FORMULA ABREVIADA</b> | <b>LIMITES DE LA COMPOSICION USUAL PROMEDIO, %</b> |
|-------------------|-------------------------------------|--------------------------|--|
| Sílice            | SiO <sub>2</sub>                    | S                        | 19-25  |
| Alúmina           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | A                        | 3.5-8  |
| Oxido de Hierro   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | F                        | 2.5-4.5  |
| Cal               | CaO                                 | C                        | 62-65  |
| Sulfatos (Yeso)   | SO <sub>3</sub>                     | Y                        | 1.5-4.5  |
| Magnesia          | MgO                                 | M                        | 0.5-5  |
| Álcalis           | Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O | N, K                     | 0.2-1.2  |

Fuente: (Porrero, Ramos y Velazco, 2014).

La composición mineralógica también es una forma con la cual se infieren aproximadamente las propiedades del cemento, en la Tabla 1.3 se muestran dichas propiedades.

**Tabla 0.3 Propiedades de los componentes mineralógicos del cemento.**

| <b>COMPONENTE</b> | <b>PROPIEDADES</b>  |
|-------------------|---|
| C <sub>3</sub> S  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Altas resistencia iniciales</li> <li>• Alto calor de hidratación</li> </ul>  |
| C <sub>2</sub> S  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo lento de resistencias</li> <li>• Moderado calor de hidratación</li> <li>• Muy alto calor de hidratación</li> <li>• Gran sensibilidad a los agresivos químicos (sulfatos)</li> </ul> |

Continua...

**Tabla 0.4a Propiedades de los componentes mineralógicos del cemento.  
(Continuación)**

| <b>COMPONENTE</b>   | <b>PROPIEDADES</b>   |
|---------------------|--|
| C <sub>4</sub> FA   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Útil para la formación de Clinker (fase líquida)</li> </ul> |
| Adiciones:          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo lento de resistencias</li> </ul>                 |
| Escoria Siderúrgica | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo calor de hidratación</li> </ul>                        |
| Puzolanas           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena resistencia a la agresión química</li> </ul>          |
| Otros               |  |

Fuente: (Porrero, Ramos y Velazco, 2014).

### **1.1.3. PROPIEDADES DEL CEMENTO.**

Las propiedades físicas del cemento se pueden determinar mediante algunos ensayos sobre el polvo la pasta de cemento o el mortero, y generalmente se realizan en laboratorios tanto de fábricas como de clientes con el fin de asegurarse que este material cumpla con lo establecido en las Normas y que posea la calidad deseada. Las propiedades más relevantes del cemento son: la finura, la fluidez o consistencia normal, la densidad, la resistencia a la compresión, la expansión, los tiempos de fraguado y el fraguado rápido. (Silva, 2016)

#### **a) Polvo**

##### **I. Finura**

Es una de las propiedades más importantes del cemento, ya que ella determina en gran medida la velocidad de hidratación, el desarrollo del calor de hidratación, la retracción y la adquisición de resistencia del cemento. Un cemento con grano fino se hidrata con mucha más facilidad ya que al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento se hidratan solo en una profundidad de 0.01 mm, por lo que si dichos granos fuesen muy gruesos su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte. (Silva, 2016)



Este parámetro se determina mediante un método indirecto con el aparato de Blaine, que consiste en medir el tiempo necesario para atravesar una cantidad de aire en una muestra de densidad conocida. Se denomina superficie específica y se expresa en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Otra forma para determinar la finura del cemento es mediante el método de prueba estándar para finura del cemento hidráulico de la norma ASTM C430, detectando el porcentaje de material que pasa por el tamiz No. 325 que tiene que ser un máximo de un 24% (Silva, 2016).

## **II. Densidad**

Se determina por la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. En los cementos normales este valor está muy cerca de  $3.15 \text{ g/cm}^3$ , en los adicionados este valor está cerca de  $2.90 \text{ g/cm}^3$ , dependiendo de la cantidad de adiciones utilizadas (Silva, 2016).

### **b) Pasta**

#### **I. Consistencia normal**

Es la característica que indica el grado de fluidez con que se puede manejar la pasta de cemento, este parámetro se determina con la aguja de Vicat. Los cementos tienen requerimientos de agua diferentes, dependiendo si son o no adicionados; generalmente los cementos adicionados requieren de más agua. Existe una fluidez para la cual debe agregarse cierta cantidad de agua, y es lo que se denomina consistencia normal (Silva, 2016). Este ensayo se debe realizar siguiendo los lineamientos de la Norma ASTM C187. En donde la penetración del aparato de Vicat debe de estar en un rango de  $10 \pm 1 \text{ mm}$ .

#### **II. Expansión en autoclave**

Este ensayo se realiza para garantizar que el cemento no va a presentar expansión por algunos compuestos como el óxido de magnesio (MgO), el trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) o la cal libre (CaO). Consiste en medir el cambio de longitud en barras de 2.5

x 2.5 x 25.4 cm, hechas de pasta de cemento sometidas a 3 horas de alta temperatura y presión, este valor se expresa en porcentaje con respecto a la longitud inicial (Silva, 2016).

### **III. Tiempo de fraguado**

Cuando se mezcla el cemento con el agua de amasado se produce una pasta que mantiene, durante un tiempo, una plasticidad casi constante. Posteriormente se aprecia un cierto atiesamiento que luego se irá pronunciando. El lapso que transcurre desde el mezclado hasta el momento de aparición del atiesamiento se conoce como tiempo de fraguado (Porrero, Ramos y Velazco, 2014).

Se destacan dos tipos de fraguado en el cemento, el primero se llama fraguado inicial (en ese momento ya no se debe perturbar la pasta), el cual se produce aproximadamente a las 3 horas, el segundo se llama fraguado final, el cual se produce aproximadamente a las 7 horas, en este tiempo la pasta de cemento se ha endurecido (Gomez, 2013). El procedimiento más usual es la aplicación de la aguja de Vicat, ensayo establecido en la Norma ASTM C266.

#### **c) Mortero**

##### **I. Resistencia a la compresión**

Este ensayo se efectúa según la Norma ASTM C109/C109M en cubos con aristas de 5.08 cm. Estos cubos se elaboran con una mezcla de una porción de cemento por 3 porciones de arena de OTAWA, que se ha adoptado como la de mayor aceptación según la ASTM. Se elaboran 8 cubos para ensayarlos por pares a un día, 3 días, 7 días y 28 días (Silva, 2016). El valor requerido para la aprobación de la norma varía del tipo de cemento y el rango puede estar entre 500 a 2900 psi.

## II. Contenido de aire

Esta prueba determina la capacidad del mortero elaborado con el cemento para albañilería<sup>4</sup> para generar burbujas de aire dentro de la masa de mortero durante la operación de mezclado. La prueba se basa en la determinación de la masa que ocupa un recipiente de 400 ml de un mortero elaborado en el laboratorio; luego, por medio de las cantidades de materiales mezcladas y las densidades individuales de cada uno de ellos, se establece la densidad del mortero y el volumen ocupado por la masa determinada en el recipiente de 400 ml. La resta de este volumen a los 400 ml da como resultado el volumen de aire en la mezcla. (IMCYC A.C., 2011). Este ensayo se debe realizar siguiendo los lineamientos de la Norma ASTM C185.

## III. Retención de agua

Esta prueba tiene como objeto determinar la capacidad que tiene el mortero elaborado con cemento para albañilería para retener el agua de mezclado como parte integral de la masa cuando ésta es sometida a una fuerza de succión que trata de separarla del resto de los materiales. (IMCYC A.C., 2011). Este ensayo se debe realizar siguiendo los lineamientos de la Norma ASTM C1506.

### 1.1.4. TIPOS DE CEMENTO

En la industria de la construcción se emplean diferentes tipos de cementos cuyas características de índole técnica o económica, pueden hacerlos importantes en algún tipo de obra, o en alguna región geográfica. A continuación se citan los más conocidos:

- a) **Portland.** Es un material producto de la fusión química a altas temperaturas de materiales calcáreos y arcillosos, este nuevo producto

---

<sup>4</sup> Cemento que emplea cal como componente activo en lugar de Portland. Se ampliará en la sección 1.2.4 y 1.2.5.

reacciona cuando hace contacto con el agua endureciéndose con el tiempo hasta convertirse en una piedra artificial, por lo que recibe también el nombre de cemento hidráulico. El método básico bajo el que se puede producir el cemento Portland fue descubierto por el inglés Joseph Aspdin en 1824, quien identificó al cemento como Portland por la semejanza del cemento endurecido con las canteras de la isla de Portland en Inglaterra. Desde su descubrimiento el cemento Portland se ha constituido en el material de construcción por excelencia, contándose a la fecha con una gran variedad de aplicaciones de productos derivados del cemento. (Gomez, 2013).

**b) De albañilería.** Estos cementos emplean la cal como componente activo en vez de Portland, lo que hace recomendable su uso en albañilería, para elaborar frisos o pegar bloques. Para ese uso específico se preparan también cementos que mezclan Portland con alguna proporción de caliza finamente molida (carbonato de calcio) con lo cual aumentan la retentividad de agua y la untuosidad de los morteros que se preparan con ellos, se les suele llamar también cementos de cal o de mampostería<sup>5</sup>. No alcanzan las mismas resistencias que los Portland por lo tanto se prohíbe el uso de este tipo de cemento para la fabricación de concreto estructural (Porrero, Ramos y Velazco, 2014).

**c) Aluminosos.** Se sigue un procedimiento similar al empleado para el Portland, aunque a temperaturas mucho más altas y cuyos componentes principales son alúmina y cal, se fabrica un cemento que se denomina aluminoso. Desarrolla un gran calor de hidratación, adquiere altas resistencias tempranas y resiste muy bien el ataque de sulfatos. Sin embargo, se conocen muchos casos en los que, al cabo de cierto tiempo de

---

<sup>5</sup> Sistema constructivo formado por bloques que pueden ser de arcilla cocinada, piedra o concreto.

terminada la obra, el cemento había sufrido cambios en su cristalografía<sup>6</sup> con degradación de sus propiedades y posterior ruina total de la construcción. Actualmente se pueden preparar cementos aluminosos sin ese grave problema, pero persiste el temor a emplearlos estructuralmente, razón por la cual algunos países han prohibido oficialmente su uso. Este cemento es muy útil para preparar concretos refractarios<sup>7</sup> (Porrero, Ramos y Velazco, 2014).

**d) Supersulfatados.** Otro cemento distinto es el que se identifica como sobre sulfatado o supersulfatado. Está constituido por escoria siderúrgica y yeso, con una pequeña adición de Clinker Portland. Es un cemento con muy buenas características resistentes y de durabilidad. Exige escorias de una composición muy especial (Porrero, Ramos y Velazco, 2014).

**e) De retracción controlada.** Los cementos sin retracción se fabrican sobre la base de Clinker Portland de composición especial, añadiendo productos capaces de compensar la retracción. Hoy día se producen cementos con expansión controlada, que tienen mayor finura que el Portland y menor tiempo de fraguado, con una muy ligera ganancia de resistencia mecánica. Algunos de ellos son de tan alta capacidad expansiva que se usan como agentes demolidores, en sustitución de los explosivos (Porrero, Ramos y Velazco, 2014).

---

<sup>6</sup> Ciencia que se ocupa de la forma y propiedades de las sustancias cristalinas y estudiar las propiedades de los sólidos cristalinos para poder describir su estructura interna o atómica, sus diversas formas y su división en clases y sistemas.

<sup>7</sup> Materiales no metálicos convenientes para usarse en la construcción de hornos y que poseen la propiedad de no deformarse o fundirse cuando se someten a la acción de temperaturas elevadas.

### 1.1.5. CEMENTO DE MAMPOSTERÍA

El cemento para mampostería<sup>8</sup> es un producto específicamente diseñado y fabricado para ser utilizado en la producción de mortero<sup>9</sup> para pega y repello o revoque de ladrillos y bloques, consiste en una mezcla homogénea controlada de cemento Portland, materiales plastificantes inorgánicos tales como cal hidratada o piedra caliza pulverizada, junto con otros materiales introducidos para mejorar las propiedades del mortero. El cemento Portland contribuye a la resistencia a la compresión y adherencia del mortero. Los plastificantes y otros materiales optimizan la trabajabilidad, la retención de agua y la manejabilidad o tiempo en que mantiene su consistencia; contribuyen a mejorar la durabilidad y a reducir la absorción de agua del mortero (Tobón, 2017).

#### 1.1.5.1. TIPOS DE CEMENTO DE MAMPOSTERÍA

La Tabla 1.4 muestra los tipos de cemento de mampostería de acuerdo a la Norma ASTM C91.

**Tabla 0.5 Clasificación del cemento de mampostería.**

| <b>CEMENTO DE MAMPOSTERÍA</b> | <b>DEFINICIÓN</b>  |
|-------------------------------|--|
| <b>Tipo N</b>                 | Para uso en la preparación de mortero tipo N según ASTM C270 sin adiciones posteriores de cemento o cal hidratada. |
| <b>Tipo S</b>                 | Para uso en la preparación de mortero tipo S según ASTM C270 sin adiciones posteriores de cemento o cal hidratada. |
| <b>Tipo M</b>                 | Para uso en la preparación de mortero tipo M según ASTM C270 sin adiciones posteriores de cemento o cal hidratada. |

Fuente: Elaboración propia con base a la información de (COGUANOR.Comision Guatemalteca de Normas, 2012)

---

<sup>9</sup> Conglomerante que se obtiene al mezclar cemento, arena y agua. Se ampliara en la sección 1.3.

### 1.1.5.2. PROPIEDADES DEL CEMENTO DE MAMPOSTERÍA

El cemento de mampostería debe cumplir con los requisitos aplicables prescritos en la Tabla 1.5 a continuación:

**Tabla 0.6 Requisitos físicos que un cemento de mampostería debe cumplir.**

| <b>Tipo de cemento de mampostería</b>  | <b>Tipo N</b> | <b>Tipo S</b>  | <b>Tipo M</b>  |
|--|---------------|----------------|----------------|
| Finura, residuo en tamiz 45 $\mu$ m (No.325), máx., %  | 24            | 24             | 24             |
| Expansión en autoclave, máx., %  | 1             | 1              | 1              |
| Tiempo de fraguado, Método de Gilmore  |               |                |                |
| Fraguado inicial, minuto, no menor que:  | 120           | 90             | 90             |
| Fraguado final, minutos, no mayor que:   | 1000          | 1000           | 1000           |
| Resistencia a la compresión (prom. 3 cubos):   |               |                |                |
| La resistencia a la compresión de cubos de mortero, compuesto de 1 parte de cemento y de 3 partes de arena estándar mezclada (mitad de arena estándar graduada y mitad de arena estándar 20-30) por volumen, preparados y ensayados de acuerdo con esta especificación debe ser igual o mayor a los valores especificados para la edades indicadas a continuación: |               |                |                |
| 7 días, Mpa (lb/pulg <sup>2</sup> )  | 3.4 (500)     | 9.0<br>(1300)  | 12.4<br>(1800) |
| 28 días, Mpa (lb/pulg <sup>2</sup> )   | 6.2 (900)     | 14.5<br>(2100) | 20.0<br>(2900) |
| Contenido de aire del mortero, preparado y ensayado de acuerdo con los requisitos de esta especificación:  |               |                |                |
| Mínimo, Volumen, %   | 8             | 8              | 8              |
| Máximo, Volumen, %   | 21            | 19             | 19             |
| Retención de agua, min, % del flujo original:  | 70            | 70             | 70             |

Fuente: (COGUANOR.Comision Guatemalteca de Normas, 2012)

## 1.2. MORTEROS

Pueden definirse como la mezcla de material aglomerante (cemento Portland y/u otros cementantes), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, con propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto y son ampliamente utilizados para pegar piezas de mampostería en la construcción de muros, o para recubrirlos, en cuyo caso se le conoce como recubrimiento, repello o revestimiento (Molina E., 2006).

Tienen un comportamiento plástico cuando se mezclan (estado fresco) y rígido cuando endurecen (estado endurecido) (Marín, 2014).

### 1.2.1. COMPONENTES DE LOS MORTEROS (Zambrano, 2013).

A continuación se presentan los principales componentes de un mortero de cemento:

- a) **Cemento.** Es el responsable de dar las resistencias iniciales. Pueden existir morteros fabricados con cemento Portland o cemento de mampostería (Zambrano, 2013)
  
- b) **Cal.** Complementa las propiedades del cemento, dándole mayor manejo, plasticidad y retención de agua. Las principales propiedades que brinda el adicionar cal a la mezcla de mortero son: (Zambrano, 2013)
  - b1. Adherencia.** La cal permite mayor adherencia entre el mortero y las unidades de mampostería.
  
  - b2. Trabajabilidad.** La cal permite al mortero ser moldeable incluso al contacto con unidades porosas y muy absorbentes. Esta característica se



debe directamente a la gran capacidad de la cal de retener agua por su mayor área superficial y la forma aplanada de las partículas, permitiendo que exista más lubricación en la mezcla y por lo tanto mayor manejo.

