



# UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

*La Universidad Católica de Loja*

## ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**Fabricación de ladrillos a base de lodos de relaves de minas**

TRABAJO DE TITULACIÓN

**AUTOR:** Paladines Benítez, Juan Pablo

**DIRECTOR:** Zúñiga Suárez, Alonso Rodrigo, Ing. M.Sc.

LOJA-ECUADOR

2016



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2016

## **APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Ingeniero.

Alonso Rodrigo Zúñiga Suárez, MSc.

DOCENTE DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

De mi consideración:

Que el presente trabajo de titulación, “Fabricación de ladrillos a base de lodos de relaves de minas” realizado por: Paladines Benítez Juan Pablo; ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Septiembre de 2016

f).....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo Juan Pablo Paladines Benítez declaro ser autor del presente trabajo de titulación: “Fabricación de ladrillos a base de lodos de relaves de minas”, de la titulación de Ingeniero Civil, siendo M.Sc. Alonso Rodrigo Zúñiga Suárez Director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f).....

Autor: Paladines Benítez, Juan Pablo.

CI: 1105656175.

## DEDICATORIA

*A mis padres Ángel y Carmen por ser la principal razón de mi superación académica, a ellos se los debo todo por haberme ayudado a ser la persona que ahora soy, les dedico este logro que para mí es tan importante.*

*A mis hermanos Jhoana, María, Carlos Alberto y Diana a quienes quiero con todo el corazón, todo este tiempo de trabajo se los dedico.*

*A mis sobrinos Emilio, Santiago y Joaquín, que se han robado una parte de mí, les dedico este triunfo.*

*A mi grupo de amigos, autonombado "GSI", por todos los buenos y malos momentos que pasamos a lo largo de todos estos años de estudios y por compartir esta carrera tan interesante, extensa y llena de enseñanzas como es la Ingeniería Civil.*

*A todas las personas que de alguna forma aportaron con su granito de arena a lo largo de mi vida estudiantil, los tendré siempre presentes.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Primeramente a Dios*, por ayudarme a lograr cumplir este objetivo que me trace hace algunos años, ya que sin sus bendiciones no hubiera sido posible cumplir este tan anhelado sueño como es el de ser un profesional en lo que más me gusta.

*A mis padres* por ser un gran apoyo moral, económico y sobre todo por todos los consejos brindados en todo este tiempo ayudándome a lograr ser una persona con valores.

*Al Ingeniero Alonso Zuñiga*, por haberme brindado su valioso tiempo y conocimientos durante la realización de la presente investigación, además de sus buenos consejos.

*A los Ingenieros que conforman el Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil (DGMIC)* por haberme ofrecido sus valiosos conocimientos ayudándome a formarme como un buen profesional con sus experiencias y consejos.

*A mi grupo de amigos*, con los cuales compartí e intercambie conocimientos a lo largo de la carrera y fue posible llegar hasta donde ahora me encuentro.

*A la Universidad Técnica Particular de Loja*, por abrirme las puertas para hacer posible el formarme como profesional en tan prestigiosa carrera.

## Contenido

|   |      |
|---|------|
| APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....                              | i    |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....                                    | ii   |
| DEDICATORIA .....   | iii  |
| AGRADECIMIENTO .....  | iv   |
| LISTA DE FIGURAS .....  | viii |
| LISTA DE TABLAS .....   | x    |
| RESUMEN.....  | 1    |
| ABSTRACT .....  | 2    |
| INTRODUCCIÓN.....   | 3    |
| CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....  | 5    |
| 1.1. Generalidades.....   | 6    |
| 1.1.1. El ladrillo como material de construcción .....                              | 7    |
| 1.1.2. Tipos y usos del ladrillos artesanal .....                                   | 8    |
| 1.1.3. Contaminación ambiental debido a la producción de ladrillos artesanales..... | 9    |
| 1.2. Geopolimerización .....  | 10   |
| 1.2.1. Fundamentos Teóricos .....   | 11   |
| 1.2.2. Silicatos y Aluminosilicatos .....   | 13   |
| 1.2.3. Química de la Geopolimerización .....  | 13   |
| 1.2.4. Activador alcalino y su efecto en sistemas geopoliméricos .....              | 17   |
| 1.3. Los relaves mineros .....  | 19   |
| 1.3.1. Características de los relaves mineros .....                                 | 19   |
| 1.3.2. Contaminación Ambiental.....   | 20   |
| 1.3.3. El relave de mina como materia prima.....                                    | 21   |
| CAPÍTULO II ÁREA DE ESTUDIO.....  | 23   |
| 2.1. Elección de la Zona de estudio .....   | 24   |
| 2.2. Acceso .....   | 24   |
| 2.3. Localización y Descripción del Área de Estudio .....                           | 25   |
| 2.4. Clima y Vegetación .....   | 25   |
| CAPÍTULO III: MATERIALES Y METODOLOGÍA.....   | 26   |
| 3.1. Materiales .....   | 27   |
| 3.1.1. Relave de Mina de Oro.....   | 27   |
| 3.1.2. Hidróxido de Sodio .....   | 27   |
| 3.1.3. Molde de acero.....  | 28   |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 3.1.4.  | Materiales de laboratorio .....   | 29 |
| 3.2.  | Metodología .....   | 29 |
| 3.2.1.  | Caracterización de la Materia Prima .....                                     | 33 |
| 3.2.1.1.  | <i>Ensayos por Atributos – Físicos</i> .....                                  | 33 |
| 3.2.1.1.1.  | <i>Color</i> .....  | 33 |
| 3.2.1.1.2.  | <i>Sensación al Tacto</i> .....   | 34 |
| 3.2.1.1.3.  | <i>Consistencia</i> .....   | 34 |
| 3.2.1.1.4.  | <i>Impurezas</i> .....  | 35 |
| 3.2.1.1.5.  | <i>Granulometría</i> .....  | 35 |
| 3.2.1.1.6.  | <i>Límite Líquido y Limite Plástico</i> .....                                 | 36 |
| 3.2.1.1.7.  | <i>Densidad Aparente</i> .....  | 37 |
| 3.2.1.1.8.  | <i>Densidad Real</i> .....  | 38 |
| 3.2.1.2.  | <i>Ensayos Químicos</i> .....   | 39 |
| 3.2.1.2.1.  | <i>Estimación de la Materia Orgánica</i> .....                                | 39 |
| 3.2.1.2.2.  | <i>Estimación de Carbonatos</i> .....   | 40 |
| 3.2.1.2.3.  | <i>Estimación de Potencia de Hidrógeno (pH)</i> .....                         | 41 |
| 3.2.1.2.4.  | <i>Determinación de la Superficie Específica</i> .....                        | 41 |
| 3.2.1.2.5.  | <i>Determinación de Metales Pesados</i> .....                                 | 42 |
| 3.2.1.2.6.  | <i>Fluorescencia de Rayos X (FRX)</i> .....                                   | 43 |
| 3.2.1.2.7.  | <i>Difracción de Rayos X (DRX)</i> .....                                      | 44 |
| 3.2.2.  | <i>Preparación del Activador Alcalino</i> .....                               | 44 |
| 3.2.3.  | Elaboración de discos de prueba.....  | 45 |
| 3.2.3.1.  | <i>Selección de variables de proceso</i> .....                                | 46 |
| 3.2.3.1.1.  | <i>Concentración molar, temperatura de curado, contenido de solución</i> ...  | 46 |
| 3.2.3.1.2.  | <i>Compresión Diametral de Discos</i> .....                                   | 49 |
| 3.2.4.  | Elaboración de Ladrillos (Variables y Proceso Óptimo) .....                   | 51 |
| 3.2.5.  | Elaboración de Probetas y Cubos (Variables y Proceso Óptimo).....             | 52 |
| 3.2.6.  | Propiedades Físicas de los Ladrillos Producidos .....                         | 53 |
| 3.2.6.1.  | <i>Absorción</i> .....  | 53 |
| 3.2.6.2.  | <i>Porosidad</i> .....  | 54 |
| 3.2.6.2.1.  | <i>Porosidad Abierta</i> .....  | 54 |
| 3.2.6.2.2.  | <i>Porosidad Cerrada</i> .....  | 54 |
| 3.2.6.2.3.  | <i>Porosidad Total</i> .....  | 55 |
| 3.2.6.3.  | <i>Resistencia a la compresión</i> .....                                      | 55 |
| CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS ..... |   | 57 |
| 4.1.  | Caracterización de la Materia prima (Ensayos por Atributos, Ensayos Químicos) |    |
|   | 58  |    |