**b3. Flexibilidad.** Al adicionar cal a la mezcla de mortero, ésta permite movimientos entre piezas.

**b4. Curado de fisuras.** Los morteros con cal tienen la capacidad de auto repararse ya que al reaccionar con el agua éste puede salir a través del agua de evaporación, generándose una lechada en las fisuras y haciendo que éstas se sellen.

**c) Agua.** Cumple la función de hidratar y dar manejabilidad a la mezcla, y su importancia en los morteros es alta. Mayores cantidades de agua incrementan la adherencia y la manejabilidad pero se disminuye la resistencia y aumentan los cambios volumétricos (Zambrano, 2013).

**d) Agregados.** Representan en volumen la mayor porción de la mezcla. Es importante tener en cuenta su gradación y contenido de finos, pues esto puede disminuir o aumentar la resistencia, y la cantidad de cemento y cal de la mezcla (Zambrano, 2013).

**e) Aditivos:** Existe en el mercado una amplia gama de posibles aditivos que ayuden a mejorar o dar algunas características a las mezclas de mortero para hacer más fácil su colocación y manejo. Retardantes, acelerantes, larga vida, modificadores de adherencia son algunos de los que podemos encontrar (Zambrano, 2013).

## 1.2.2. TIPOS DE MORTEROS

Los morteros pueden tener una función estructural, y pueden usarse en la construcción de elementos estructurales, o en la mampostería estructural en donde puede ser de pega o de relleno en las celdas de los muros.

Existen otros morteros que no tienen función estructural y se destinan a recubrimiento como pañetes, repellos o revoques. Por lo que los morteros se clasifican de acuerdo a su función en:

- a) **Mortero de pega.** Debe tener cualidades especiales, diferentes a los morteros usados para otros fines porque está sometido a las condiciones especiales del sistema constructivo, y una resistencia adecuada ya que debe absorber esfuerzos de tensión y compresión (Zambrano, 2013).
  
- b) **Morteros de relleno.** Se utilizan para llenar las celdas de los elementos en la mampostería estructural, y al igual que el mortero de pega debe tener una adecuada resistencia (Zambrano, 2013).
  
- c) **Morteros de recubrimiento.** Ya que su función no es estructural sino de embellecimiento, o la de proporcionar una superficie uniforme para aplicar la pintura, no requieren una resistencia determinada; la plasticidad juega en ellos un papel muy importante (Zambrano, 2013).

Los morteros también pueden clasificarse de acuerdo a sus propiedades en:

- a) **Mortero tipo N.** Es el tipo de mortero multipropósito para uso en las estructuras de mampostería. Es apropiado para pañete y paredes interiores de partición. Este mortero de resistencia media es el que mejor combina las propiedades de resistencia, trabajabilidad y economía. Cuando la proporción de cemento:cal:arena es 1:1:6 la resistencia obtenida en el laboratorio es

superior a 19.6 kPa, mientras que las mezclas de cemento de mampostería y arena usualmente reportan resultados de 12.6 kPa (Medina, 2017).

**b) Mortero tipo M.** Es una mezcla de alta resistencia que ofrece mayor durabilidad que otros tipos de mortero.

Se recomienda para mampostería reforzada o sin refuerzo que pueda estar sujeta a altas cargas de compresión, a acción severa de congelamiento, opresión lateral de tierra, vientos huracanados o terremotos. Al ser de durabilidad superior, los morteros tipo M pueden ser usados en estructuras enterradas, que estén en contacto con suelos, tales como fundaciones, muros de contención y alcantarillas (Medina, 2017).

**c) Mortero tipo S.** Este tipo de mortero posee mayor adherencia que otros morteros por lo cual se utiliza en estructuras sometidas a cargas de compresión normales, pero que a la vez requieran alta adherencia y debe usarse en casos donde el mortero es el único agente de adherencia con la pared, como el revestimiento de cerámicas (Medina, 2017).

### **1.3. LADRILLO CERÁMICO.**

La materia prima base para elaborar el cemento cerámico son los residuos de la industria cerámica, es por ello que es necesario conocer su composición química, proceso de fabricación así como también evaluar la disponibilidad de dichos residuos en El Salvador para sus posterior aprovechamiento.

### **1.3.1. DEFINICIÓN DE LADRILLO CERÁMICO**

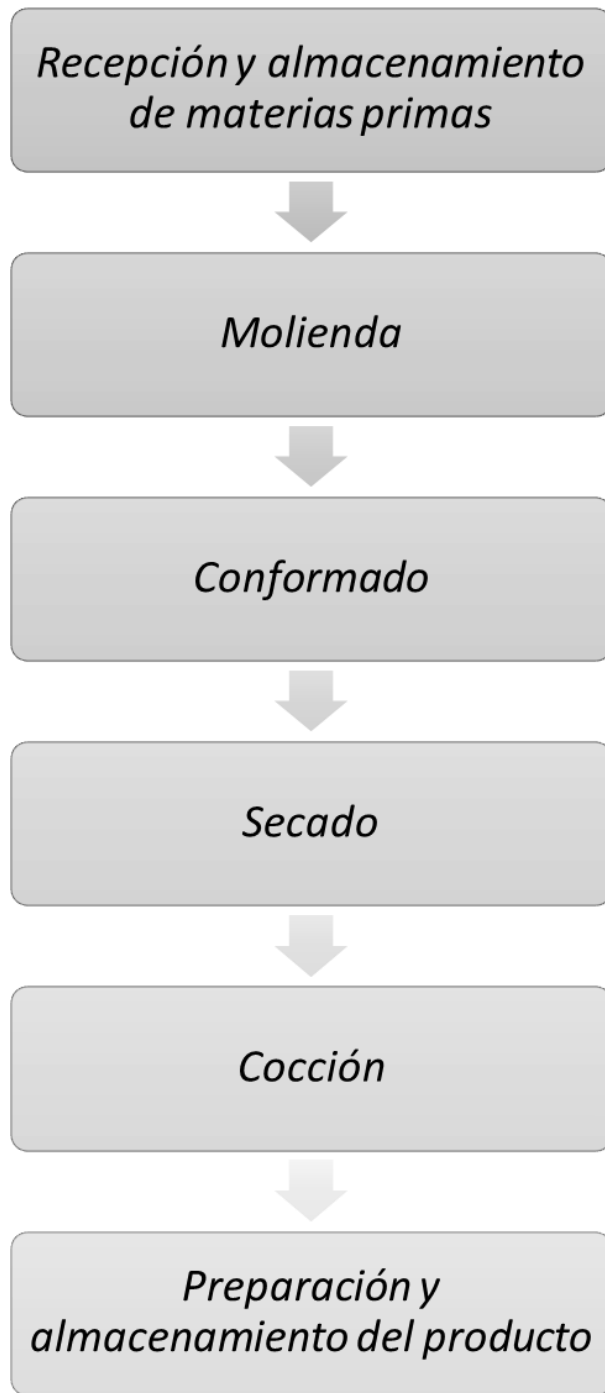
Los compuestos químicos constituidos por metales y no metales (óxidos, nitruros y carburos) pertenecen al grupo de las cerámicas, que incluye minerales de arcilla, cemento y vidrio. Por lo general se trata de materiales que son aislantes eléctricos y térmicos y que a elevada temperatura y en ambientes agresivos son más resistentes que los metales y los polímeros. Desde el punto de vista mecánico, las cerámicas son duras y muy frágiles.

La mayoría de las cerámicas son compuestos formados por elementos metálicos y no metálicos cuyos enlaces interatómicos pueden ser de carácter totalmente iónico, o bien de carácter predominantemente iónico con algún carácter covalente. El término “cerámica” proviene de la palabra griega “*keramikos*”, que significa “cosa quemada”, indicando de esta manera que las propiedades deseables de estos materiales generalmente se alcanza después de un tratamiento térmico a alta temperatura que se denomina cocción.

Las cerámicas tradicionales, son aquellas para las cuales la materia prima de partida es la arcilla; los productos considerados dentro de esta familia son porcelana fina, porcelana eléctrica, ladrillos, baldosas y también vidrios y cerámicas refractarias (Callister, Jr, 2013).

### **1.3.2. PROCESO DE PRODUCCIÓN.**

Las etapas del proceso de fabricación de cerámicos de diverso tipo, a partir de arcilla, se resumen en la Figura 1.2 (Campos Avella, Lora Figueroa, Meriño Stand y Tovar Ospino, 2011).



**Figura 0.2 Etapas básicas en el proceso de producción de cerámicos.**  
Fuente: Elaboración propia, a partir de información de (Campos Avella, Lora Figueroa, Meriño Stand y Tovar Ospino, 2011).

### **1.3.2.1. RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS**

La mayoría de empresas dedicadas al sector cerámico obtienen la materia prima de canteras cercanas al emplazamiento donde se encuentran ubicadas (ya sean propias o ajenas). Esta arcilla sin tratar es transportada mediante camiones hasta el emplazamiento donde se descarga y se almacena hasta su posterior uso.

El transporte de las arcillas en el interior de la planta se realiza mediante cintas transportadoras que pueden ser de tres tipos, de acero, de goma o de escamas.

### **1.3.2.2. MOLIENDA DE MATERIA PRIMA**

En el proceso de molienda se realiza la trituración de la arcilla sin tratar que provenga directamente de la cantera, y se obtiene la materia prima con la granulometría y textura necesarias para su posterior conformado. Puede llevarse a cabo de dos formas distintas, por vía seca o por vía semi-húmeda.

Las arcillas secas y duras se preparan mejor en instalaciones por vía seca. Este tipo de sistema asegura la obtención de un porcentaje importante de partículas finas que se humectan con más facilidad y rapidez, obteniéndose una masa muy homogénea y de mayor plasticidad. Como consecuencia obtenemos un mejor acabado y una mayor resistencia mecánica, tanto del material seco como del producto cocido.

Por otro lado, también puede llevarse a cabo este proceso por vía semi-húmeda, donde el proceso de humectación de la arcilla puede comenzar desde el mismo lecho de homogeneización. En estas condiciones el agua queda fuertemente ligada al cristal arcilloso, dando como resultado un aumento de la plasticidad y cohesión de la masa arcillosa, así como un aumento de su resistencia a las tensiones del secado.

En algunos casos, la arcilla molida puede ser mezclada con distintos aditivos según los requerimientos de calidad del producto final.

Existen distintos tipos de maquinaria para llevar a cabo este proceso según el tipo de molienda que se realice. Para la rotura de la arcilla en vía semi-húmeda se utiliza el molino de martillo o muelas. Si la trituración se realiza en la mina o cantera, se utiliza la desmenuzadora, que admite desde mineral seco hasta una humedad máxima del 20%. Para el proceso de mezcla es además usual la utilización del rallador alimentador rotativo, que permite obtener una perfecta mezcla entre los aditivos y la arcilla.

En la Figura 1.3 se muestra el molino de bolas por vía semi-húmeda utilizado en la planta procesadora de ladrillos cerámicos que se visitó para la obtención de los desechos cerámicos.



**Figura 0.3 Fotografía de trituración de arcilla en molino de bolas por vía semi-húmeda.**

### **1.3.2.3. CONFORMADO DE PIEZAS CERÁMICAS**

Esta etapa tiene por finalidad dar forma a las piezas, las cuales deben tener un grado de humedad adecuado ya que un conformado con excesiva cantidad de agua dará lugar a un tiempo de secado mayor, y a cambios dimensionales mayores. Por el contrario si se pretende evitar la retracción del secado deben emplearse pastas más secas. A continuación se presentan las etapas a seguir en el proceso de conformado:

#### **a) Amasado**

La arcilla debe estar lo bastante húmeda (en general entre valores de 12 a 15% de humedad) para que se pueda mantener unida cuando se trabaja. En el amasado se regula el contenido de agua de la mezcla de la arcilla mediante la adición de agua o vapor (el vapor puede provenir de una caldera auxiliar).

Para el amasado de la arcilla, en las fábricas de cerámica se utiliza la amasadora, máquina especialmente diseñada para la homogeneización de una mezcla de arcilla y la incorporación de más agua o de colorantes y aditivos.

La humedad que se debe conseguir en la arcilla se puede proporcionar por dos caminos, adición directa de agua en la pasta, o mediante el vapor producido por una caldera auxiliar.

#### **b) Moldeo**

En el caso del moldeo el proceso puede diferir en función del material a fabricar. Los sistemas de moldeo más empleados en la industria cerámica son:

- Moldeo manual: Cerámica artística, ladrillera.
- Tornos cerámicos: Cerámica artística, vajillas.
- Colada: Loza sanitaria.
- Extrusión: Ladrillera.



- Prensado en semi-seco: Baldosas y azulejos.
- Prensado en seco: Azulejos, baldosas, refractarios, vajillas y piezas especiales.

Los sistemas que producen piezas con menor cantidad de agua son el prensado en seco (4% de humedad) y el prensado en semi-seco (10-15% de humedad). El sistema de colada es el que produce piezas con mayor contenido en agua.

Los sistemas más utilizados de moldeo son la extrusión y el prensado, en la Figura 1.4 se presentan las piezas de conformado luego de haberse sometido al proceso de moldeo en la planta procesadora de ladrillos cerámicos visitada para la obtención de la materia prima.



**Figura 0.4 Fotografía del transporte de piezas de conformado hacia horno, luego de moldeo**

#### **1.3.2.4. SECADO**

El objetivo del secado es la reducción del contenido de humedad de las piezas antes de su cocción, es una operación compleja en la que convergen múltiples factores: naturaleza de la arcilla, grado de preparación y homogeneización, tensiones que pueden haber tenido lugar durante el moldeo, diseño y formato de la pieza, uniformidad o des uniformidad de secado, etc.

El tipo de secado que se lleve a cabo influirá en la resistencia y calidad final de la pieza después de su cocción.

El secado de una pieza cerámica de cualquier tipo transcurre en dos fases:

1. Eliminación del agua de mojado a velocidad constante manteniéndose húmeda la superficie de la pieza. En esta etapa se produce una contracción en la pieza igual al agua eliminada.
2. La velocidad de eliminación del agua decrece manteniéndose seca la superficie de la pieza. La contracción de esta etapa es muy pequeña.

El problema fundamental del secado es evitar que la contracción que sufre la pieza origine agrietamientos y roturas. Este condicionante controla la velocidad de secado ya que un secado excesivamente rápido puede agrietar la pieza. Para eliminar estos defectos en las piezas hay que evitar que los gradientes de humedad en la pieza sean excesivamente elevados. (Campos Avella, Lora Figueroa, Meriño Stand, & Tovar Ospino, 2011).

### 1.3.2.5. COCCIÓN DE PRODUCTOS CERÁMICOS.

La cocción es la fase más importante y delicada del proceso de fabricación de productos cerámicos.

En este proceso se confiere a la pieza las propiedades deseadas, al mismo tiempo que se muestra si las fases precedentes (amasado, moldeo y secado) se han llevado a cabo correctamente o no. Las piezas se cuecen en hornos, a una temperatura que va desde 875° C hasta algo más de 1000°C.

Los dos tipos de hornos más utilizados en el proceso de cocción son los siguientes (Campos Avella, Lora Figueroa, Meriño Stand y Tovar Ospino, 2011):

#### **a) Horno túnel.**

El principio del horno de túnel es que está formado por una zona de fuego fija, mientras la mercancía a cocer se desplaza.

Dentro del horno se distinguen tres zonas: precalentamiento, cocción y enfriamiento.

**a1. Precalentamiento.** En esta zona existe una corriente de aire caliente procedente de la zona de cocción que circula en sentido contrario al material. Normalmente se utiliza como fuente térmica el calor recuperado del horno y se pretende que el material pierda su contenido en agua (tanto la absorbida superficialmente como la estructural) aumentando la temperatura de manera progresiva.

**a2. Cocción.** Los quemadores de combustible se ocupan de conseguir la curva de cocción óptima en la parte central del horno.

**a3. Enfriamiento:** el material se somete a enfriamiento progresivo, con el objetivo de evitar grietas en las piezas por un contraste brusco de la temperatura.

#### **b) Horno Hoffman**

A diferencia del horno túnel, en este caso el material a cocer se mantiene estático, y es el fuego el que se desplaza a lo largo de las distintas cámaras hasta conseguir una curva de cocción de características similares a las generadas en los hornos túnel.

Este tipo de horno está formado por una serie de cámaras unidas, que son llenadas por el material seco proveniente del secadero, donde los quemadores se desplazan de una cámara a otra, cocinando el material. Este sistema también permite el precalentamiento de la mercancía y la refrigeración de los gases de escape.

Los quemadores del horno, que pueden consumir diversos combustibles (gas natural, fuel oil, coque de petróleo, orujillo), son de varios tipos:

- De impulsos (verticales)
- Laterales de precalentamiento
- De gasificación.

#### **1.3.2.6. PREPARACIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL PRODUCTO**

Las piezas, ya terminadas, se depositan apiladas encima de pellets de madera o de las propias piezas y pueden envolverse con plástico retráctil y fleje para facilitar su posterior distribución.