|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.2.   | Caracterización de la Materia prima (Ensayos Químicos y Mineralógicos)..... | 59 |
| 4.2.1. | Ensayos Químicos.....   | 59 |
| 4.2.2. | Fluorescencia de Rayos X.....   | 60 |
| 4.2.3. | Difracción de Rayos X.....  | 60 |
| 4.3.   | Efecto de la temperatura de curado y contenido de solución.....             | 63 |
| 4.4.   | Efecto de la concentración molar CM.....                                    | 66 |
| 4.5.   | Presión de moldeado.....  | 69 |
| 4.6.   | Selección de la mezcla óptima.....  | 69 |
| 4.7.   | Ladrillos elaborados. Características Físicas y Mecánicas.....              | 70 |
| 4.7.1. | Características Físicas.....  | 70 |
| 4.7.2. | Características Mecánicas.....  | 71 |
|        | CONCLUSIONES.....   | 74 |
|        | RECOMENDACIONES.....  | 76 |
|        | BIBLIOGRAFÍA.....   | 77 |
|        | ANEXOS.....   | 83 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Borthwick Castle cerca de Edinburgh, Escocia .....   | 6  |
| Figura 2. Tipos de Ladrillos (macizo y hueco) .....  | 8  |
| Figura 3. Horno utilizado para la cocción de ladrillos. ....   | 10 |
| Figura 4. Semi-esqueleto de la estructura de un Na-PSS .....   | 13 |
| Figura 5 a) Red sialato b) Estructura de un Na-PSS .....   | 14 |
| Figura 6. Proceso de Geopolimerización .....   | 14 |
| Figura 7 Proceso de Geopolimerización. ....  | 15 |
| Figura 8 Configuración geopolimérica a bajas temperaturas con la ayuda de un precursor.16  |    |
| Figura 9 Relave de mina.....   | 19 |
| Figura 10 a) Vía de acceso a la Parroquia Timbara b) Vía Timbara - Buenaventura - San Marcos - Marín Ujukam - La Pituca.....   | 24 |
| Figura 11. Ubicación del área de estudio.....  | 25 |
| Figura 12 a) Depósitos de relaves. b) Relave de mina.....  | 27 |
| Figura 13. a) Hidróxido de sodio. b) Pellets de NaOH.....  | 28 |
| Figura 14. a) Placa con un modelo de discos a elaborar. b) Distintas placas del molde de acero. ....   | 28 |
| Figura 15. a) Relave de mina b) Sistema de notación MUNSELL .....  | 33 |
| Figura 17. Ensayo de Sensación al tacto.....   | 34 |
| Figura 17. a) Relave de mina b) Tabla para estimación de la consistencia de un suelo.....  | 35 |
| Figura 19. Presencia de Impurezas .....  | 35 |
| Figura 20. a) Colocación del hidrómetro a la suspensión de suelo b) Estabilización del hidrómetro previo a la lectura.....   | 36 |
| Figura 21. a) Materiales para ensayo de límite líquido b) Ensayo de límite líquido .....   | 37 |
| Figura 22. Ensayo de límite plástico Norma ASTM D 4318.....  | 37 |
| Figura 23. Determinación de la densidad aparente.....  | 38 |
| Figura 24. a) Materiales para ensayo de Densidad Real.....   | 39 |
| Figura 25. a) Materiales para ensayo de Eliminación de materia orgánica b) Ensayo de Eliminación de materia orgánica .....   | 39 |
| Figura 26. a) Materiales para ensayo de Eliminación de Carbonatos. b) Ensayo de Eliminación de carbonatos .....  | 40 |
| Figura 27. Equipo para determinación del pH de un suelo.....   | 41 |
| Figura 28. a) Colocación de la solución a la suspensión de suelo b) Mezcla de solución de azul de metileno con suspensión de suelo c) Gotas de azul de metileno en papel filtro..... | 42 |
| Figura 29. a) Preparación del equipo para FRX b) Análisis de muestra .....   | 43 |
| Figura 30. a) Muestras para DRX b) Preparación de muestras c) Equipo para Difracción de Rayos X.....   | 44 |
| Figura 31. a) Elaboración de solución alcalina b) Solución siendo agitada. ....  | 45 |
| Figura 32. a) Formación de la pasta b) Mezcla llevada a fundas herméticas. ....  | 46 |
| Figura 33. a) Discos de prueba en molde. b) Discos de prueba retirados de molde.....   | 47 |
| Figura 34. a) Retiro de discos de la estufa b) Discos elaborados.....  | 48 |
| Figura 35. Toma de medidas (espesor y diámetro) de discos .....  | 48 |
| Figura 36. Discos elaborados con combinaciones diferentes.....   | 49 |
| Figura 37. a) Disco a ensayar b) Disco ubicado en la máquina de aplicación de carga c) Mecanismo de rotura presentado luego de ensayo.....   | 50 |
| Figura 38. a) ml de solución a utilizar b) Pasta formada por la mezcla de relave y solución. 51  |    |
| Figura 39. a) Ladrillo antes de entrar a la estufa b) Ladrillo resultante. ....  | 52 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 40. a) Cilindro elaborado mediante combinación obtenida izq. frente a un cilindro de hormigón normal der. b) Cilindro con mezcla óptima ensayado a compresión simple..... | 52 |
| Figura 42. a) Peso de ladrillo b) Toma de medidas c) Ladrillo sumergido d) Absorción de agua. ....   | 53 |
| Figura 43. Ensayo de compresión simple de ladrillo .....   | 55 |
| Figura 44. Composición Química de muestra de relave .....  | 60 |
| Figura 45. Difractograma de rayos X para la muestra de relave. ....  | 61 |
| Figura 46. Difractograma de rayos X para la muestra de relave después del proceso de geopolimerización.....  | 62 |
| Figura 47. Aumento del FO a medida que la temperatura aumenta. ....  | 64 |
| Figura 48. Influencia del cambio de contenido de solución en el valor de FO. ....  | 65 |
| Figura 49. Fisuras generadas por exceso de temperatura de curado. ....   | 66 |
| Figura 50. Efecto de la Concentración Molar (CM) en el FO a 90° C. ....  | 67 |
| Figura 51. Variación del FO en función de la CM.....   | 67 |
| Figura 52. Aumento del FO considerando un aumento del CS y CM. ....  | 68 |
| Figura 53. Ladrillo elaborado con mezcla óptima .....  | 70 |
| Figura 54. Resistencia a la compresión de 3 ladrillos ensayados.....   | 71 |
| Figura 55. Porosidad de ladrillos elaborados .....   | 73 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Características físicas del NaOH.....   | 28 |
| Tabla 2 Caracterización del material (Sensación al tacto).....                              | 34 |
| Tabla 3 Estimación de la efervescencia de la materia con peróxido. Control por atributos .. | 40 |
| Tabla 4 Diferentes combinaciones en función de las variables utilizadas.....                | 47 |
| Tabla 5 Resultados de Ensayos por atributos, Físicos y Químicos. ....                       | 58 |
| Tabla 6 Resultados de Ensayos Químicos.....   | 59 |
| Tabla 7 Efecto de la temperatura de curado en la resistencia a la tracción de discos. ....  | 64 |
| Tabla 8 Efecto del aumento del contenido de solución en el FO de discos. ....               | 64 |
| Tabla 9 Parámetros y sus respectivos valores para elaboración de ladrillos.....             | 70 |
| Tabla 10 Cálculo de absorción de agua en ladrillos elaborados.....                          | 72 |
| Tabla 11 Cálculo de la Porosidad de ladrillos elaborados .....                              | 72 |

## **RESUMEN**

Este trabajo investiga la posibilidad de utilizar relaves de minas para elaborar un ladrillo tecnológicamente mejorado mediante geopolimerización, que presente buenas características físicas y mecánicas, y evite contaminación ambiental. Para cumplir este objetivo se desarrolló tres etapas: caracterización de la materia prima, selección de la solución activadora y factores a intervenir en el proceso (temperatura, concentración molar, contenido de solución) para su posterior análisis y caracterización mecánica de discos elaborados mediante combinaciones de los factores seleccionados mediante el uso del ensayo de compresión diametral utilizando el Brazilian Test (BT) Este ensayo permitirá optimizar tiempo y recursos en la elaboración de ladrillos de tamaño normal. Los resultados obtenidos muestran que el contenido de solución, la concentración molar y la temperatura de curado son factores claves para el desarrollo del proceso químico, debido a que proporcionan al elemento un comportamiento mecánico satisfactorio. Una concentración molar de 15, un contenido de solución de 26% y temperatura de 120°C, resultó ser la mezcla óptima para la elaboración de ladrillos haciendo del relave de mina un candidato potencial para la fabricación de ladrillos eco-amigables.

## **PALABRAS CLAVES:**

Geopolimerización – Activación alcalina – Aluminosilicatos – Relave de mina

## **ABSTRACT**

This work investigates the possibility of using mine tailings to produce a brick technologically improved through geopolymerization, which present good physical and mechanical characteristics, and avoid environmental pollution. In order to meet this objective was developed three stages: characterization of raw material, selection of the activator solution and factors intervening in the process (temperature, molar concentration, content of solution) for further analysis and mechanical characterization discs made using combinations of the factors selected applying the compression testing diameter using the Brazilian Test (BT) this trial will allow to optimize time and resources in the development of normal size bricks. The results show that the content of solution, the molar concentration and curing temperature are key factors for the development of the chemical process, since they provide satisfactory mechanical behavior to the element. A molar concentration of 15, a content of 26% and temperature of 120° C solution, proved to be the optimal mixture for the production of bricks from mine tailings making a potential candidate for eco-friendly brick-making.

## **KEYWORDS**

Geopolimerization – Alkaline activation – Aluminosilicates – Mine tailings

## INTRODUCCIÓN

Los ladrillos han sido utilizados ampliamente como materiales de construcción desde hace décadas. En Estados Unidos se utilizan alrededor de 9 millones de ladrillos al año. Ahmari y Zhang, (2012) señala que la producción de ladrillos mediante la utilización de arcilla como material principal y cocidos a altas temperaturas, genera un alto consumo de energía y afecta el medio ambiente por los gases producto de su fabricación.