Por otro lado, en algunas empresas se humecta el material terminado para aportar la consistencia requerida por el cliente, este proceso se lleva a cabo de dos maneras distintas en función de cada instalación.

- A través del regado del material con manguera
- Insertando el producto en piscinas ya preparadas para tal hecho.

El almacenamiento puede ser en nave cerrada o a la intemperie, este proceso puede realizarse de manera manual o mediante la empaquetadora, para la colocación de flejes o retractilado de plástico de los paquetes de material terminado.

### **1.3.3. INDUSTRIA DE LADRILLOS CERÁMICOS EN EL SALVADOR.**

Se identificó en El Salvador una fábrica manufacturera de ladrillos cerámicos que a finales del año 2007 inicio operaciones, sus productos se distribuyen en el mercado Salvadoreño, Centroamérica y Caribe. Esta planta compite con las dos únicas plantas de este tipo en la región Centroamericana, ubicadas en Guatemala: Hispacensa y Samboro.

#### **1.3.3.1. CLASIFICACIÓN ARANCELARIA DE PRODUCTOS CERÁMICOS**

Las manufacturas y productos de cerámica se encuentran de acuerdo al Sistema Arancelario Centroamericano (SAC), dentro del Capítulo 69 como se muestra en la Tabla 1.6.

**Tabla 0.7 Partidas arancelarias en las que clasifican los productos de cerámica, yeso y sus manufacturas.**

| <b>Subpartida</b> | <b>Descripción</b>   |
|-------------------|--|
| 6902              | Ladrillos, placas baldosas y demás piezas de cerámica análogas de construcción                   |
| 6903              | Los demás artículos cerámicos refractarios (excepto los de harinas silíceas fósiles)             |
| 6904              | Ladrillos de construcción, bovedillas, cubre vigas y artículos similares, de cerámica            |
| 6905              | Tejas, elementos de chimenea, conductos de humo y demás artículos cerámicos de construcción      |
| 6906              | Tubos, canalones y accesorios de tubería, de cerámica  |
| 6907              | Placas, baldosas de cerámicas, sin barnizar  |
| 6908              | Placas, baldosas de cerámicas, barrizadas  |
| 6910              | Fregaderos, piletas, lavabos, bides, inodoros, cisternas y aparatos fijos similares, de cerámica |
| 6911              | Vajillas y demás artículos de uso doméstico, higiene de tocador, de porcelana                    |
| 6912              | Vajillas y demás artículos de uso doméstico  |
| 6913              | Estatuillas y demás objetos de madera  |
| 6914              | Las demás manufacturas de cerámica   |

Fuente: (Superintendencia de administración tributaria, 2014)

### **1.3.3.2. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LADRILLOS CERÁMICOS EN EL SALVADOR**

Como en todo proceso de producción, en la industria de ladrillos cerámicos también se generan residuos procedentes del material terminado y este no puede ser reprocesado debido al alto costo que generaría su reprocesamiento.

Según en investigación técnica realizada a planta procesadora de ladrillos cerámicos, el 11% del total de la producción de ladrillos cerámicos son residuos (Cabrero, 2017), estas son piezas fracturadas durante el transporte, piezas fracturadas por golpes en su manipulación, piezas que no pasan la prueba de

tención, entre otros. En la figura 1.5 se muestra la magnitud de la generación de estos residuos cerámicos.



**Figura 0.5 Residuos cerámicos de una industria de ladrillos cerámicos en El Salvador.**

Con los datos de exportación brindados por el Banco central de Reserva, se estima la producción anual de residuos en la industria de ladrillos cerámicos en El Salvador, considerando que el 40% de la producción total es exportada y que el 11% de esa producción total son residuos (Cabrero, 2017).

La Tabla 1.7 está basada en información brindada por el Banco Central de Reserva (BCR, 2017) y entrevista en visita técnica a una industria de ladrillos cerámicos (Cabrero, 2017).

**Tabla 0.8. Estimación de residuos generados por la industria de ladrillos cerámicos en El Salvador 2010-2016.**

| <b>Año</b> | <b>Exportaciones (Kg)</b> | <b>Residuos(Kg)</b> |
|------------|---------------------------|---------------------|
| 2010       | 2,967,097.07              | 489,571.01          |
| 2011       | 1,880,387.11              | 310,263.87          |
| 2012       | 2,007,474.98              | 331,233.37          |
| 2013       | 1,927,195.94              | 317,987.33          |
| 2014       | 679,436.41                | 112,107.01          |
| 2015       | 334,691.63                | 55,224.12           |
| 2016       | 424,418.09                | 70,028.98           |

La industria de la construcción también genera este tipo de residuos en las actividades de remodelación o demolición de obras civiles, aunque los residuos generados por esta actividad no han sido cuantificados en esta investigación, pero se sabe que representan una problemática ya que al no existir una regulación de estos tipos de desechos, por lo general son dispuestos en predios baldíos, quebradas, apilados a horilla de calles, entre otros.

#### **1.4. CEMENTO CERÁMICO**

Teniendo en cuenta el concepto de cemento de mampostería se puede definir cemento cerámico como aquel cemento fabricado para ser utilizado en la construcción o revestimiento a partir de material cerámico que es igual de competitivo que el cemento tradicional pero reduce el impacto ambiental y la utilización de recursos, para ello es necesario la activación alcalina de los materiales por lo que en los siguientes apartados se describe en que consiste este proceso.

##### **1.4.1. PROCESO DE ACTIVACIÓN ALCALINA.**

Según (Torres-Carrasco y Puertas, 2017) desde la década de 1990, la investigación sobre activación alcalina ha crecido de forma espectacular en todos los rincones del mundo, con más de 100 centros de investigación activos (académicos y comerciales) que operan por todo el planeta, y la investigación detallada que tiene lugar en todos los continentes habitados. Muchos de estos trabajos se han basado en el desarrollo de materiales con un rendimiento aceptable, basado en las materias primas particulares que están disponibles en cada lugar.

Se ha establecido una gran cantidad de nombres aplicados a la descripción de estos materiales. Sin embargo, los términos de "materiales activados alcalinamente" y



"geopolímeros"<sup>10</sup> son, en nuestra opinión, los más adecuados y los que se van a emplear para referirnos a este tipo de cementos y hormigones.

Los materiales activados alcalinamente son la clasificación más amplia, que abarca esencialmente cualquier sistema aglutinante obtenido por reacción de una fuente de metal alcalino (sólido o disuelto) con un sólido en polvo de silicato (Deventer, John L, Peter, & David G, 2010).

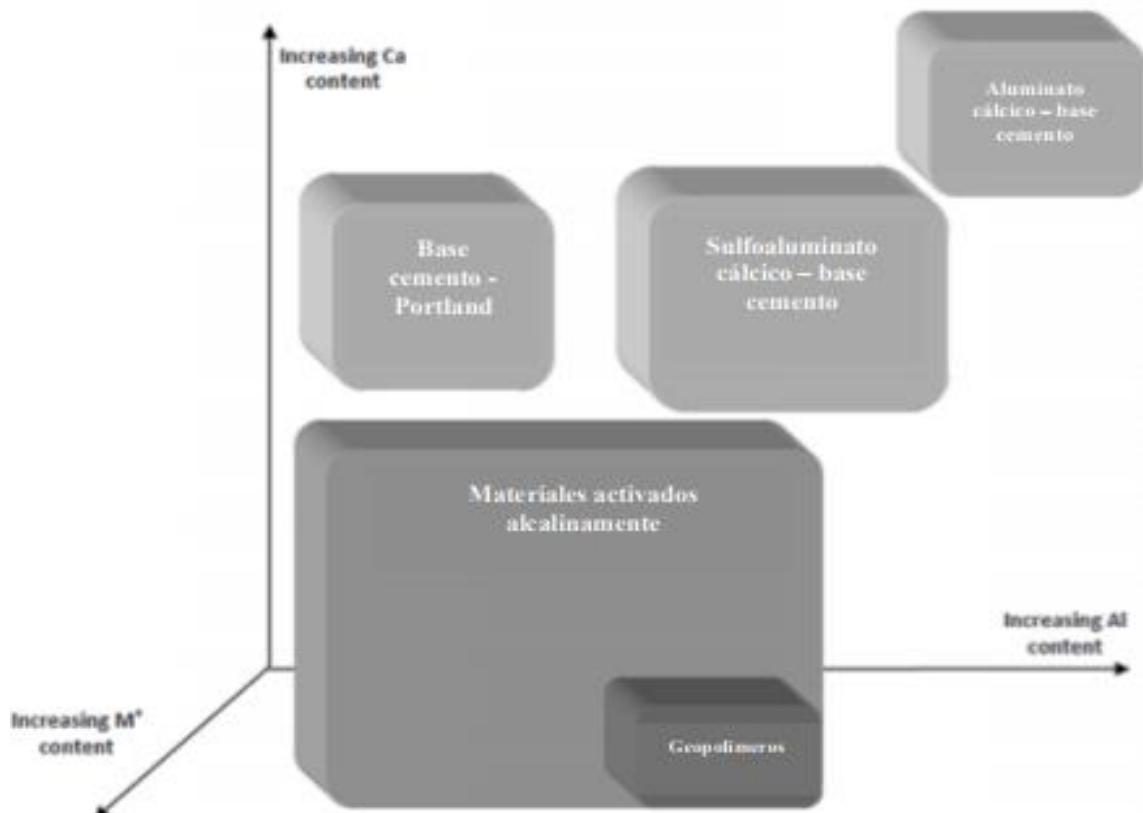
Estos sólidos pueden ser aluminosilicatos ricos o pobres en calcio, tales como las escorias de alto horno o las cenizas volantes, respectivamente. Las fuentes alcalinas empleadas pueden incluir hidróxidos alcalinos, silicatos, carbonatos, sulfatos, aluminatos u óxidos, esencialmente cualquier sustancia soluble que puede suministrar cationes de metales alcalinos, elevar el pH de la mezcla de reacción y acelerar la disolución del precursor sólido.

Las cenizas volantes con un bajo contenido en calcio y arcillas calcinadas (ej. metacaolin) son los precursores más comunes utilizados en la síntesis del geopolímero.

La distinción entre estas clasificaciones se muestra esquemáticamente en la Figura 1.6. (Provis & van Deventer, 2014). Esto es una vista muy simplificada de la química de los sistemas cementantes, basados principalmente en sistemas  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-M}_2\text{O-Fe}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$ . Lo que pretende este gráfico es ilustrar la clasificación de los materiales activados alcalinamente y su posición respecto a la del Cemento Portland Ordinario (OPC) y a los sistemas cementantes basados en sulfoaluminatos. Los geopolímeros se muestran aquí como un subconjunto de los materiales activados alcalinamente, con concentraciones elevadas de aluminio, silicio y álcalis.

---

<sup>10</sup> La palabra geopolímero se refiere en muchas ocasiones como un subconjunto de materiales activados alcalinamente.



**Figura 0.6 Clasificación de los materiales activados alcalinamente, con comparaciones entre el OPC y los sulfoaluminatos cálcicos.**

Fuente: (Provis & van Deventer, 2014)

En la Figura 1.6 el sombreado indica el contenido en álcalis aproximado, en donde, el sombreado más oscuro corresponde a mayores concentraciones de Na y/o K.

Durante las dos últimas décadas, los cementos y hormigones alcalinos han suscitado un gran interés entre la comunidad científica como en el sector de la construcción, debido a los motivos que se enumeran a continuación (Ruiz-Santaquiteria, 2013):

- a) Buenas prestaciones mecánicas desde muy cortas edades. Transcurridas las primeras 20 horas de curado, estos materiales pueden llegar a desarrollar resistencias mecánicas comparables a las que desarrolla el hormigón de cemento Portland tras 28 días de curado.

- b) Las emisiones de dióxido de carbono y el gasto energético del proceso de producción de estos cementos alcalinos son notablemente inferiores a los requeridos en la fabricación de cemento Portland; algunos autores estiman que estas reducciones están entre un 60-70%.
- c) La fabricación de este tipo de cementos ofrece la posibilidad de emplear (en muchas ocasiones) como única "materia prima" residuos industriales que, de otro modo, se acumularían en los correspondientes vertederos contribuyendo a la contaminación ambiental.
- d) Los hormigones de escorias y cenizas activadas presentan muy buenas prestaciones mecánicas. A modo de ejemplo, hormigones de escorias activadas alcalinamente con disoluciones de silicato sódico (waterglass) pueden alcanzar 68 MPa a un día de curado y 96 MPa a 3 días.
- e) Estos materiales ofrecen, en la mayoría de los casos, comportamientos durables similares o incluso mejores, que los que ofrecen los cementos Portland tradicionales: En la actualidad, existe un grupo perteneciente dentro de la RILEM ("Durability testing of alkali-activated materials-Technical Committee 247-DTA") liderado por el Prof. John L. Provis, en donde se pretende hacer un estudio exhaustivo sobre los diferentes ensayos de durabilidad a los que pueden someterse estos materiales activados alcalinamente con el fin de poder establecer unas normas específicas para dichos materiales. Muchos de estos ensayos en estos materiales alternativos al cemento Portland demostraron un comportamiento óptimo; pero también es cierto que muchas de estas normas, en ocasiones, no están adecuadas para el estudio y caracterización de los materiales alcalinos, debido principalmente a la diferente composición química existente entre los sistemas base cemento Portland y los sistemas de aluminosilicatos activados alcalinamente.

#### 1.4.2. COMPONENTES EN LA ACTIVACIÓN ALCALINA.

Las materias primas más utilizadas como precursores en la preparación de cementos activados alcalinamente son las escorias vítreas de alto horno (componentes ricos en calcio), las cenizas volantes procedentes de la combustión de carbón (pobres en calcio) y arcillas activadas térmicamente (en su mayoría metacaolín); o bien mezcla de algunos o varios de estos precursores.

Por lo general, las sales de álcalis o los hidróxidos alcalinos son los que se utilizan como activadores alcalinos de los cementos y hormigones activados alcalinamente. Se clasificaron en seis grupos de acuerdo a su composición química (Shi & Fernández-Jiménez, 2006):

- a. Hidróxidos alcalinos: MOH
- b. Sales de ácidos débiles:  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF, etc.
- c. Silicatos:  $M_2O \cdot nH_2O$
- d. Aluminatos:  $M_2O \cdot nAl_2O_3$
- e. Aluminosilicatos:  $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6)SiO_2$
- f. Sales de ácidos fuertes:  $M_2SO_4$

De todos estos activadores, NaOH,  $Na_2CO_3$ ,  $Na_2O \cdot nSi_2$  y  $Na_2SO_4$  son los productos químicos más ampliamente disponibles. Algunos compuestos de potasio se han utilizado en estudios de laboratorio. Sin embargo, sus posibles aplicaciones serán muy limitadas debido a su disponibilidad y coste. Por otro lado, las propiedades de los compuestos de sodio y potasio son muy similares. Estos activadores alcalinos se pueden utilizar en forma líquida o sólida. Se tiende a preparar cementos que incorporen el precursor y el activador (en estado sólido) y utilizar agua como líquido de amasado.

#### **1.4.2.1. ACTIVADORES ALCALINOS**

Los activadores alcalinos son el segundo componente esencial en el desarrollo de los cementos alcalinos. Estos activadores se suelen incluir en la mezcla como una disolución, aunque también se pueden incorporar en estado sólido, bien mezclado o integrado con la escoria y/o ceniza.

Generalmente, los activadores más empleados suelen ser hidróxidos y silicatos alcalinos. Sin embargo, la naturaleza de los activadores juega un papel muy importante en el proceso de activación tanto en escorias como en cenizas volantes, siendo el efecto del pH y la influencia de los cationes-aniones unos parámetros a considerar.

##### **a) Efecto del pH**

El papel más crítico del activador alcalino en un material activado alcalinamente es el disolver el aluminosilicato y acelerar la reacción, lo cual se consigue mediante la generación de un pH elevado. Los silicatos e hidróxidos alcalinos son los que generan los valores de pH más elevados, mientras que los carbonatos y sulfatos generan condiciones moderadamente alcalinas y generan hidróxido libre para el proceso de activación a través de reacciones que implican el calcio de la escoria.

En términos generales, el pH de las disoluciones activadoras tiene que ser superior a 11.5. Valores óptimos para la activación de escorias vítreas de horno alto están alrededor de 13-13.6. Además, el efecto del pH en la activación de las escorias tiene una dependencia muy elevada del tipo de activador, debido a que la solubilidad del calcio disminuye a pH más altos mientras que la sílice y alúmina aumentan sus solubilidades. Aunque las disoluciones activadoras de NaOH tienen un valor de pH mayor que las disoluciones de silicato sódico en concentraciones de álcalis similares, cantidades comparables de escoria que reaccionan en presencia de cada uno de los tipos de activadores, provoca que los silicatos desarrollen una mayor resistencia mecánica que en los sistemas activados con NaOH. Esto es una consecuencia de una fuente adicional de silicato en dichos sistemas que reaccionan

con los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  procedente de la escoria disuelta, formando productos de reacción densos (gel C-S-H).

Los activadores óptimos que generalmente se emplean en la activación de aluminosilicatos con bajos contenidos en calcio (cenizas volantes) son aquellos que posean valores de pH similares al de una disolución de NaOH 8M. Una menor alcalinidad afecta negativamente a las propiedades mecánicas de los cementos debido a que la fuerza iónica generada en el sistema activador-aglutinante no es lo suficientemente elevada como para hidrolizar satisfactoriamente el silicio y el aluminio presentes en el material de partida.

#### **b) Efecto de los silicatos**

(Criado, Fernández-Jiménez, Palomo, Sobrados, & Sanz, 2008), estudiaron el efecto de diferentes grados de polimerización del activador (en proporciones de  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 0.17, 0.60$  y  $1.90$ ) en los productos de reacción intermedios generados durante la activación de las cenizas volantes. Observaron que este parámetro jugaba un papel fundamental en la cinética, la estructura y composición del gel inicial formado y que la adición de la sílice soluble afectaba a los intermedios de reacción, pero no al producto final. Señalaron que la relación Si/Al no aumentaba indefinidamente en el gel N-A-S-H y encontraron que los valores óptimos eran en torno a 2, hacia el cual el sistema tiende independientemente de las condiciones iniciales, posiblemente por razones de estabilidad termodinámica. Además, propusieron que el efecto de una sílice altamente polimerizada en la formación del gel N-A-S-H podría afectar a la cinética de la reacción, provocando un retardo de la misma y la cristalización de zeolitas.

#### **1.4.2.2. ACTIVADORES ALTERNATIVOS**

Actualmente existen varias vías de reutilización de diferentes residuos como potenciales activadores alcalinos alternativos al empleo de los silicatos sódicos comerciales, los cuales llevan asociados una problemática económica y medioambiental muy importante.

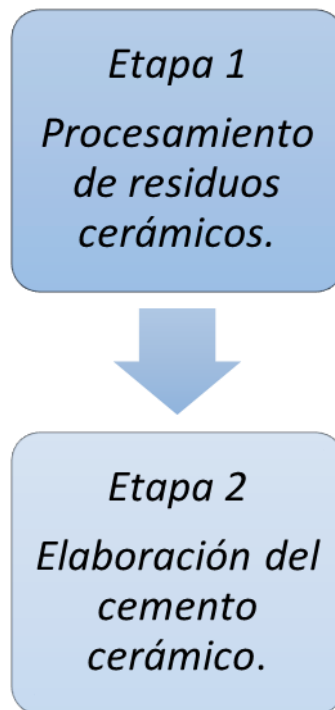
## CAPITULO II

### **2. DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA ELABORACIÓN DE CEMENTO CERÁMICO**

En el presente capítulo se describe la metodología y pasos a seguir que se llevaron a cabo para la activación del material de residuo de ladrillo cerámico con solución alcalina.

#### **2.1. METODOLOGÍA**

La experimentación se llevó a cabo en dos etapas: en la primera se procesaron los residuos cerámicos, mientras que en la segunda etapa se llevó a cabo la elaboración del cemento mediante la activación del material cerámico. En la Figura 2.1 se presentan de manera gráfica las etapas que conformaron el desarrollo experimental.



**Figura 2.1 Diagrama general de la metodología experimental.**

### 2.1.1. ETAPA 1: PROCESAMIENTO DE RESIDUOS CERÁMICOS

Esta etapa consiste en el tratamiento previo que se le dio al residuo de ladrillo cerámico antes de ser activado alcalinamente, se inició con la recolección de la materia prima para luego ser triturada en dos fases: trituración primaria y secundaria.

#### a) Recolección de residuos cerámicos (materia prima)

Los residuos cerámicos se recolectaron en una planta procesadora de ladrillos cerámicos ubicada en el municipio de Sacacoyo, Sonsonate. El proceso se realizó mediante el uso de palas y recipientes para su recolección tal como lo muestra la Figura 2.2, además del uso de equipo de seguridad: mascarillas para polvos y guantes de cuero. Se recolectaron aproximadamente 700 libras del material cerámico el cual posteriormente fue trasladado hasta el lugar donde sería triturado.



**Figura 2.2 Fotografía de la recolección de materia prima en planta procesadora de ladrillos cerámicos.**



**b) Trituración primaria en trituradora de mandíbula.**

La trituración primaria se realizó con la trituradora de mandíbula del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, se logró llevar el material a un tamaño de partícula con valores comprendidos entre 1.0 a 3.0 cm, tal como se presenta en la Figura 2.3. La trituración primaria se puede ver en el Anexo A1, Procedimiento 01.



**Figura 2.3 Trituradora de mandíbula y material triturado.**

**c) Trituración secundaria en molino de disco.**

La trituración secundaria se realizó con una pulverizadora de discos en un laboratorio certificado, logrando llevar el material hasta un tamaño promedio de partícula de 73.7 micras, ver Figura 2.4. La trituración secundaria se puede ver en el Anexo A1, Procedimiento 01.



**Figura 2.4 Pulverizadora de discos y material molido.**

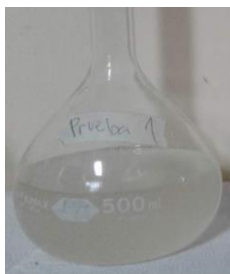
## 2.1.2. ETAPA 2: ELABORACIÓN DEL CEMENTO CERÁMICO

Para la obtención del cemento cerámico se debe realizar primeramente la tritución y pulverización del material utilizando el equipo respectivo, posteriormente se prepara la solución activadora alcalina utilizando las siguientes cantidades: 11.09 g de Hidróxido de Sodio, 100ml de Silicato de Sodio y 45ml de agua. Al tener lista la solución activadora se mezclan la solución activadora junto con el polvo cerámico en una relación de 1:3 respectivamente, se coloca la mezcla en una bandeja de plástico y se ingresa a la estufa a una temperatura de 65° hasta obtener un bloque sólido y quebradizo para que su tritución sea más fácil y finalmente luego de haber tritutado el material activado éste tiene que ser almacenado en botes herméticamente sellados para evitar la formación de grumos por acción de la humedad. El procedimiento anterior se describe detalladamente en el Anexo A1, Procedimiento 03.

A continuación, se describen de forma más detallada cada uno de los pasos para la obtención del cemento:

### a) Activación alcalina del material tritutado.

El proceso de activación alcalina inició con la preparación de la solución activadora de hidróxido de sodio y silicato de sodio, la preparación de la solución alcalina se describe en el Anexo A1, Procedimiento 02. Luego se pesó el material tritutado en balanza granataria y se determinó la razón de mezcla de la solución alcalina y material tritutado.



**Figura 2.5 Solución activadora.**



**Figura 2.6 Mezcla de la solución activadora con los residuos cerámicos.**

**b) Secado del material activado en estufa.**

El material previamente mezclado se ingresó a la estufa a temperatura constante aproximadamente por 24 horas. (Ver Figura 2.7)



**Figura 2.7 Secado en estufa de material mezclado.**

### c) Trituración del material activado seco en pulverizadora de disco

Una vez el material activado se encontró seco, se procedió a triturar en la pulverizadora de disco, en la Figura 2.8 se presenta el material luego de haber sido pulverizado.



Figura 2.8 Cemento cerámico.

### d) Almacenamiento del material

El material triturado se almacenó en recipientes plásticos y sellados, herméticamente con parafina, para evitar que absorba humedad del ambiente.



Figura 2.9 Cemento cerámico almacenado herméticamente.

## 2.2. PRUEBAS REALIZADAS A NIVEL DE LABORATORIO

De acuerdo al estudio realizado por Reig, Tashima, Borrachero, Monzo, & Cheesemann en el 2013, sugieren que la relación óptima entre el residuo cerámico triturado y la solución activadora sea de 1:3, la relación entre la cantidad de agua y solución activadora sea de 0.45, una relación molar entre el SiO<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>O de 1.6 y la Molalidad de iones sodios en la solución de 7.0, tal como se muestra a continuación:

$$\frac{\text{Solución activadora}}{\text{Material triturado}}, 1:3$$

$$\frac{\text{Agua}}{\text{Solución activadora}}, 0.45$$

$$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}}, 1.6$$

$$\text{Molalidad Na}^+ = 7.0$$

Teniendo en cuenta las relaciones mencionadas anteriormente, se realizaron tres pruebas tomando como base cálculo 1000g de material cerámico triturado y 333.33g de solución activadora (Relación 1:3).

Cabe recalcar que el punto de partida para la elaboración de pruebas fue por medio de la relación mencionada anteriormente a partir de esta se fueron variando las demás pruebas, los valores se resumen en la Tabla 2.1 a continuación:

**Tabla 2.1 Resultados de pruebas de laboratorio para activación del material cerámico**

| EN PRUEBAS LABORATORIO PARA ACTIVACION DE MATERIAL |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|
|  | PRUEBA 1 | PRUEBA 2 | PRUEBA 3 |
| Residuos cerámicos (g)                             | 1000.00  | 1000.00  | 1000.00  |
| Solución activadora (g)                            | 333.33   | 333.33   | 333.33   |
| Hidróxido de sodio(g)                              | 22.18    | 22.18    | 11.09    |
| Silicato de sodio(ml)                              | 200.00   | 100.00   | 100.00   |
| Agua (ml)  | 90.00    | 90.00    | 90.00    |

Para la selección de la mejor prueba se tomaron en cuenta las siguientes observaciones:

Prueba 1: Después de secado se observó que la pasta tenía una consistencia pegajosa y brillante lo cual se le atribuye a un exceso de silicato de sodio, por estas características se dificultaba la trituración.

Prueba 2: Presentó una consistencia quebradiza y menos brillante que la prueba, y la trituración se facilitó

Prueba 3: Se observó que la consistencia era demasiado grumosa aun después de triturada.

De acuerdo a lo anterior se seleccionó la **Prueba 2** como la conveniente para continuar con la investigación ya que se observó que al reducir a la mitad las proporciones de Silicato de Sodio de la pasta, con respecto a la Prueba 1 (Prueba que se realizó de acuerdo a los cálculos evaluados gracias a la información bibliográfica), esta se acercaba a condiciones adecuadas para su manipulación.

Por otro lado en la Prueba 3 se redujo las proporciones de Hidróxido de Sodio a la mitad con respecto a la Prueba 2 y está presente pequeñas masas compactas en la pasta que no se eliminaban inclusive después de la trituración posterior a su elaboración y se descartó para su utilización.

## **CAPITULO III.**

### **3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y FISICOMECAÁNICA DEL CEMENTO CERÁMICO ELABORADO**

Establecer las características principales del Cemento a partir del estudio de sus propiedades químicas y físicas es una etapa importante dentro de la investigación ya que este es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación. De igual forma es importante utilizar las distintas técnicas de caracterización, de acuerdo al interés de dicho material. Una vez conocidas las características del material puede establecerse la naturaleza del mismo, así como sus posibles aplicaciones.

En este capítulo se muestra el estudio de las características químicas tanto del desperdicio de ladrillo cerámico así como también del material activado y del cemento, además se explica la metodología de los diferentes ensayos que se deben de realizar para clasificar a un cemento de mampostería según la Norma ASTM C-91.

#### **3.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL RESIDUO DE LADRILLO CERÁMICO TRITURADO**

Por medio de la técnica de espectrofotometría de fluorescencia de rayos X se determinó la caracterización química del material de residuo de ladrillo cerámico. En la Tabla 3.1 se muestran los porcentajes de las diferentes concentraciones.

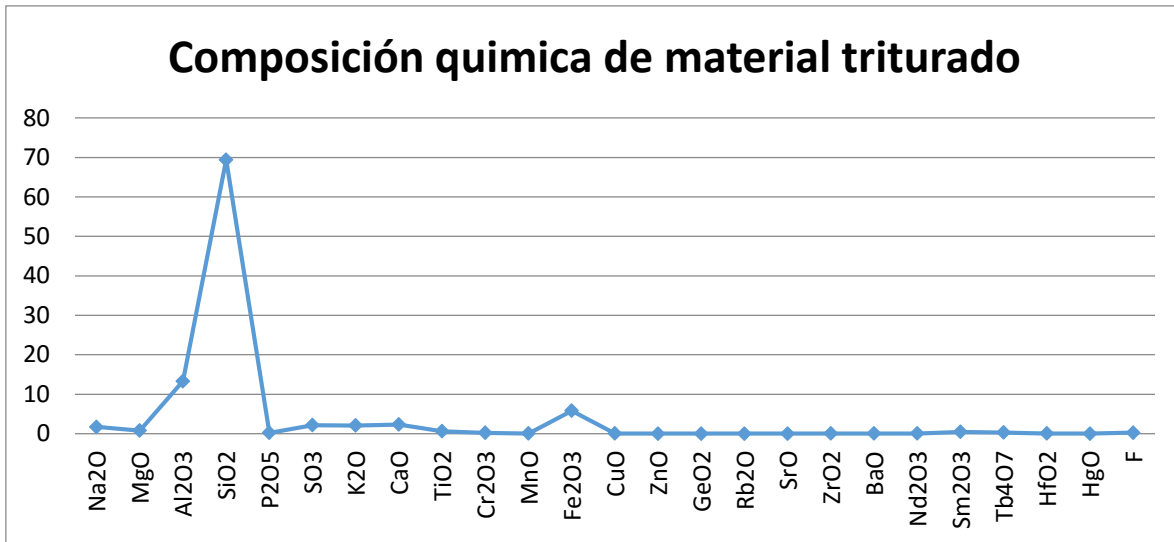
**Tabla 3.1 Caracterización química de desperdicio de ladrillo cerámico en estudio**

| <b>CONCENTRACION</b>           | <b>PORCENTAJE (%)</b> |
|--------------------------------|-----------------------|
| Na <sub>2</sub> O              | 1.721                 |
| MgO                            | 0.768                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.327                |
| SiO <sub>2</sub>               | 69.421                |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.196                 |
| SO <sub>3</sub>                | 2.181                 |
| K <sub>2</sub> O               | 2.075                 |
| CaO                            | 2.340                 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.613                 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.205                 |
| MnO                            | 0.069                 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.814                 |
| CuO                            | 0.040                 |
| ZnO                            | 0.023                 |
| GeO <sub>2</sub>               | 0.006                 |
| Rb <sub>2</sub> O              | 0.010                 |
| SrO                            | 0.019                 |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0.049                 |
| BaO                            | 0.049                 |
| Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.050                 |
| Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.439                 |
| Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub> | 0.301                 |
| HfO <sub>2</sub>               | 0.035                 |
| HgO                            | 0.012                 |
| F                              | 0.237                 |

Los datos anteriores demuestran los compuestos que se encontraron dentro del material, teniendo en mayor proporción Oxido de Silicio (SiO<sub>2</sub>) con un 69.42%, Oxido de Aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con un 13.33%, Óxido de hierro (III) (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con un 5.81%, Oxido de Calcio (CaO) con un 2.34%, Óxido de Azufre (SO<sub>3</sub>) con un 2.18%, Oxido de Potasio (K<sub>2</sub>O) con un 2.08%, Oxido de sodio (Na<sub>2</sub>O) con un 1.72% y luego se encuentran en menor proporción los demás componentes.

Para una mejor comprensión en la Figura 3.1 se representa en forma gráfica los resultados anteriores.





**Figura 3.1 Gráfico de la composición química de material cerámico residual triturado.**

### 3.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE CEMENTO CERAMICO ELABORADO

La caracterización química del material activado se realizó en un laboratorio certificado experimentado en elaboración de cemento, mediante difracción de rayos X, utilizando un difractómetro PANalytical X'pert HighScore Plus, v3.0. La identificación de los compuestos se reflejan en los diferentes picos de difracción, en la Figura 3.2 se observan fases como la albita, compuesto que tiene cualidades refractarias, es decir que resiste al calor y las altas temperaturas, típicas de una puzolana natural<sup>11</sup> entre otros compuestos.

<sup>11</sup> Son materiales naturales o artificiales que contienen sílice o alúmina, no son cementosas en sí pero cuando son molidas finamente y mezclados con cal la mezcla fraguará y endurecerá a temperaturas normales.