Chen, Zhang, Chen, Zhao, y Bao (2011) han buscado la manera de utilizar algunos tipos materiales diferentes de la arcilla para la fabricación y producción de ladrillos con la finalidad de contrarrestar la contaminación del medio ambiente y evitar el uso excesivo de recursos no renovables. Investigaciones como las de Romero y Flores (2010) utilizaron residuos provenientes de la extracción de minerales para dar solución a la problemática medioambiental que vive su país como también para otorgar un valor agregado de manera directa a este tipo de material.

En los últimos años, la utilización de residuos de minería ha llamado mucho la atención en el campo de la construcción, ya que esta práctica evita la explotación de minas vírgenes para la obtención de materiales de construcción, conservando los recursos naturales, y además promueve el uso de materiales baratos para edificaciones y construcciones.

Es por estas razones que ha nacido un gran interés en desarrollar nuevas tecnologías con el propósito de lograr un nuevo ladrillo que posea un desempeño mejorado, reducir el impacto ambiental que su producción genera y darle valor a materias primas que puedan ser candidatas para la generación de este material de construcción.

De aquí nace la incógnita sobre si se puede crear un ladrillo mediante la utilización de residuos industriales, estudiando sus propiedades químicas y mineralógicas que, combinado con un proceso químico (geopolimerización) responda a dicha interrogante.

Esto conlleva a trazarse como objetivo general el indagar acerca de la posibilidad de fabricar ladrillos con mezclas de lodos de relaveras y/o otras fuentes naturales de silicatos, a través de geopolimerización y/o sinterizado, con el propósito de desarrollar nuevas tecnologías de producción de materiales de construcción. Esto requiere una serie de pasos a seguir como la selección del material de acuerdo a las características químicas-mineralógicas, determinación de la mezcla más apropiada mediante la obtención de los valores óptimos de variables de proceso y la producción de ladrillos a través de geopolimerización de la mezcla óptima.

Como metodología a utilizar para efectuar los objetivos planteados anteriormente consta de la familiarización con los estándares y protocolos de seguridad para realizar el trabajo de laboratorio en donde se lleva a cabo varios ensayos para la caracterización de la materia prima (granulometría, densidad, ensayos por atributos, límites de Atterberg, compresibilidad, FRX y DRX) a utilizar en el experimento. Se elabora una serie de discos de prueba y probetas que sirven como referencia para evaluar la máxima capacidad de carga que puede soportar una mezcla antes de fallar (Carneiro, 1943), esto se logra a través del ensayo de compresión diametral llamado también Brazilian Test. Mediante la determinación del factor de optimización FO a través de los resultados de compresión diametral a seleccionar la mezcla óptima escogiendo el valor más alto. Luego se procederá a producir el ladrillo con las variables optimizadas y consecuentemente se caracterizará las unidades producidas.

Este trabajo de investigación comprende el indagar sobre la posibilidad de crear un ladrillo en función a la metodología que se mencionó con anterioridad, mediante la selección de una muestra de suelo según la zona de estudio y que presente características químicas y mineralógicas idóneas para llevar a cabo el proceso de geopolimerización. La muestra seleccionada pertenece a la provincia de Zamora Chinchipe luego de un estudio preliminar de sus características. Es necesario mencionar que aspectos como la viabilidad económica no será incluido en este trabajo, esto se deja para futuras investigaciones.

El presente trabajo de fin de titulación se encuentra estructurado por 4 capítulos, el capítulo I “Marco Teórico” contiene todo lo que se refiere a la teoría necesaria para llevar a cabo la investigación, alcance, justificación, estado del arte acerca del proceso que se llevará a cabo en la experimentación, y conceptos que son necesarios tener presentes como son: geopolimerización, aluminosilicatos, solución alcalina, relave de mina, de manera que el lector pueda familiarizarse con la línea de investigación que se sigue. En el capítulo II, se describe la situación geográfica y ubicación de la mina “La Pituca” en la Provincia de Zamora Chinchipe. En el capítulo III se detalla a profundidad la metodología utilizada a lo largo del proceso de investigación: selección de la materia prima, concentración molar y así como todas las variables involucradas en la experimentación y los ensayos realizados previos a su obtención. En el capítulo IV “Análisis y Discusión de Resultados”, se hace énfasis en el análisis de cada una de las variables y su importancia en el proceso, en base a los resultados obtenidos en la experimentación. Por último se encuentran las conclusiones y recomendaciones.



**CAPÍTULO I:**  
**MARCO TEÓRICO**

## 1.1. Generalidades

El ladrillo es uno de los materiales más antiguos utilizados por el hombre en el ámbito de la construcción, debido a que la materia prima para su elaboración es de fácil obtención y sus procesos no involucraban un conocimiento profundo. Antes eran utilizados sin ser cocidos y su nombre era adobes. Poco a poco los ladrillos fueron tomando cabida en algunos lugares del mundo. En Palestina hace más de 9000 años ya se elaboraban este tipo de elementos secados al sol. Los chinos construyeron la mayor parte de su muralla a base de ladrillos y los romanos los utilizaron para levantar anfiteatros y acueductos. En España también se hizo común el uso del ladrillo sobre todo en las provincias de Aragón, Castilla y Andalucía.



Figura 1. Borthwick Castle cerca de Edinburgh, Escocia  
Fuente: Hendry & Khalaf, (2001)

Los ladrillos presentan propiedades físicas como durabilidad, consistencia, resistencia al fuego, por lo que todo el tiempo ha sido muy útil para la construcción de edificaciones. Como se aprecia en la figura 1, es posible construir castillos a base de estos elementos, brindando seguridad a quienes lo habitaban.

En Latinoamérica, la costumbre de utilizar ladrillos para la construcción poco a poco fue introduciéndose. Por ejemplo en Argentina, este elemento ya era conocido por antiguas civilizaciones las cuales se dedicaban a elaborar adobes (ladrillo sin coser) debido a que algunas regiones en las que se asentaban eran secas y favorecían al endurecimiento de dicho

elemento. Esto hizo que las construcciones tomaran otro camino y se dejaran de lado las chozas que comúnmente se utilizaban en ese tiempo.

En Perú, estos no fueron utilizados, hasta la llegada de los españoles, quienes al llegar al país empezaron a construir con este material, sobre todo en lugares de la costa.