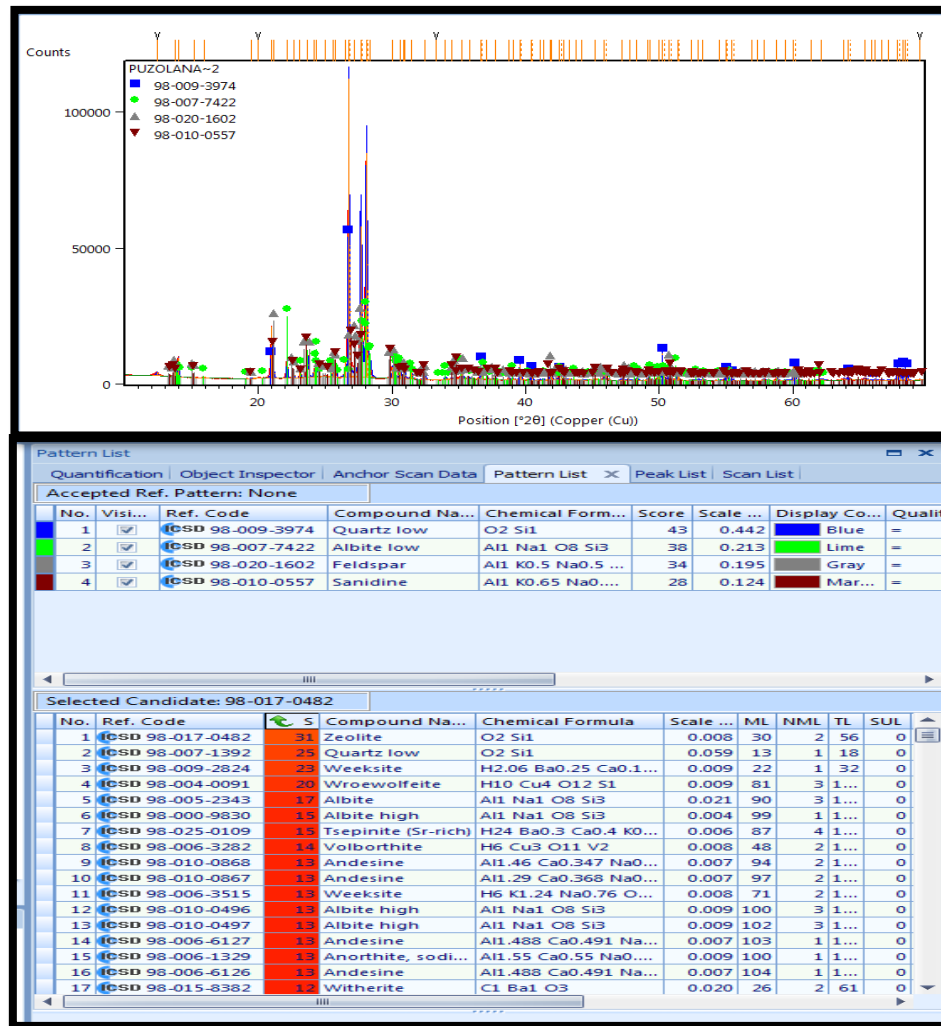


Figura 3.2 Difractograma obtenido de la caracterización química cemento cerámico.

Según los conceptos básicos definidos en la Sección 1.1.2 sobre los compuestos principales del cemento tradicional se sabe que la presencia de óxido de calcio debe ser entre un 62% a 65% (Ver Tabla 1.2), Con el conocimiento de la información anterior se puede identificar que el difractograma del material activado de la Figura 3.2 no tiene la presencia de calcita y portlandita, y estos son productos necesarios para la hidratación parcial del cemento e indicadores del potencial cementicio de la mezcla.

Por lo que se procedió a realizar una evaluación añadiéndole hidróxido de calcio al material activado con una proporción 50:50 de CaO:Material activado, ya que este presentaba una deficiencia de Calcio, compuesto que le confiere propiedades de manejo, plasticidad y retención de agua al cemento. El material activado que se evaluó fue con respecto a las diferentes soluciones activadoras que se realizaron en la sección 2.2., dando como favorable la Prueba 2 ya que presentó una mayor resistencia a la compresión en comparación de las demás, obteniéndose un mejor tiempo de secado. En la Figura 3.3 se muestran los tres morteros de las pruebas mencionadas que consisten en tener la misma cantidad de material e igual proporción de solución activadora y cal lo único que varía es la composición de solución activadora. (Ver Tabla 2.1)



**Figura 3.3 Pruebas obtenidas de material activado con cal.**

También se realizó la difracción de rayos X, utilizando un difractómetro PANalytical X'pert HighScore Plus, v3.0 en un laboratorio certificado, para la Prueba 2, en este caso como se puede observar en la Figura 3.4 se presentan diferentes fases como la calcita y portlandita, resultado de la adición de hidróxido de calcio al material activado con la solución alcalina.

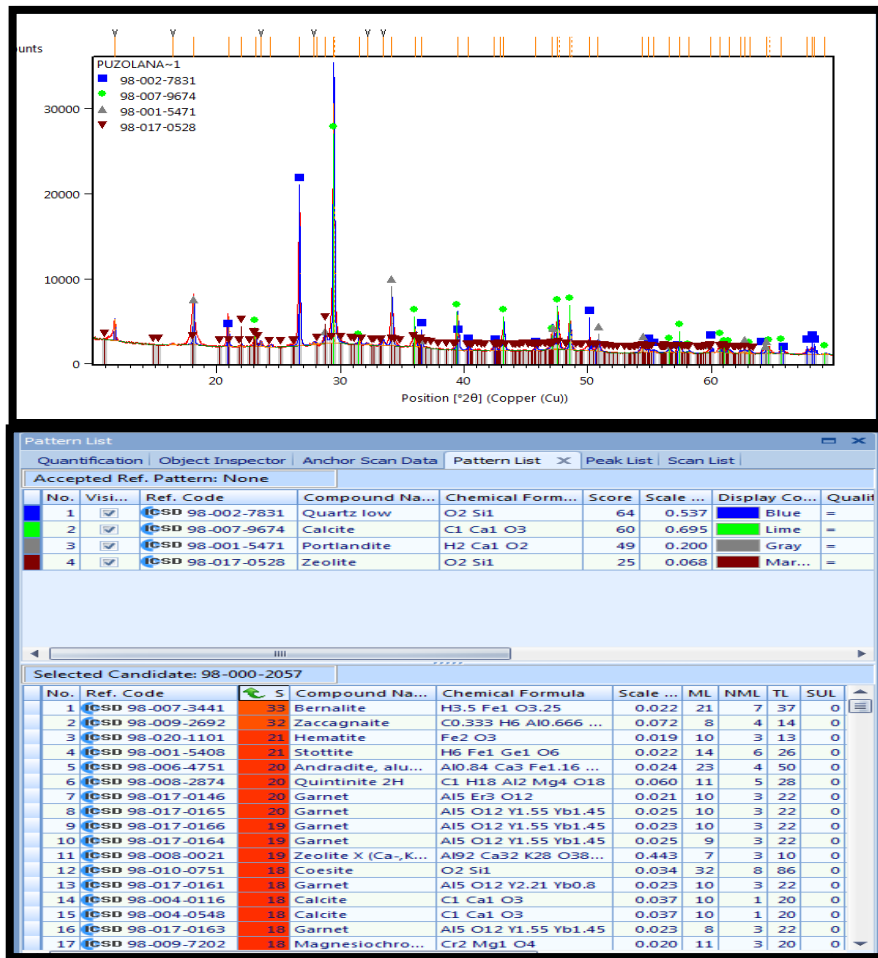


Figura 3.4 Difractograma obtenido de la caracterización química de material activado con cal en proporción 50:50.

### 3.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA

La comprensión de las propiedades físico mecánicas del cemento sirve para la interpretación adecuada de los resultados en los ensayos según las normas establecidas. Como ya se ha dicho anteriormente para esta investigación se utiliza como referencia la norma ASTM C-91, Esta especificación cubre tres tipos de cemento de mampostería para uso donde se requiere de mortero para la mampostería. Los ensayos de las propiedades físicas que se llevaron a cabo para la evaluación de nuestro cemento se presentan a continuación.

### **3.2.1. TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA**

En donde se tomó en cuenta la temperatura y la humedad relativa de aire en la vecindad de la losa de mezclado, depósito de materiales secos, moldes, placas de base y recipiente de mezcla deben conformarse a los requisitos de la norma NTG 41003 h4 (ASTM C 109/C109M). (*“Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”*).

El gabinete húmedo o el cuarto húmedo se conformaron de acuerdo a los requisitos de la norma ASTM C 511. (*“Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes”*).

### **3.2.2. ENSAYO DE FINURA**

Se determinó el residuo en el tamiz de 45  $\mu\text{m}$  (nº 325) de acuerdo con el método de ensayo ASTM C 430. (*“Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- $\mu\text{m}$  (No. 325) Sieve”*).

### **3.2.3. ENSAYO DE CONSISTENCIA NORMAL**

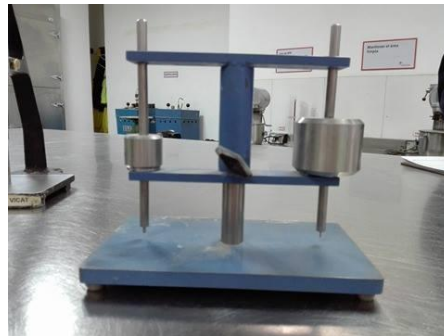
Se determinó la consistencia normal por el aparato de Vicat de acuerdo con el método ASTM C 187. (*“Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste”*).



**Figura 3.5** Aparato de Vicat utilizado en pruebas.

#### **3.2.4. ENSAYO DE TIEMPO DE FRAGUADO**

Se determinó el tiempo de fraguado con las agujas de Gillmore de acuerdo al método de ensayo ASTM C 266. (*“Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles”*).



**Figura 3.6** Aguja de Gillmore utilizada en las pruebas.

#### **3.2.5. ARENA ESTÁNDAR**

La arena estándar fue una mezcla en partes iguales por masa, de la arena estándar graduada y de la arena estándar 20-30, se cumplió con la especificación ASTM C 778. (*“Standard Specification for Standard Sand”*)



Figura 3.7 Arena estandarizada utilizada en pruebas.

### 3.2.6. PREPARACIÓN DEL MORTERO

Las proporciones para el mortero eran 1620 g de arena y una masa de cemento en gramos. La arena consistía en 810 g de arena estándar graduada y 810 g de arena estándar 20-30. La cantidad de agua, medida en mililitros fue la necesaria para producir un flujo de  $110 \pm 5$  como se determina de acuerdo con el método de ensayo NTG 41003 h4 (ASTM C109/C109M). “*Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*”

Los morteros se mezclaron de acuerdo con la práctica ASTM C 305. (“*Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*”)



**Figura 3.9 Elaboración de la mezcla para el mortero.**



**Figura 3.8 Ensayo de mesa de flujo.**

### **3.2.7. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

Luego de que se determinó el flujo y la masa del mortero se retornó todo el mortero al recipiente de mezcla y se remezcla por 15 s a una velocidad media. Luego se moldeo los especímenes de ensayo de acuerdo con el método de ensayo NTG 41003 h4 (ASTM C 109/C109M). (*“Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”*).

Inmediatamente después del moldeo, todos los especímenes en sus moldes con sus placas de base, fueron almacenados en un gabinete húmedo o cuarto húmedo por un período de 48 h a 52 h de tal forma que las superficies superiores queden expuestas al aire húmedo. Luego se retiraron los especímenes de los moldes y se colocaron nuevamente en el gabinete húmedo o cuarto húmedo por 5 días en tal forma de permitir la libre circulación de aire húmedo alrededor de por lo menos cinco caras de los especímenes.





**Figura 3.10 Almacenamiento de morteros.**

### **3.2.8. ENSAYO DE EXPANSIÓN EN AUTOCLAVE**

Se evaluó la expansión en autoclave de acuerdo con el método de ensayo de ASTM C 151 (*“Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement”*). Después del moldeo se almacenaron las barras en el gabinete de curado o el cuarto de curado por un periodo de  $48\text{ h} \pm 30\text{ min}$  antes de su remoción de los moldes para su medida y ensayo en autoclave.

## **CAPITULO IV.**

### **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

El presente capítulo muestra el análisis de resultados de los parámetros físicos obtenidos en las pruebas realizadas a nivel de laboratorio para la evaluación del cemento a partir de residuos de ladrillos cerámicos, los cuales se guían en base a la Norma ASTM C-91.

#### **4.1. RESULTADO A ENSAYO DE FINURA**

La finura del cemento influye en el calor liberado y en la velocidad de hidratación. A mayor finura del cemento, mayor rapidez de hidratación del cemento y por lo tanto mayor desarrollo de resistencia. Los efectos que una mayor finura provoca sobre la resistencia se manifiestan principalmente durante los primeros siete días.

Para la determinación de la finura del cemento hidráulico, se colocó una muestra de 1000 g de cemento en un tamiz de 45  $\mu\text{m}$  (Nº 325), obteniendo los resultados siguientes:

#### **Residuo en el tamiz de 45 $\mu\text{m}$ (Nº 325)**

|                                  |                  |
|----------------------------------|------------------|
| Material retenido en tamiz ..... | 413.93, (41.39%) |
| Material que pasa el tamiz ..... | 577.66, (57.77%) |
| Perdida de material .....        | 8.42, (0.84%)    |

Según las especificaciones de la norma el residuo en el tamiz debe tener un máximo de 24%, en el caso de nuestro cemento cerámico obtuvimos un resultado de 41.39% de residuo retenido en el tamiz. Esto indica que el cemento todavía se encuentra con un tamaño de partícula gruesa por lo que necesita afinarse.

## 4.2. RESULTADO DE ENSAYO DE CONSISTENCIA

La prueba de consistencia normal permite conocer la cantidad de agua que es necesaria agregar a un peso de cemento (650 g), para obtener una consistencia normal. La determinación de esta consistencia sirve como referencia para la realización de otras pruebas como: determinación de la resistencia a la tensión, tiempos de fraguado, sanidad del cemento, expansión en autoclave, y otras. En el ensayo de consistencia se realizaron 7 pruebas, variando las cantidades de material activado, cal, yeso y agua.

**Tabla 4.1 Pruebas obtenidas en laboratorio de la composición en masa y consistencia normal de cemento.**

| <b>ENSAYOS DE CONSISTENCIA</b>        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                       | <b>PRUEBA<br/>1</b> | <b>PRUEBA<br/>2</b> | <b>PRUEBA<br/>3</b> | <b>PRUEBA<br/>4</b> | <b>PRUEBA<br/>5</b> | <b>PRUEBA<br/>6</b> | <b>PRUEBA<br/>7</b> |
| <b>PROPORCION DE CEMENTO</b>          |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Material activado (g)                 | 650.00              | 325.00              | 325.00              | 318.50              | 318.50              | 455.00              | 455.00              |
| Cal (g)                               |                     | 325.00              | 325.00              | 318.50              | 318.50              | 182.00              | 162.50              |
| Yeso (g)                              |                     |                     |                     | 13.00               | 13.00               | 13.00               | 32.50               |
| Composición (g totales)               | 650.00              | 650.00              | 650.00              | 650.00              | 650.00              | 650.00              | 650.00              |
| Agua (ml)                             | 141.82              | 260.00              | 227.50              | 215.00              | 225.00              | 200.00              | 205.00              |
| <b>CONSISTENCIA NORMAL DE CEMENTO</b> |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Aguja de Vicat (mm)                   |                     | 45.00               | 19.00               | 3.00                | 40.00               | 23.00               | 9.00                |

**Tabla 4.2 Pruebas obtenidas en laboratorio de la composición porcentual y consistencia normal de cemento.**

| <b>ENSAYOS DE CONSISTENCIA</b>        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                       | <b>PRUEBA<br/>1</b> | <b>PRUEBA<br/>2</b> | <b>PRUEBA<br/>3</b> | <b>PRUEBA<br/>4</b> | <b>PRUEBA<br/>5</b> | <b>PRUEBA<br/>6</b> | <b>PRUEBA<br/>7</b> |
| <b>PORCENTAJE DE CEMENTO</b>          |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Material activado (g)                 | 100%                | 50%                 | 50%                 | 49%                 | 49%                 | 70%                 | 70%                 |
| Cal (g)                               | 0%                  | 50%                 | 50%                 | 49%                 | 49%                 | 28%                 | 25%                 |
| Yeso (g)                              | 0%                  | 0%                  | 0%                  | 2%                  | 2%                  | 2%                  | 5%                  |
| Composición (g totales)               | 100%                | 100%                | 100%                | 100%                | 100%                | 100%                | 100%                |
| Agua (ml)                             | 22%                 | 40%                 | 35%                 | 33%                 | 35%                 | 31%                 | 32%                 |
| <b>CONSISTENCIA NORMAL DE CEMENTO</b> |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Aguja de Vicat (mm)                   |                     | 45.00               | 19.00               | 3.00                | 40.00               | 23.00               | 9.00                |

Según la bibliografía la prueba de consistencia normal, puede definirse como el agua necesaria para que la aguja de 1 cm de diámetro del aparato Vicat deba tener una penetración de 10 mm  $\pm$  1 mm durante 30 segundos en la pasta de cemento, después de haberse iniciado la prueba (Aplica para los 3 tipos de cemento).

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados de los ensayos donde se determinó que la prueba optima es la numero 7 ya que el valor de la lectura del aparato de Vicat fue de 9 mm, en la Tabla 4.2 se presenta el porcentaje de agua utilizado para esta prueba el cual fue de 32%.

Se descartaron las demás pruebas debido a que ninguna de ellas se acercaba al rango establecido por la norma, por ejemplo, la Prueba 1 que en la que utilizo solamente el material activado no fue posible evaluar la prueba ya que la pasta de cemento presento una textura sobre hidratada, brillante y poco manejable, en las siguientes pruebas se le agrego Cal en diferentes proporciones para aportarle una mayor resistencia a la mezcla (ver sección 3.1.1.), para la Prueba 2 la pasta de cemento presentó una sobre hidratación lo cual ocasiono que la aguja de vicat llegara hasta su límite, impidiendo una lectura adecuada según la Norma.

A las pruebas restantes se les agrego sulfato de calcio (yeso) variando su concentración así como la cal y el agua, en la Prueba 4 la pasta se enduro rápidamente y al ser sometida a la aguja de Vicat tuvo poca profundidad de penetración por lo que se aumentó el porcentaje de yeso y se disminuyó el porcentaje de cal hasta lograr los resultados de la Prueba 7.

#### 4.3. RESULTADO DE ENSAYO DE CONSISTENCIA

El fraguado inicial de la pasta de cemento no debe ocurrir demasiado pronto, así como tampoco debe ocurrir demasiado tarde el fraguado final. Los tiempos de fraguado indican si la pasta está desarrollando sus reacciones de hidratación de manera normal. El yeso incluido dentro del cemento regula el tiempo de fraguado, pero también influye la finura del cemento, la relación agua/cemento y los aditivos usados. Simultáneamente al ensayo de consistencia normal se realizó el ensayo de fraguado inicial y fraguado final para cada una de las pruebas, tal como se detalla en la Tabla 4.3 y Tabla 4.4 a continuación.

**Tabla 4.3 Pruebas obtenidas en laboratorio de la composición porcentual y consistencia normal de cemento.**

| <b>ENSAYOS DE FRAGUADO</b>   |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                              | <b>PRUEBA<br/>1</b> | <b>PRUEBA<br/>2</b> | <b>PRUEBA<br/>3</b> | <b>PRUEBA<br/>4</b> | <b>PRUEBA<br/>5</b> | <b>PRUEBA<br/>6</b> | <b>PRUEBA<br/>7</b> |
| <b>PROPORCION DE CEMENTO</b> |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Material activado (g)        | 110                 | 150                 | 150                 | 318.5               | 318.5               | 227.5               | 455                 |
| Cal (g)                      |                     | 150                 | 150                 | 318.5               | 318.5               | 91                  | 162.5               |
| Yeso (g)                     |                     |                     |                     | 13                  | 13                  | 6.5                 | 32.5                |
| Composición (g totales)      | 110                 | 300                 | 300                 | 650                 | 650                 | 325                 | 650                 |
| Agua (ml)                    | 24                  | 120                 | 105                 | 215                 | 225                 | 100                 | 205                 |
| <b>TIEMPO DE FRAGUADO</b>    |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Tiempo Inicial (min)         |                     |                     | 24                  |                     | 40                  | 50                  | 60                  |
| Tiempo Final (max)           |                     |                     | 60                  |                     | 94                  | 100                 | 105                 |

**Tabla 4.4 Resultados obtenidos de la composición porcentual y tiempos de pruebas de fraguado.**

| <b>ENSAYOS DE FRAGUADO</b>   |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                              | <b>PRUEBA<br/>1</b> | <b>PRUEBA<br/>2</b> | <b>PRUEBA<br/>3</b> | <b>PRUEBA<br/>4</b> | <b>PRUEBA<br/>5</b> | <b>PRUEBA<br/>6</b> | <b>PRUEBA<br/>7</b> |
| <b>PROPORCION DE CEMENTO</b> |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Material activado            | 100%                | 50%                 | 50%                 | 49%                 | 49%                 | 70%                 | 70%                 |
| Cal                          |                     | 50%                 | 50%                 | 49%                 | 49%                 | 28%                 | 25%                 |
| Yeso                         |                     |                     |                     | 2%                  | 2%                  | 2%                  | 5%                  |
| Composición (% total)        | 100%                | 100%                | 100%                | 100%                | 100%                | 100%                | 100%                |
| Agua                         | 22%                 | 40%                 | 35%                 | 33%                 | 35%                 | 31%                 | 32%                 |
| <b>TIEMPO DE FRAGUADO</b>    |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Tiempo Inicial (min)         |                     |                     | 24                  |                     | 40                  | 50                  | 60                  |
| Tiempo Final (máx.)          |                     |                     | 60                  |                     | 94                  | 100                 | 105                 |

Uno de los objetivos principales de la prueba de fraguado era regular la cantidad de yeso en la mezcla, esto con el fin de retardar los tiempos de fraguado o secado de la pasta ya que esto afecta la trabajabilidad del cemento. En el caso de las Pruebas 1 y 2 no se pudo evaluar el ensayo de fraguado debido a su consistencia sobre hidrata, por otro lado la prueba 4 presento un comportamiento al cual se le denomina “falso fraguado” ya que se tuvo un endurecimiento prematuro luego de la mezcla con el agua y al poco tiempo sin necesidad de agregar agua a la pasta recupero su plasticidad presentándose a su vez liquida.

A pesar que los resultados en los ensayos de consistencia para las pruebas 3, 5 y 6 no estuvieran dentro de los valores establecidos por la norma, se decidió evaluar el ensayo de fraguado dando como resultado tiempos cortos. En la prueba número 7 se obtuvo un fraguado inicial de 60 min y un fraguado final de 105 minutos, las pruebas anteriores a esta sirvieron para determinar la cantidad de yeso a agregar a la mezcla de cemento y así retardar el tiempo de fraguado.

Según lo citado en la norma ASTM C-91, el tiempo establecido para el fraguado inicial debe ser no menor a 90 minutos y el tiempo de fraguado final no mayor de 1000 minutos (para los Tipos de Cemento S y M), dado los resultados se puede ver que el ensayo de fraguado no cumple con la norma ya que en ninguna de las pruebas se logra obtener un resultado que esté dentro del rango establecido.

#### **4.4. RESULTADO ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.**

La elaboración del mortero según el ensayo a la resistencia a la compresión, se preparó para contener 1620 g de arena estandarizada y una masa de cemento de 540 g, la cantidad de agua medida en mililitros debió ser la necesaria para que la mezcla produzca un flujo de  $110 \pm 5$  %.

La Tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos en mesa de flujo para uso en ensayos de cemento hidráulico.

**Tabla 4.5 Resultados obtenidos en mesa de flujo para uso en ensayos de cemento hidráulico.**

| <b>Prueba de fluidez.</b> |                 |                 |                 |                 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                           | <b>PRUEBA 1</b> | <b>PRUEBA 2</b> | <b>PRUEBA 3</b> | <b>PRUEBA 4</b> |
| Agua (ml)                 | 290             | 310             | 330             | 360             |
| % de expansión            | 53%             | 95%             | 105%            | 130%            |

Como resultado, la Prueba 3 fue la óptima debido a que cumplía con los parámetros especificados por lo que se tomó esta mezcla para la elaboración de los morteros que se dejarían en reposo para las siguientes fases.

Según la investigación previa se sabe que el cubo de mortero tiene que ser evaluado nuevamente a un tiempo de curado de 7 y 28 días después de su elaboración y estos deben soportar una presión igual o mayor a 500 y 900 Psi respectivamente, para el caso del cemento Tipo N que es el que exige menor presión a la compresión en sus requerimientos.

Al evaluar el cubo de mortero después de los 7 días de curado, este presentó una resistencia a la presión hasta los 180 Psi. Lo cual indica que no logró cumplir con la norma ya que el resultado es menor al establecido, dadas las circunstancias no se procedió a la evaluación durante los 28 días de curado porque la proyección indicaba resultados desfavorables.



**Figura 4.1 Resultado de Ensayo de resistencia a la compresión**

Evidentemente se estima que el mortero falló al ensayo de resistencia a la compresión debido a la composición química del cemento, por lo tanto es necesario reajustar la proporción de materia prima realizando un nuevo estudio para el material de residuo de ladrillo cerámico que se produce en El Salvador.

#### **4.5. RESULTADO DE ENSAYO DE EXPANSIÓN EN AUTOCLAVE**

Para el ensayo en autoclave se prepararon 3 probetas, que se limpiaron previamente y se engrasaron con aceite mineral, luego se preparó una pasta de con 650 g de cemento; Inmediatamente después de la finalización del mezclado, se moldeó la prueba en dos capas aproximadamente iguales compactando fuertemente con los dedos y presionando la pasta en las esquinas hasta que se



obtuvo un espécimen homogéneo, después se colocaron los especímenes en el gabinete de curado para que permanecieran en los moldes durante 24 horas.

Al continuar la prueba se observó que el espécimen no había endurecido al día siguiente de su elaboración y por lo tanto no se pudo desmoldar.

#### 4.6. RESUMEN DE RESULTADOS.

En la Tabla 4.6 se encuentra el resumen de los ensayos efectuados al cemento cerámico, en ella se puede ver claramente que para las pruebas realizadas, los valores obtenidos no cumplen en su mayoría con los requerimientos de la Norma ASTM C-91 para ningún tipo de cemento (Tipo N, Tipo S o Tipo M) a excepción del ensayo de consistencia en cual entra en el rango en todos los casos.

**Tabla 4.6 Cuadro resumen de Ensayos según Norma ASTM C-91**

| Tipo de Ensayo                     | Requisito físico  | Valor requerido |            |            | Valor obtenido | Estado    |
|------------------------------------|---|-----------------|------------|------------|----------------|-----------|
|                                    |   | Tipo N          | Tipo S     | Tipo M     |                |           |
| Ensayo de Finura                   | Residuo en el tamiz de 45 $\mu\text{m}$ (№ 325), max, % | 24.0            | 24.0       | 24.0       | 41.4           | No cumple |
| Ensayo de Consistencia             | Aparato Vicat, penetración en mm                        | 10 $\pm$ 1      | 10 $\pm$ 1 | 10 $\pm$ 1 | 9.0            | Cumple    |
| Ensayo de Fraguado                 | Fraguado inicial, minuto, no menor que:                 | 120.0           | 90.0       | 90.0       | 60.0           | No cumple |
|                                    | Fraguado final, minutos, no mayor que:                  | 1,000.0         | 1,000.0    | 1,000.0    | 105.0          | No cumple |
| Ensayo resistencia a la compresión | 7 días, psi   | 500.0           | 1,300.0    | 1,800.0    | 180.0          | No cumple |
|                                    | 28 días, psi  | 900.0           | 2,100.0    | 2,900.0    | -              | No cumple |
| Ensayo de expansión en autoclave   | Expansión en autoclave, max, %                          | 1.0             | 1.0        | 1.0        | -              | No cumple |

Para el caso de los ensayos de fraguado, ensayo de resistencia a la compresión y el ensayo de expansión autoclave, se utilizó la composición química de cemento según la Prueba 7 que se evaluó para el ensayo de consistencia (Ver Tabla 4.1 y Tabla 4.2), que consistía en: 70% de material activado, 25% de Cal y 5% de Yeso.

Se utilizó de esta manera ya que este resultado cumplió con la norma establecida y este parámetro era indispensable para proceder con los demás ensayos según los técnicos de laboratorio en el control de calidad del cemento que nos brindaron su apoyo, sin embargo como se puede observar, en los demás ensayos los valores obtenidos no fueron favorables con la composición de cemento utilizada dando como consecuencia el incumplimiento de la norma ASTM C-91.

Al analizar los resultados se observó que las resistencias aún siguen bajas, no obstante el material si presentó propiedades cementantes ya que este posee elementos importantes como la calcita, la portlandita y silicatos (Ver sección 3.1.1), que son productos de hidratación parcial del cemento común lo cual indica el potencial cementante en la mezcla. Por lo tanto el producto final después de los análisis fisicoquímicos y pruebas se denomina: "Material Cementante".

## **CAPITULO V**

### **5. EVALUACIÓN DE POSIBLES APLICACIONES Y COSTOS DEL MATERIAL CEMENTANTE ELABORADO**

Este apartado tiene como fin mencionar posibles aplicaciones para la utilización del material cementante de residuo de ladrillo cerámico elaborado en nuestra investigación, además se adiciona el estimado de los costos para su elaboración a nivel de laboratorio.

#### **5.1. EVALUACIÓN DE POSIBLES APLICACIONES**

Las aplicaciones que se estimaron son: aplicación como repellado o enfoscado, aplicación como estuco y aplicación como reparación de piezas quebradas, en esta sección se describen a continuación.

##### **5.1.1. APLICACIÓN COMO REPELLADO O ENFOSCADO**

Un enfoscado o repellado es una capa de mortero empleada para revestir una pared o un muro. Los materiales más utilizados como revestimiento son los morteros: mezclas de un conglomerante, arena, y agua, que mientras secan fraguan y/o carbonatan. En función del tipo de conglomerante utilizado, las técnicas de aplicación difieren, y los revestimientos poseen distintas propiedades, adoptando por tanto distintos nombres como: encalado, revoco, guarnecido, enlucido, jabelga, estuco, etc.

Como parte de las pruebas prácticas de albañilería para estimar las posibles aplicaciones se preparó una mezcla de repello utilizando el material cementante con una relación 3:1 de arena- material cementante y una relación 3:1 de mezcla-agua.

Se tomó como base ladrillos de hormigón para simular la superficie de una pared (ver Figura 5.1), al ladrillo que se encuentra a la derecha se le aplicó la mezcla de repello mientras que por el otro lado al ladrillo que está a la izquierda se le aplicó únicamente la mezcla del material cementante.



**Figura 5.1 Fotografía de pruebas obtenidas en el repello de bloques de ladrillo de hormigón**

Tanto la mezcla de repello como el material cementante por sí solo mostraron tener una buena manipulación desde el momento de su preparación hasta su aplicación en la superficie.

El secado en la pared fue rápido, eso puede traer beneficios ya que el cemento que tiene un fraguado rápido se puede utilizar especialmente para hacer reparaciones estructurales a superficies verticales y elevadas. Puede ser utilizado dondequiera que el fraguado rápido sea necesario.

Tiene una apariencia agradable ya que el color que toma luego del secado es de color ocre suave para el caso del repello y blanco rojizo para la mezcla de cemento, y esto favorece a que no haya inconveniente de oscurecer o afectar el color en caso se desee agregar una capa de pintura.

### **5.1.2. APLICACIÓN DEL MATERIAL CEMENTANTE COMO ESTUCO**

Al ver el comportamiento del material cementante como repello, se consideró que otra potencial aplicación puede ser utilizar este cemento como materia prima para la elaboración del estuco, ya que este material es una pasta compuesta de cal, yeso, cemento, arena de mármol y pigmentos naturales, que se aplica sobre las paredes y techos como elemento decorativo.

El estuco reviste las paredes otorgándoles una textura lujosa, suave y brillante, ideal para embellecer paredes y techos. Su aplicación consigue un efecto similar al mármol con una textura aterciopelada que recuerda a las piedras naturales. Además, el estuco no sólo tiene resultados estéticos sino que también refuerza las paredes y las impermeabiliza impidiendo que se concentre moho y humedad.

Se trata de un material muy versátil que favorece el moldeado y tallado de formas. Se puede aplicar sobre cemento, yeso o madera. Se le pueden añadir diferentes tintes y variar la intensidad del color en cada capa para lograr acabados degradados, lo que aumenta las posibilidades artísticas y decorativas de este material.



**Figura 5.2 Imagen ilustrativa de aplicación de estuco comercial**

### 5.1.3. APLICACIÓN DEL MATERIAL CEMENTANTE COMO REPARACIÓN DE PIEZAS QUEBRADAS

También se evaluó la posibilidad de que este material cementante sea utilizado para reparar piezas quebradas, para esta evaluación se utilizó como ejemplo una taza de porcelana a la cual se le colocó material cementante para unir las piezas quebradas. La reparación con este material podría usarse también para otro tipo de objetos como: masetas, adornos, accesorios, etc.

En la Figura 5.3 se puede ver el resultado de la reparación, en donde el objeto que estaba roto vuelve a adquirir la misma forma.

En caso que se quiera disimular la aplicación del material en la reparación de un objeto, se puede colorar colorante artificial, este se puede encontrar en cualquier ferretería.



Figura 5.3 Fotografía de la reparación obtenida de objetos de porcelana

## 5.2. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE ELABORACIÓN

La estimación de costo de una investigación consiste en estimar los costos de los recursos necesarios (humanos y materiales) para completar las actividades del proyecto.

En este apartado se presenta la estimación de costos de elaboración del material cementante a nivel de laboratorio, tomando en cuenta los precios que los reactivos tienen actualmente en el mercado nacional, en la Tabla 5.1 se encuentran más a detalle.

**Tabla 5.1 Precios actuales de reactivos en el mercado Salvadoreño**

| Reactivo           | Cantidad | Unidad | Tarifa  |
|--------------------|----------|--------|---------|
| silicato de sodio  | 1.00     | litro  | \$ 1.00 |
| Hidróxido de sodio | 1.00     | libra  | \$ 0.75 |
| agua destilada     | 1.00     | galón  | \$ 1.30 |
| Cal                | 40.00    | libras | \$ 4.40 |
| yeso               | 1.00     | kg     | \$ 1.00 |

Para determinar un precio estimado se utilizó la proporción química del material cementante que se evaluó en los ensayos de laboratorio, la que se estableció a partir del ensayo de consistencia en la Prueba 7 (Ver sección 4.3), con una composición de 70% de material activado, 25% de cal y 5% de yeso.