Las fuertes lluvias ocasionaban que los adobes utilizados en ese tiempo, se deterioren de manera rápida poniendo en peligro las construcciones, por lo cual, la técnica de cocción ya empezó a desarrollarse, generando una estabilidad al ladrillo como material de construcción por las mejoras obtenidas sobretodo en sus características mecánicas. El proceso de fabricación de un ladrillo es sencillo, comienza con la mezcla del material arcilloso con agua, consiguiendo una pasta, la cual es ubicada en moldes que le dan su forma característica. Luego de pasar por la etapa de secado en donde el ladrillo ya endurece, es sometido a cocción logrando de esta manera fabricar un material de construcción sin la ayuda de variantes tecnológicas que hasta hoy sigue manteniendo vigencia. Su uso se extendió debido a sus características mecánicas presentadas luego de la cocción y además por derivarse de componentes naturales y de manera artesanal convirtiéndose en uno de los materiales de construcción con mayor demanda hasta el momento.

### **1.1.1. El ladrillo como material de construcción**

Un ladrillo es una pequeña pieza en forma de paralelepípedo, formada por arcilla que pasan por un proceso de moldeado, compactado y cocción a altas temperaturas. De acuerdo a Barrenzuela (2014) estos pueden ser utilizados en toda clase de construcción por su fácil manejo, su forma regular y sus excelentes características mecánicas.

Según la norma INEN NTE 293<sup>1</sup> el ladrillo es una pieza de arcilla moldeada y cocida en forma de prisma regular empleado en albañilería.

Fernandez Ortega (2010), lo denomina al ladrillo como toda pieza destinada a la construcción, generalmente en forma de octaedro, fabricada con arcilla o tierra arcillosa, y en algunas ocasiones con la adición de otros materiales que resultan beneficiosos para su desempeño.

El proceso para la fabricación de ladrillos es: extracción y trituración de arcilla. Preparación y amasado de la pasta mediante la mezcla con agua, moldeado a mano y secado durante 3 a 5 días al sol y finalmente cocidos a temperaturas que superan los 700 °C.

---

<sup>1</sup> Norma Técnica Ecuatoriana INEN 293. Ladrillos Cerámicos. Definiciones. Clasificación y condiciones generales.

La cocción de las arcillas utilizadas en el proceso, transforman las propiedades químicas y mineralógicas del material a tal punto que mejoran sus propiedades fundamentales como la resistencia mecánica, aislamiento térmico y acústico, consistencia y durabilidad. Las arcillas por lo general, han sido la materia prima preferida para la fabricación de ladrillos ya que se encuentra en la mayoría de lugares, siendo esta la principal razón de su uso.

Fernandez Ortega (2010) otorgó nombres a cada una de las aristas del ladrillo. A las aristas mayores se las conoce como sogá, las aristas medianas como tizón y las aristas menores son llamadas grueso. A cada una de sus caras también les dio sus nombres. Tabla se le llama a cada una de las dos caras mayores, canto a cada una de las dos caras medianas y testa a cada una de las dos caras menores.

Para que un ladrillo sea apto para la construcción, debe cumplir algunas características: una geometría homogénea (buen moldeado, caras planas), ser poroso en cierto porcentaje para permitir adherencia con el mortero, evitar que tenga sales solubles para eliminar posibles eflorescencias, poseer un sonido metálico al ser golpeado, y que no contenga eflorescencias.

### 1.1.2. Tipos y usos del ladrillos artesanal

Los ladrillos que comúnmente se fabrican son los ladrillos macizos, perforados y huecos.

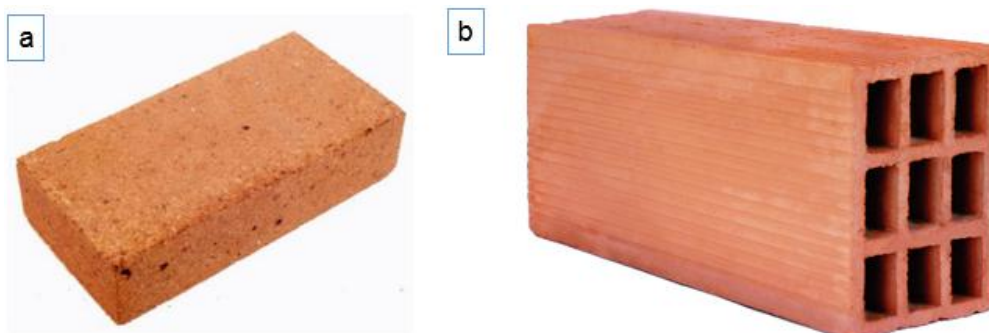


Figura 2. Tipos de Ladrillos (macizo y hueco)  
Fuente: Recuperado de: <http://www.ladrillosbailen.net/es/perforados;>  
<http://www.arqhys.com/construccion/macizo-ladrillo.html>

La INEN NTE 293 clasifica a los ladrillos de la siguiente manera:

Ladrillo común: ladrillo que es fabricado de acuerdo a un moldeado a mano.

Ladrillo de máquina: ladrillo moldeado mecánicamente a través de equipos y su producción es continua.

Ladrillo pretensado: ladrillo que se prensa entre el moldeo.

Ladrillo macizo: ladrillo el cual es fabricado a mano o a máquina sin ningún tipo de perforaciones en su interior o con perforaciones celulares que pueden llegar hasta el 20% de su volumen.

Ladrillo hueco: ladrillo fabricado a máquina con algún tipo de perforación en su interior, que pasan del 20% de su volumen

El uso de este tipo de elementos es para la construcción de muros, pisos y tabiques, por lo que debe soportar cambios climáticos, poseer buenas propiedades tanto físicas como mecánicas.

### **1.1.3. Contaminación ambiental debido a la producción de ladrillos artesanales.**

El ladrillo se ha producido desde hace varias décadas, y a pesar de su poco avance tecnológico, sigue siendo uno de los materiales de construcción más utilizados en edificaciones. Esta producción de ladrillos debido al proceso antes mencionado genera una contaminación al medio ambiente en los que se encuentran: una explotación intensiva de minas de arcilla, tala de árboles para la cocción de los ladrillos y consecuentemente la emisión de gases de efecto invernadero contaminando el aire. De acuerdo a una investigación realizada por Pabón Vallejo (2007) afirman que la madera es extraída de un bosque húmedo tropical y su uso es desmedido debido a que necesitan grandes cantidades de leña por sus técnicas inadecuadas y poco eficientes y consecuentemente la calidad del ladrillo disminuye notablemente.