Se obtuvo el valor para un kilogramo de material cementante dando como resultado \$0.33 por kg, donde se incluye únicamente lo utilizado en los reactivos, el precio de la energía en donde se sabe que la tarifa de electricidad está a 0.13 \$/kWh actualmente y se utilizó una trituradora con un motor de capacidad aproximada de 3 kWh, y por último se estimó el precio de manufactura. En el Anexo A2 se encuentra detallado el análisis de cálculos para obtener los resultados de la Tabla 5.2

**Tabla 5.2 Precio estimado de un kilogramo de cemento**

| <b>Precios</b>                        | <b>Cantidad</b> |
|---------------------------------------|-----------------|
| Precio de material cementante         | \$ 0.27         |
| Precio de energía                     | \$ 0.05         |
| Precio de manufactura                 | \$ 0.02         |
| <b>Precio Total de cemento por kg</b> | <b>\$ 0.34</b>  |

Finalmente se obtuvo un valor de \$ 0.34 por kilogramo de material cementante a partir de residuos de ladrillo cerámico. El cemento portland tiene un precio en el mercado de \$0.19 por kilogramo, el material cementante elaborado en esta investigación tiene un precio estimado mayor, esto puede ser debido a que los precios a nivel industrial de la materia prima, de maquinaria y mano de obra varía ya que la producción es mayor y hay más aprovechamiento de los recursos, también debido a la economía en escala que es la ventaja que en términos de costos, obtiene una empresa gracias a la expansión.



## **CONCLUSIONES**

1. A través del diagnóstico de disponibilidad de los residuos de ladrillos cerámicos desechados durante la producción, se determinó que en El Salvador existe un alto potencial para aprovechar este desecho de la construcción como materia prima para la obtención de un cemento ya que actualmente se acumulan constantemente en un vertedero sin recibir ningún tratamiento o reprocesamiento.
2. Al utilizar un material más fino (el material tiene que pasar en su totalidad la malla N° 200 aproximadamente), la mezcla se hace más trabajable y eso facilita su manipulación en las diferentes etapas del proceso, también gracias a este factor los componente químicos se adherían con mayor facilidad.
3. Para la activación alcalina del residuo cerámico se inició a partir de la interpretación de las proporciones químicas de la información bibliográfica, sin embargo, esta no funciono y se varió la composición química de la solución activadora para encontrar una pasta manipulable al momento de ser utilizada para los demás procesos. Teniendo como resultado para una base de cálculo de 1000 g de residuo cerámico conveniente utilizar 333.33 g de solución activadora, 22.18 g de hidróxido de sodio, 100 ml de silicato de sodio y 90 ml de agua.
4. Tras el estudio de la caracterización fisicoquímica del material activado se obtuvo un bajo porcentaje de óxido de calcio por tanto se adicionó cal hidratada en una proporción de 50:50 para conferir propiedades de manejo, plasticidad y retención de agua al cemento.
5. Después de añadir cal al material este mostraba un fraguado rápido luego de su hidratación por lo que se le añadió Yeso para la retardación del secado.

6. El cemento elaborado a nivel de laboratorio no cumplió con la Norma ASTM C-91 sin embargo se determinó que este presentó propiedades químicamente puzolánicas como la calcita y la portlandita, elementos importantes para determinar que la mezcla tiene potencial cementante. Por lo tanto se le denominó: Material cementante, al producto elaborado.
7. Se evaluaron los ensayos requeridos según la Norma ASTM C-91 al material cementante pero este presentó resultados que no se encontraban dentro del rango establecido por varias normas dentro de la ASTM C-91, a excepción del ensayo de consistencia el cual era indispensable para continuar con el resto de ensayos ya que la composición química a utilizar en las demás pruebas se regía a partir de este punto, dando como resultado una composición química en porcentaje de: material activado 70%, Cal 25%, Yeso 5% y en relación de mezcla de material cementante la composición química de porcentaje de: material cementante 68% y agua 32%.
8. A pesar de que el material cementante no cumpla con los requisitos físicos según la norma ASTM C-91 se evaluaron posibles aplicaciones que resultaron ser favorables y puede ser utilizado con fines de repello de paredes o reparación de objetos pequeños.

## **RECOMENDACIONES**

1. Para la etapa de activación alcalina es importante realizar el secado de la mezcla de solución activadora con los residuos cerámicos en recipientes plásticos para su cocción en estufa ya que de lo contrario durante la química de activación reaccionará con la superficie de vidrio o aluminio.
  
2. Es necesario el reproceso de trituración del cemento para la reducción del tamaño de partícula adecuada de todos los componentes. el material debe de estar limpio antes de ingresarlo a la trituradora.
  
3. Es necesario adicionar yeso realizando pruebas con diferentes proporciones para retardar el tiempo de fraguado y mejorar la trabajabilidad del cemento.
  
4. Por los bajos niveles de calcita encontrados durante la caracterización química del material activado se recomienda para futuras investigaciones la adición de hidróxido de calcio realizando pruebas con diferentes proporciones.
  
5. Las aplicaciones propuestas del material cementante a partir de residuos cerámicos en este estudio son el revestimiento de paredes y reconstrucción de objetos cerámicos, sin embargo se recomienda para futuras investigaciones buscar nuevas aplicaciones con especificaciones diferentes a las establecidas en el presente trabajo de investigación.
  
6. Realizar una investigación tomando de referencia la presente, para profundizar en cuanto al análisis de la composición química del material activado y el material cementante para lograr que este cumpla con las normas establecidas según la ASTM C- 91.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. International Institute for Sustainable Development. (2011). UN Climate Change Conference. *UN Climate Change Conference* (pág. 62). Bonn, Germany: Editor digital.
2. Bao, M. (2005). Ecoeficiencia industrial. *Gestión del medio ambiente*, 349-362.
3. BCR. (2017). *Exportaciones e importaciones de ladrillos cerámicos y otros productos similares, período enero 2010 a febrero 2017*. San Salvador: Oficina de información y respuesta.
4. Boada, A., Rocchi, S., y Kuhndt, M. (2005). *Negocios y sostenibilidad mas allá de la gestión ambiental*. Bogota: Politécnico Granacolombiano.
5. Entrevista personal en Romani S.A de C.V. a gerente general Cabrero, R. en San Salvador (04 de abril de 2017).
6. Callister, Jr, W. D. (2013). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Utah: Editorial Reverté, S. A.
7. Campos Avella, J. C., Lora Figueroa, E., Meriño Stand, L., y Tovar Ospino, I. (2011). Ahorro de energía en la industria cerámica. *VirtualPro*, 5-11.
8. Cantú, P. (2015). Ecoeficiencia y sustentabilidad. *Ciencia UANL*, 34-38.
9. Chen, L. (2008). Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer. *Materials*, 767.
10. COGUANOR. Comisión Guatemalteca de Normas. (2012). *Cemento de mampostería. Especificaciones*. Guatemala: Consejo Nacional de Normalización.

11. Criado, M., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2008). Effect of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio on the alkali activation of fly ash. Part II: <sup>29</sup>Si MAS-NMR Survey. En M. Criado, A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, I. Sobrados, & J. Sanz, *Microporous and Mesoporous Materials* (págs. 525-534). Germany: elsevier.
12. Deventer, J., John L, P., Peter, D., & David G, B. (2010). Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials. *Waste and Biomass Valorization*, 145-155.
13. Gomez, J. (2013). *Materiales de construccion*. Monterrey: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
14. IMCYC A.C. (2011). Cemento para albañilería/Mortero, especificaciones y metodos de prueba. *El concreto en la obra. Problemas, causas y soluciones*, 71.
15. Marín, A. (2014). *Dosificación de morteros*. Madrid: Universidad de Alcalá.
16. Medina, A. (9 de Marzo de 2017). *Blog 360 grados en concreto*. Obtenido de Mortero tipo N: <http://blog.360gradosenconcreto.com/explandict/mortero-tipo-n/>
17. Molina E., K. (2006). *Evaluacion de morteros para albañileria y revestimientos elaborados a base de cementos mezclados con escorias de horno*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
18. Neupane, K. (2016). Fly Ash and GGBFS Based Powder-Activated Geopolymer Binders: A Viable Sustainable Alternative of Portland Cement in Concrete Industry. *Mechanics of Materials*, 110-122.
19. Porrero, J., Ramos, C., y Velazco, G. (2014). *Manual del concreto estructural*. Caracas: Miguel Alvarez.

20. Provis, J., & van Deventer, J. (2014). State of the Art Report. En R. T. 224-AAM, *Alkali Activated Materials*. Netherland: springer.
21. Puertas, F., Barba, A., Gazulla, F., Gomez, P., y Palacios, M. (2006). Residuos ceramicos para su posible uso como materia prima en la fabricacion de clinker de cemento portland: caracterizacion y activacion alcalina. *Materiales de construccion*, 73-84.
22. Reig, L., Tashima, M., Borrachero, M., Monzo, B., & Cheesemann, R. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 98-106.
23. Ruiz-Santaquiteria, C. (2013). Materias primas alternativas para el desarrollo de nuevos cementos: activación alcalina de vidrios silicoaluminosos. *Universidad Autónoma de Madrid*.
24. Shi, C., & Fernández-Jiménez. (2006). Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements. *Journal of hazardous materials*, 56-63.
25. Silva, O. J. (24 de Noviembre de 2016). *Blog 360 grados en concreto*. Obtenido de Conociendo las propiedades del cemento:  
<http://blog.360gradosenconcreto.com/conociendo-las-propiedades-fisicas-del-cemento/>
26. Superintendencia de administración tributaria. (2014). *Portal SAT*. Obtenido de [https://www.google.com/sv/portal.sat.gob.gt%2Fsitio%2Findex.php%2Fleyes%2Fdoc\\_download%2F5014-arancel-centroamericano-de-importacion-2014](https://www.google.com/sv/portal.sat.gob.gt%2Fsitio%2Findex.php%2Fleyes%2Fdoc_download%2F5014-arancel-centroamericano-de-importacion-2014)
27. Tobón, J. A. (08 de Marzo de 2017). *Blog 360 grados en concreto*. Obtenido de Cemento para mamposteria:  
<http://blog.360gradosenconcreto.com/cemento-mamposteria-mayor-rendimiento-obra/>

28. Torres-Carrasco, M., y Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Ingeniería de construcción*, 5-12.
29. Zambrano, K. (24 de Junio de 2013). *Blog 360 grados en concreto*.  
Obtenido de Morteros para mampostería:  
<http://blog.360gradosenconcreto.com/morteros-para-mamposteria-2/>

## GLOSARIO


- ❖ **Calcita.** Es el mineral genérico del grupo de las calcitas, dentro de la serie calcita-rodocrosita. Es un carbonato con fórmula  $\text{CaCO}_3$ . Pertenece al sistema trigonal y, en la naturaleza lo podemos encontrar desde su forma amorfa a una infinidad de cristalizaciones diferentes.
- ❖ **Calor de hidratación.** Calor que se desprende cuando el agua y el cemento están en contacto.
- ❖ **Cohesión.** Fuerza de atracción que mantiene a las moléculas unidas.
- ❖ **Clinker.** Sustancia que se obtiene como resultado de la calcinación en horno, de mezclas de calizas arcillosas a temperaturas que oscilan entre los 1350 y 1450°C y preparadas artificialmente con adición eventual de otras materias.
- ❖ **Difractometría de rayos X.** Es un instrumento utilizado para medir la difracción de un haz de radiación incidente sobre una muestra de un material. La fuente de rayos X suele ser bien un tubo de rayos X o radiación sincrotrón emitida por aceleradores de partículas. En los tubos de rayos X, se aplica un voltaje para acelerar un haz de electrones producidos por calentamiento de un filamento de wolframio (cátodo).
- ❖ **Espectrofotómetro.** Es un instrumento usado en el análisis químico que sirve para medir, en función de la longitud de onda, la relación entre valores de una misma magnitud fotométrica relativos a dos haces de radiaciones y la concentración o reacciones químicas que se miden en una muestra.
- ❖ **Fraguado.** Proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad que sufre la pasta de cemento, producido por la desecación y recristalización de los hidróxidos metálicos procedentes de la reacción química del agua de amasado con los óxidos metálicos presentes en el cemento.



- ❖ **Material activado alcalinamente.** Es la clasificación más amplia, que abarca esencialmente cualquier sistema aglutinante obtenido por reacción de una fuente de metal alcalino (sólido o disuelto) con un sólido en polvo de silicato. Estos sólidos pueden ser aluminosilicatos ricos o pobres en calcio, tales como las escorias de alto horno o las cenizas volantes, respectivamente. Las fuentes alcalinas empleadas pueden incluir hidróxidos alcalinos, silicatos, carbonatos, sulfatos, aluminatos u óxidos, esencialmente cualquier sustancia soluble que puede suministrar cationes de metales alcalinos, elevar el pH de la mezcla de reacción y acelerar la disolución del precursor sólido.
- ❖ **Mortero.** Mezcla de material aglomerante (cemento Portland y/u otros cementantes), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, con *propiedades* químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto y son ampliamente utilizados para pegar piezas de mampostería en la construcción de muros, o para recubrirlos, en cuyo caso se le conoce como recubrimiento, repello o revestimiento.
- ❖ **Portlandita.** Es un mineral de la clase de los minerales óxidos, y dentro de esta pertenece al llamado “grupo de la brucita”.
- ❖ **Puzolana.** Son materiales naturales o artificiales que contienen sílice y/o alúmina. No son cementosas en sí, pero cuando son molidos finamente y mezcladas con cal, la mezcla fraguará y endurecerá a temperaturas normales.

## ANEXOS

### ANEXO A1. MANUAL DE PRACTICAS DE LABORATORIO

|  |  |    |
|--|--|----|
| <br>Universidad de El Salvador  | <b>Elaboración de cemento a nivel de laboratorio por activación alcalina de residuos cerámicos de la industria de la construcción.</b> | 01 |
|  | 01 Trituración de residuos de ladrillos cerámicos  |    |
| <b>Objetivo:</b><br>Obtener una reducción en el tamaño de partícula de la materia prima mediante una trituración primaria y secundaria.  |  |    |
| <b>Marco teórico:</b><br><p>La trituración es el nombre de los diferentes métodos de procesamiento de materiales. El triturado es también el nombre del proceso para reducir el tamaño de las partículas de una sustancia por la molienda.</p> <p>La trituración, además, se refiere a la producción de un material homogéneo a través de la mezcla.</p> <p>El proceso de trituración es necesario antes de que se den lugar los subsiguientes pasos del proceso. En numerosas técnicas, la trituración representa el proceso fundamental a partir del cual se realizan los procesos de tratamiento posteriores.</p> <p>Tipos</p> <p><b>Trituración primaria.</b></p> <p>La trituración primaria reduce normalmente el tamaño de los trozos de mineral a un valor comprendido entre 8" a 6".</p> <p style="text-align: right;">Continúa...</p> |  |    |

A continuación, los productos obtenidos se criban en un tamiz vibrante con objeto de separar aquellas partículas cuyo tamaño ya es lo suficientemente fino, con el consiguiente aumento en la capacidad de las quebrantadoras secundarias.

La trituración primaria se lleva a cabo normalmente en quebrantadoras de mandíbulas o en quebrantadoras giratorias. Las quebrantadoras de mandíbulas constan normalmente de dos planchas de acero al manganeso o mandíbulas, colocadas una frente a la otra, de las cuales una es fija y la otra es móvil y puede girar sobre un eje situado en su parte superior o inferior. Mediante un dispositivo adecuado, se comunica a la mandíbula móvil un movimiento de oscilación alternativo hacia adelante y hacia atrás de corto recorrido.

#### **Trituración secundaria.**

En la trituración secundaria, el tamaño de las partículas se reduce a un valor comprendido entre 3" y 2", dejándolo en condiciones de poder pasar a las operaciones de molturación o concentración preliminar. Las quebrantadoras utilizadas en esta fase son por lo general e tipo giratorio o cónico. Estas quebrantadoras son similares a las utilizadas en la trituración primaria, diferenciándose solamente en que trabajan a velocidades relativamente altas (aproximadamente 500 r.p.m.) y en que la abertura de salida de los productos triturados es mucho menor.

#### **Material y equipo:**

- Residuos de ladrillo cerámico
- Trituradora de mandíbula
- Pulverizadora de discos

Continúa...


- Brochas
- Mascarillas para polvo
- Lentes de seguridad
- Guantes
- Recipiente plástico

**Procedimiento:**

1. Conectar y encender la trituradora de mandíbula.
2. Colocar recipiente en la salida de la trituradora para la recolección del material triturado.
3. Colocar el material poco a poco en la entrada de la trituradora, hasta obtener un tamaño de partícula aproximadamente de 1.0 a 3.0 cm.
4. Conectar y encender la pulverizadora de disco.
5. Colocar recipiente en la salida de la pulverizadora para la recolección del material triturado.
6. Ingresar poco a poco el material obtenido en la etapa anterior en la pulverizadora de disco, hasta obtener un tamaño de partícula menor a la malla 200.
7. Almacenar el material triturado.