Este problema resulta frecuente en cualquier lugar de Sudamérica donde se producen este tipo de elemento. En Ecuador se asegura que las personas que trabajan en este sector no utilizan la protección adecuada para su elaboración con la justificación de que no se utilizan productos químicos en su fabricación. Esto se debe a la falta de educación de las personas que se encuentran a cargo de esta actividad. Las altas concentraciones de monóxido de carbono (CO) debido a la combustión no solo de leña sino de basura, plásticos, botellas, llantas, polietileno, etc. son perjudiciales a largo plazo para la salud.

Debido a la contaminación generada por la producción de este elemento, se ha tomado medidas para evitar este problema que no solo afecta al medio ambiente sino también a la salud de quienes lo producen. Organizaciones se han dedicado a concientizar a los sectores ladrilleros con la finalidad de educar a las personas en la tecnificación de procesos para que estos sean más eficientes y se vea reflejado en un producto fiable y rentable.



Figura 3. Horno utilizado para la cocción de ladrillos.  
Fuente: Bianucci, (2009)

## 1.2. Geopolimerización

El alto consumo de materiales para la construcción y consecuentemente, el aumento de la producción industrial, ha sido objeto de la utilización de grandes cantidades de recursos naturales. Estos, al ser procesados para llegar al producto final generan residuos que por lo general contaminan al medio ambiente. Uno de estos problemas medioambientales es la acumulación de estos residuos en zonas cercanas a los pueblos o ciudades, ocasionando contaminación de recursos como el agua, convirtiendo áridos los suelos y disminuyendo la calidad de vida de los habitantes.

Es por esto que, algunos investigadores como Soares, Pinto, Ferreira y Labrincha (2008) han buscado la manera de encontrar beneficio alguno en estos residuos estudiando sus características tanto químicas como mineralógicas de modo que no sean un problema a largo plazo.

La geopolimerización se ha convertido en el proceso químico que ha tomado espacio durante los últimos años, debido a que utiliza este tipo de residuos industriales y mediante su aplicación los convierte en materiales con elevadas resistencias mecánicas, excelentes propiedades físicas debido a su composición.

Con la finalidad de elaborar materiales alternativos de construcción, se han aprovechado últimamente residuos industriales como humo de sílice, cenizas volantes, escorias de alto horno, residuos de explotación minera. El reemplazo de recursos naturales como la arcilla con este tipo de materiales para la elaboración de materiales de construcción significa un alivio medioambiental ya que se dejaría de lado la sobreexplotación de este tipo de yacimientos evitando así problemas como: tala de árboles, destrucción de hábitat, etc.

Es por esto que el mayor reto en la investigación ha sido buscar la producción de materiales amigables con el medio ambiente, que presenten buenas propiedades mecánicas y físicas y por otra parte sean la solución para la sustitución de materiales que hoy en día se producen con normalidad.

### **1.2.1. Fundamentos Teóricos**

De acuerdo a la definición de Caballero y Sánchez (2014) los geopolímeros son un tipo de material compuesto de minerales aluminio silicatos, que cuando se activan mediante soluciones básicas y se encuentran bajo condiciones de temperatura y presión constantes, dan como resultado un material con características mecánicas satisfactorias. El término geopolímero ya había sido introducido por la Unión Soviética en los años 50, pero a quien se le atribuye este término es a Josep Davidovits, quien se refiere a ellos como “polímeros sintéticos orgánicos de aluminosilicatos provenientes de la reacción química llamada geopolimerización”. Según investigaciones del científico Joseph Davidovits, estudió la piedra usada en las pirámides egipcias y elaboró una teoría acerca de esto en la que explica que las pirámides no fueron construidas transportando rocas grandes que al parecer eran talladas, sino más bien que estas eran artificiales y habían sido fabricadas en el mismo lugar en el que se encuentran. Esta roca artificial sería un compuesto en parte de alúmina, óxido de silicio, y elementos alcalinos.

Estos polímeros sintéticos orgánicos forman redes amorfas de tetraedros alternados de  $\text{AlO}_4^-$  y  $\text{SiO}_4$  debido a los componentes mineralógicos utilizados como fuentes principales para la elaboración de geopolímeros los que se encuentran constituidos por lo general de alúmina y sílice.

En el proceso se involucran varios factores, los cuales por lo general afectan a las propiedades finales del geopolímero elaborado. Uno de estos factores es el activador alcalino, sus concentraciones, proporciones, así como los aditivos utilizados; el cual afectan de manera directa en las propiedades mecánicas de los materiales. Las propiedades de los activadores alcalinos se estudian más adelante.

En un comienzo, los geopolímeros fueron preparados mediante la utilización de materiales derivados de la arcilla en conjunto con soluciones alcalinas de NaOH y KOH, y llevadas a temperaturas que se encontraban en rangos de 25 °C y 120 °C. Davidovits (1999) para conocer la influencia de la calcinación de la materia prima en la reactividad con las soluciones utilizada se convirtió el compuesto mineralógico caolinita a metacaolinita sometiénola a 650

°C. El resultado fue un geopolímero con propiedades mecánicas elevadas en comparación con otros ligantes. De acuerdo a estos resultados, los investigadores tomaron en cuenta que estos materiales mediante la utilización de este proceso se convierten en productos útiles para la fabricación de cerámica, así como cualquier otro tipo de material de construcción. Cabe resaltar que las propiedades del producto final varían no solo del activador alcalino utilizado sino también de la naturaleza y pureza de las materias prima utilizadas.

Investigadores como Wallah y Ragan (2006), estudiaron la resistencia a la compresión de elementos geopoliméricos activados alcalinamente con una mezcla de silicato de sodio e hidróxido de sodio. Ellos observaron en su investigación que incluso después de un año de estar sumergidos aquellos geopolímeros en una solución de sulfato de sodio, su apariencia no cambiaba, tampoco presentaban cambio de volumen y existía un poco variabilidad en la resistencia a la compresión lo que quiere decir que son resistentes a ambientes agresivos.

Cualquier fuente que presente características mineralógicas de un aluminosilicatos puede ser útil para la preparación de un geopolímero, siempre y cuando este no contenga componentes químicos que podrían ser peligrosos para la salud humana, como es el caso de los residuos de minería. Estos pasan por procesos que por lo general involucran la utilización de reactivos químicos para la extracción del mineral generando desechos no aptos para su utilización debido a su composición peligrosa.

Algunos autores como Palomo y Palacios (2003) han tomado diferentes residuos industriales como materia prima, como por ejemplo las cenizas volantes o las escorias de alto horno. Con el uso de estos materiales de residuos industriales ha demostrado que pueden generar geopolímeros de alta calidad debido a sus características químicas y mineralógicas. Estos contribuyen al medio ambiente, ya que proporciona una alternativa para el tratamiento de los mismos.

Pacheco-Torgal, Castro-Gomez, y Jalali, (2008) expusieron que es posible la obtención de un material cementante geopolimérico a través de los desechos de mina de tungsteno en Panasqueira en Portugal. Demostraron que este material tenía altos contenidos de moscovita y cuarzo, que en términos químicos y mineralógicos corresponde a altos contenidos de sílice y alumina.



### 1.2.2. Silicatos y Aluminosilicatos

Para la creación de un geopolímero es necesario que la fuente o materia prima a utilizar se encuentre compuesta por aluminosilicatos, los cuales son un grupo de minerales constituidos principalmente por óxidos de silicio y óxidos de aluminio con estructuras cristalinas y cationes como calcio, magnesio, sodio, potasio, entre otros. Estos constituyen la clase más extensa de minerales que existen en la naturaleza, en general los silicatos son estructuras tridimensionales.

### 1.2.3. Química de la Geopolimerización

Sindhunada (2006) describe la química del proceso de la siguiente manera: los polímeros sintéticos orgánicos proceden de la reacción química llamada geopolimerización, en la cual el silicio y el aluminio se enlazan tetraédricamente por el intercambio de átomos de oxígeno, formando la unidad básica que es el monómero sialato (O-Si-O-Al-O), el cual lleva un exceso de carga negativa debido a la sustitución de  $Si^{+4}$  con  $Al^{+3}$ . El balance de cargas en la estructura del polisialato se realiza debido a los cationes de metales alcalinos ( $K^+$ ,  $Na^+$ ).

El silicio y el aluminio en la estructura de un geopolímero, se encuentra enlazado tetraédricamente por intercambio de átomos de oxígeno. Según (Davidovits, 1991) la fórmula empírica de un sialato es la siguiente:  $Mn(-SiO_2)_z - AlO_2)_n * wH_2O$  donde M es un catión monovalente, ya sea potasio o sodio, n es el grado de policondensación, z que puede ser 1,2,3 el cual determina el tipo de geopolímero resultante, 1 si la red es polisialato (PSS), 2 si la red viene a ser polisialato-siloxo (PSS) y z=3 si la red es polisialato-disiloxo PSDS. W es el número de moléculas de agua asociadas.

El silicio y el aluminio en la estructura de un geopolímero, se encuentra enlazado tetraédricamente por intercambio de átomos de oxígeno. Según (Davidovits, 1991) la fórmula empírica de un sialato es la siguiente:  $Mn(-SiO_2)_z - AlO_2)_n * wH_2O$  donde M es un catión monovalente, ya sea potasio o sodio, n es el grado de policondensación, z que puede ser 1,2,3 el cual determina el tipo de geopolímero resultante, 1 si la red es polisialato (PSS), 2 si la red viene a ser polisialato-siloxo (PSS) y z=3 si la red es polisialato-disiloxo PSDS. W es el número de moléculas de agua asociadas.

A continuación se muestra la estructura de un geopolímero de acuerdo a dos autores.

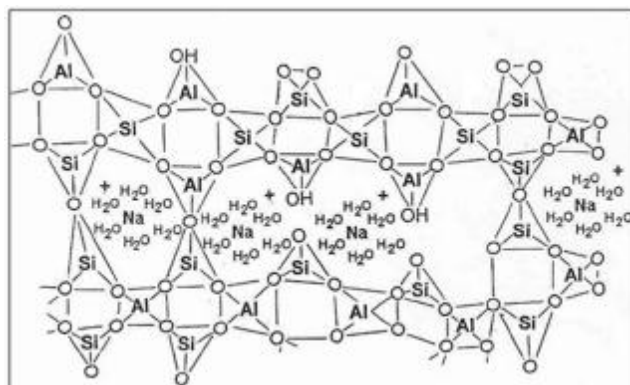


Figura 4. Semi-esqueleto de la estructura de un Na-PSS  
Fuente: Barbosa, Mackenzie, & Thaumaturgo,(2000)

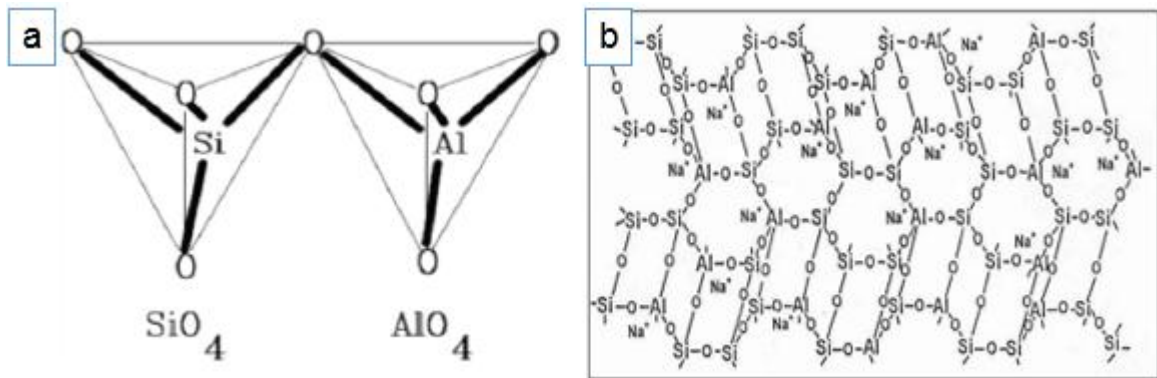


Figura 5 a) Red silato b) Estructura de un Na-PSS  
Fuente: Davidovits, (1991)

Los geopolímeros basados en aluminosilicatos son llamados polisialatos. Este término es una abreviación de poli-(sílico-oxo-aluminato) o (-Si-O-Al-O-)<sub>n</sub> siendo n el grado de polimerización de la estructura del geopolímero a elaborar.