**Referencia Bibliográfica:**

- 1- Proindustriales.blogspot.com. (2018). *TRITURACIÓN*. Recuperado de: <http://proindustriales.blogspot.com/2013/05/trituracion.html> el 28 enero de 2018.

|  |  |    |
|--|--|----|
|  <p>Universidad de El Salvador</p>  | <b>Elaboración de cemento a nivel de laboratorio por activación alcalina de residuos cerámicos de la industria de la construcción.</b> | 02 |
|  | 02 Preparación de solución activadora alcalina.  |    |
| <p><b>Objetivo:</b><br/>Preparar solución alcalina 0.7 molal Na<sup>+</sup> utilizado hidróxido de sodio y silicato de sodio para la activación de los residuos cerámicos.</p>   |  |    |
| <p><b>Marco teórico:</b></p> <p>Solución alcalina activadora.</p> <p>Los activadores alcalinos son el segundo componente esencial en el desarrollo de los cementos alcalinos. Estos activadores se suelen incluir en la mezcla como una disolución, aunque también se pueden incorporar en estado sólido, bien mezclado o integrado con la escoria y/o ceniza.</p> <p>Generalmente, los activadores más empleados suelen ser hidróxidos y silicatos alcalinos. Sin embargo, la naturaleza de los activadores juega un papel muy importante en el proceso de activación tanto en escorias como en cenizas volantes, siendo el efecto del pH y la influencia de los cationes-aniones unos parámetros a considerar.</p> <p>Es una mezcla de dos o más sustancias que se han distribuido o dispersado en forma homogénea habiéndose disgregado o disociado a nivel átomo, iones o moléculas simples.</p> <p>El cuerpo que se difunde se llama soluto o sustancia químicamente pura, y el medio en que se realiza dicha difusión se denomina disolvente o solvente. El soluto por lo general se encuentra en menor proporción que el disolvente o solvente.</p> <p>Se ha comprobado experimentalmente que la solución adopta el estado físico del disolvente.</p> <p style="text-align: right;">Continúa...</p> |  |    |

- **Soluto:** Es el que disuelve contenido en menor cantidad pudiendo ser, sólido, líquido y gaseoso.
- **Solvente:** Es el que disuelve al soluto e interviene en mayor cantidad pudiendo ser sólido, líquido y gaseoso

**Material y equipo:**

- Balanza analítica
- 3 Beakers de 500 mL
- 2 Probetas de 100 mL
- 1 Espátula
- 1 vidrio reloj

**Reactivos:**

- Hidroxido de sodio
- Silicato de sodio alcalino líquido
- Agua destilada

**Procedimiento:**

1. Pesar 11.09g de NaOH en balanza utilizando un vidrio reloj y una espátula
2. Trasferir a un beaker de 500 mL.
3. Añadir 45mL de agua destilada y agitar hasta disolver el NaOH.
4. Medir 100 mL de silicato de sodio alcalino líquido
5. Verter el silicato de sodio poco a poco mientras se agita a la solución de hidróxido de sodio preparada anterior mente.

**Referencia bibliográfica:**

Reig, L., Tashima, M., Borrachero, M., Monzo, B., & Cheesemann, R. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 98-106.

1. Chang. R. (2010). Décima Edición. Mc Graw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de c.



**Elaboración de cemento a nivel de laboratorio por activación alcalina de residuos cerámicos de la industria de la construcción.**

03 Elaboración del cemento cerámico.

03

**Objetivo:**

Obtener el cemento cerámico a partir de la mezcla de la solución activadora con los residuos cerámicos triturados

**Marco teórico:**

• **Material activado alcalinamente** es la clasificación más amplia, que abarca esencialmente cualquier sistema aglutinante obtenido por reacción de una fuente de metal alcalino (sólido o disuelto) con un sólido en polvo de silicato (Deventer, John L, Peter, & David G, 2010). Estos sólidos pueden ser aluminosilicatos ricos o pobres en calcio, tales como las escorias de alto horno o las cenizas volantes, respectivamente. Las fuentes alcalinas empleadas pueden incluir hidróxidos alcalinos, silicatos, carbonatos, sulfatos, aluminatos u óxidos, esencialmente cualquier sustancia soluble que puede suministrar cationes de metales alcalinos, elevar el pH de la mezcla de reacción y acelerar la disolución del precursor sólido.

Las cenizas volantes con un bajo contenido en calcio y arcillas calcinadas (ej. Metacaolin) son los precursores más comunes utilizados en la síntesis del geopolímero.

**Material y equipo:**

- Material cerámico triturado.
- Bandejas plásticas
- Balanza analítica
- Estufa

Continúa...

- 2 Beaker de 500 mL
- 1 Espátula
- 1 vidrio reloj
- Termómetro
- Guantes

**Reactivos:**

- Solución activadora preparada en el procedimiento 02

**Procedimiento:**

1. Pesar 100 g del polvo cerámico en balanza analítica.
2. En un beaker pesar 33.33g de la solución activadora.
3. Colocar el polvo cerámico en una bandeja plástica.
4. Verter poco a poco la solución activadora.
5. Homogenizar la mezcla manualmente utilizando guantes de plástico para protección.
6. Distribuir uniformemente la pasta previamente mezclada en toda la bandeja.
7. Precalentar la estufa a 65°C
8. Colocar la pasta en la estufa manteniendo la temperatura constante hasta que el nuevo material se encuentre seco.
9. Retirar la bandeja de la estufa utilizando guantes de asbesto.
10. Triturar el material activado en pulverizadora de disco tal como se indica en el procedimiento 01 a partir del paso 4.
11. Almacenar el material triturado en recipientes plásticos sellados herméticamente con parafina.

**Bibliografía consultada:**

- 1- Deventer, J., John L, P., Peter, D., & David G, B. (2010). Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials. *Waste and Biomass Valorization*, 145-155.



## ANEXO A2. CALCULOS PARA ESTIMACION DE COSTOS DE MATERIAL CEMENTANTE

Los datos presentados a continuación se generaron en una hoja de Excel.

Precio de reactivos que se encuentran actualmente en el mercado.

| Reactivo           | Cantidad | Unidad | Tarifa  |
|--------------------|----------|--------|---------|
| Silicato de sodio  | 1.00     | litro  | \$ 1.00 |
| Hidróxido de sodio | 1.00     | libra  | \$ 0.75 |
| Agua destilada     | 1.00     | galón  | \$ 1.30 |
| Cal                | 40.00    | libras | \$ 4.40 |
| Yeso               | 1.00     | kg     | \$ 1.00 |

Se convirtió los datos a ml y gramos ya que a nivel de laboratorio se utilizó con estas unidades.

| Conversión         |       |        |           |    |         |
|--------------------|-------|--------|-----------|----|---------|
| Silicato de sodio  | 1.00  | litro  | 1,000.00  | ml | \$ 1.00 |
| Hidróxido de sodio | 1.00  | libra  | 453.60    | g  | \$ 0.75 |
| Agua destilada     | 1.00  | galón  | 3,785.41  | ml | \$ 1.30 |
| Cal                | 40.00 | libras | 18,143.70 | g  | \$ 4.40 |
| Yeso               | 1.00  | kg     | 1,000.00  | g  | \$ 1.00 |

Por medio de una operación con regla de 3 se determinó el valor en \$ para la cantidad de reactivo utilizado en el laboratorio.

| Conversión de acuerdo a composición química |          |    |    |      |
|---|----------|----|----|------|
| Silicato de sodio                           | 95.00    | ml | \$ | 0.10 |
| Hidróxido de sodio                          | 21.07    | g  | \$ | 0.03 |
| Agua destilada                              | 85.50    | ml | \$ | 0.03 |
| Material triturado                          | 1,000.00 | g  | \$ | 0.01 |
| TOTAL                                       |          |    | \$ | 0.16 |

Los datos anteriores se convirtieron a las mismas unidades para poder estimar un peso total y así estimar el precio únicamente del material activado.

| Conversión a una misma unidad |             |           |                |
|-------------------------------|-------------|-----------|----------------|
| Silicato de sodio             | 228.00      | g         | \$ 0.08        |
| Hidróxido de sodio            | 21.07       | g         | \$ 0.03        |
| Agua destilada                | 85.50       | g         | \$ 0.02        |
| Material triturado            | 1,000.00    | g         | \$ 0.16        |
| Peso total                    | 1,334.57    | g         | \$ 0.30        |
| Menos 5% de perdida           | 1,267.84    | g         | \$ 0.30        |
| <b>Material activado</b>      | <b>1.27</b> | <b>kg</b> | <b>\$ 0.30</b> |
| <b>Material activado</b>      | <b>1.00</b> | <b>kg</b> | <b>\$ 0.24</b> |

\*densidad del silicato de sodio = 2.4 g/cm<sup>3</sup>; densidad de Agua = 1.0g/cm<sup>3</sup>

Luego se hizo la evaluación de precios de acuerdo a la composición química: 70% material activado, 25% de cal y 5% de yeso para una base de cálculo de 1 kg. Siempre a través de una regla de 3 para tener el dato de acuerdo a lo que necesita de material.

| Mezcla de cemento para una muestra de 1000g |                 |           |                |
|---|-----------------|-----------|----------------|
| Material activado                           | 700.00          | g         | \$ 0.16        |
| Cal   | 250.00          | g         | \$ 0.06        |
| Yeso  | 50.00           | g         | \$ 0.05        |
| <b>Material Cementante</b>                  | <b>1,000.00</b> | <b>g</b>  | <b>\$ 0.27</b> |
|   | <b>1.00</b>     | <b>kg</b> | <b>\$ 0.27</b> |

Tomando en cuenta los siguientes datos se estimó un precio de energía.

| Costo energético                            |                  | Tarifa en El Salvador = 0.13 kwh |                 |
|---|------------------|----------------------------------|-----------------|
| Potencia estimada utilizada en trituradoras |                  |                                  |                 |
| Potencia (Kwh)                              | Horas utilizadas | Consumo (kwh)                    | Tarifa (\$/kWh) |
| 3.00  | 0.25             | 0.38                             | 0.13            |

Finalmente se obtuvieron los datos que se presentan a continuación.

|   |                |
|---|----------------|
| Precio de material cementante                     | \$ 0.27        |
| Precio de energía                                 | \$ 0.05        |
| Precio manufactura                                | \$ 0.02        |
| <b>Precio Total de material cementante por kg</b> | <b>\$ 0.34</b> |

### ANEXO A3. PROCESO DE ACTIVACIÓN ALCALINA



**Pruebas de concentración de hidróxido de sodio y silicato de sodio para la solución alcalina**



**Mezclado de material triturado con solución activadora**



**Secado del material mezclado en recipiente plástico**



**Secado del material mezclado en recipiente de aluminio**



**Material activado triturado en triturado de discos**

## ANEXO A4. ENSAYOS FISICOMECHANICOS EN LABORATORIO



*Ensayo de fraguado en Aparato de Gillmore*



*Pesado de cal y material activado*



***Visita a Laboratorio Holcim para la realización de ensayos***

## ANEXO A5. SOLICITUD DE VISITA A EMPRESA HOLCIM



Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos

Ref. EIQIA.130.2017

Ciudad Universitaria, 12 de Junio de 2017

Ingeniero  
Jaime Recinos  
Gerente de Desarrollo Sostenible  
HOLCIM El Salvador  
Presente.

Respetable Ingeniero Recinos:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador (EIQIA-FIA-UES), deseándole muchos éxitos en el desarrollo de sus funciones.

El motivo de la presente es solicitarle su valiosa colaboración, para con los Bachilleres: Emily Elizabeth Beltrana Martínez (carné: BM11038), Glenda Beatriz Molina Quintanilla (carné: MQ11009) y Rubén Bladmir Ramírez Bautista (carné: RB09021); quienes están desarrollando el Trabajo de Graduación de Ingeniería Química, titulado: **ELABORACION DE CEMENTO A NIVEL DE LABORATORIO POR ACTIVACION ALCALINA DE RESIDUOS CERAMICOS DE LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION** (aprobado según acuerdo JA-120/2017); en el sentido de apoyarlos con la realización de ensayos para evaluar la calidad del cemento según lo establecido por la norma ASTM C-91. Se anexan el perfil del proyecto y el listado de los ensayos requeridos. El proyecto está siendo asesorado por el Ing. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya, profesor de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de esta Facultad.

Considero importante mencionar que el apoyo que Usted pueda proporcionarle a los Bachilleres constituye un valioso aporte para desarrollar el proyecto, manifestando a la vez, nuestro compromiso de respetar y cumplir con todos los lineamientos que Ustedes dispongan; así como hacer de su conocimiento los resultados del trabajo una vez este haya sido finalizado.

Sin otro particular y no dudando de contar con su valioso apoyo, le reitero mis saludos, atentamente,

“HACIA LA LIBERTAD POR LA CULTURA”

  
Dra. Tania Torres Rivas  
Directora



C.c. Ing. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya. Docente Asesor.

Final Av. Mártires del 30 de Julio-San Salvador-El Salvador- C.A.  
Apartado Postal 740 - Telefax (503) 2235-5035  
Correo Electrónico: [ingenieria.quimica@ues.edu.sv](mailto:ingenieria.quimica@ues.edu.sv) / [ingenieria.quimica@fia.ues.edu.sv](mailto:ingenieria.quimica@fia.ues.edu.sv)





Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos

Cuadro resumen de ensayos para cemento de mampostería base cerámica.

| Tipo de ensayo                              | Especificación  | Referencia de Marcha según norma ASTM C91 |
|---|---|---|
| Finura                                      | Residuo en tamiz $\mu\text{m}$ (No. 325), max, %  | ASTM C 430                                |
| Expansión autoclave                         | Max %   | ASTM C 151                                |
| Tiempo de fraguado                          | Fraguado inicial y fraguado final   | ASTM C 266                                |
| Resistencia a la compresión (prom. 3 cubos) | Resistencia a la compresión de cubos de mortero, compuesto de 1 parte de cemento y de 3 partes de arena estándar mezclada (mitad de arena estándar graduada y mitad de arena estándar 20-30) por volumen, preparados y ensayados de acuerdo con esta especificación debe ser igual o mayor a los valores especificados para las edades de 7 días y 28 días. | ASTM C109/C109M<br>ASTM C 305             |
| Contenido de aire del mortero               | Preparado y ensayado de acuerdo con: Mínimo, Volumen (%) y Máximo, volumen (%)  | ASTM C 185                                |
| Retención de agua                           | min % del flujo original  | ASTM C 1506                               |



## ANEXO A6. CARTA DE PETICIÓN DE INFORMACIÓN A BANCO CENTRAL DE RESERVA



**Banco Central de Reserva  
de El Salvador**



### CONSTANCIA DE RECEPCIÓN DE SOLICITUD

El Banco Central de Reserva de El Salvador **HACE CONSTAR** que:

**Rubén Bladimir Ramírez Bautista**, identificado con el documento único de identidad número 04560923-9, ha interpuesto una solicitud de Información, enviada a través de gobierno abierto el día 7 de abril de 2017 y debidamente firmada el 13 de abril de 2017, solicitando información sobre:

**“Información anual de los últimos 5 años sobre datos de manufactura de producción de ladrillos cerámicos en el país; datos anuales de los últimos cinco años de exportación e importación de manufacturas de ladrillos cerámicos (importe económico y si se cuentan con datos de producción en kilogramos); nombre de empresas productoras de ladrillos cerámicos y su producción”.**

El número asignado de referencia es 052/2017, que le servirá para realizar las consultas respectivas.

La fecha probable de respuesta a su solicitud es 28 de abril de 2017. Para cualquier notificación usted ha definido el correo electrónico [rubenbrb.ptk@gmail.com](mailto:rubenbrb.ptk@gmail.com) y el medio en el cual solicita la información es a través de correo electrónico.



**Idania Romero de Fernández**  
Oficial de Información

Esta constancia se extiende de conformidad al art. 66 inciso final de la Ley de Acceso a la Información Pública y al art. 53 del Reglamento de la misma Ley. La fecha de entrega de la información podrá estar sujeta a cambios en caso que, según el inciso 5º, de la misma disposición legal, los detalles proporcionados por el solicitante no bastasen para focalizar la información pública o en caso que, de acuerdo al art. 45 inciso 1º, del Reglamento, los datos de la solicitud sean genéricos, ininteligibles o insuficientes para localizar la información. Si se ha solicitado remisión por correo certificado, la recepción de la información estará sujeta a los plazos que ofrece la empresa de correos.

Oficina de Información y Respuesta  
Alameda Juan Pablo II, entre 15 y 17 Avenida Norte, San Salvador  
Tel. (503) 2281-8030; Fax (503) 2281-8113  
E-mail: [oficial.informacion@bcr.gob.sv](mailto:oficial.informacion@bcr.gob.sv)