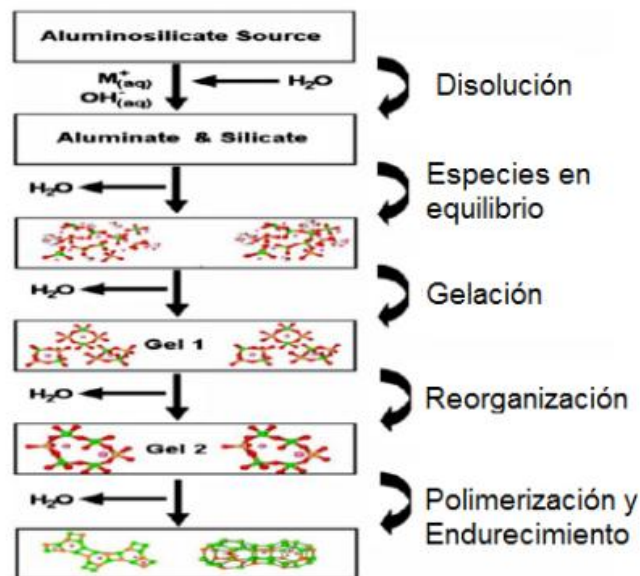


Figura 6. Proceso de Geopolimerización  
Fuente: Duxon (2006)

De acuerdo al gráfico, el proceso presentado por Duxon (2006) lo describe de la siguiente manera: El contacto entre la solución alcalina y las partículas sólidas causan que los componentes vítreos de las mismas se disuelvan. Este proceso libera a los aluminatos y a los silicatos, como monómeros, probablemente. Estos monómeros reaccionan con otros y forman trímeros, tetrámeros. Cuando la solución ha alcanzado o ha llegado a un estado de saturación, se produce la precipitación o caída del gel aluminosilicato. Este gel es considerado como un

intermediario de la reacción de geopolimerización y es llamado Gel I. La formación de este gel puede ser explicada por su mayor contenido del ión  $Al^{3+}$  en el medio alcalino en etapas tempranas de reacción. Esto se debe a que los enlaces de Al-O de los aluminosilicatos que son utilizados como la materia prima son más débiles que los enlaces Si-O. De manera gradual, los enlaces Si-O son disueltos de tal forma que la concentración de silicio en el medio alcalino se va aumentando también generando otro tipo de gel llamado Gel II donde progresivamente alcanza la proporción de silicio en la materia prima. Luego de esto se entra a un proceso de reorganización de las estructuras, las cuales determinan la composición del geopolímero y su estructura final.

La geopolimerización es la suma de varias reacciones, que se tienen lugar al mismo tiempo. Estas son la disolución/hidrolisis, reestructuración y policondensación.

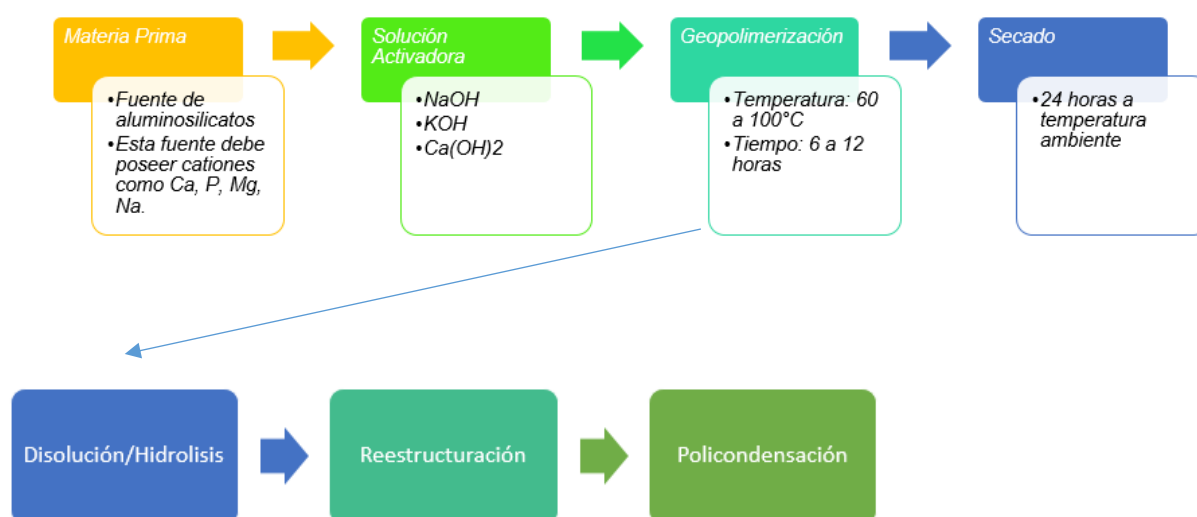


Figura 7 Proceso de Geopolimerización.

Fuente: Xu & Van Deventer, (2002) y Rees, Provis, Lukey, & Van Deventer, (2008).

Elaborado por: El autor.

En el paso de la disolución/hidrolisis la geopolimerización empieza con la disolución continua del precursor de aluminosilicato. En esta disolución se forman especies reactivas como  $Si(OH)_4$  Y  $Al(OH)_4^-$ , las cuales ayudan a continuar con el proceso. Como se sabe existen varios tipos de geopolímeros: Por su composición, según su estructura, y por su comportamiento térmico. Según este último los geopolímeros pueden ser termoplásticos o termoestables. En el paso de la reestructuración los precursores de aluminio se orientan para la obtención de un estado más termoestable termodinámicamente antes de que ocurra el siguiente paso que es la policondensación. En el último paso se empiezan a formar macromoléculas con las

especies reactivas obtenidas en el primer paso. En este proceso se obtiene como producto secundario H<sub>2</sub>O.

Cada una de las etapas que se mencionaron anteriormente, varían de acuerdo a las condiciones en las que se dé lugar el proceso. Por ejemplo el tipo de relación solido/solución contenido de solución, condiciones de reacción, concentraciones alcalinas, etc.

Otra de las características de la química de la geopolimerización es la configuración geopolimérica a bajas temperaturas. En algunos procesos, el material de suelo se encuentra recubierto por un ligante ya sea cemento, cal o asfalto en un 5% a 10% de su peso por ejemplo, se puede obtener un material estabilizado. Sus propiedades mecánicas son bajas pero se mantiene como un material con buenas características bioclimáticas. Por el contrario si la cantidad de ligante aumenta con la finalidad de obtener buenas características mecánicas, las propiedades bioclimáticas se pierden. La configuración geopolimérica a bajas temperaturas asegura la cohesión del material gracias a un principio completamente diferente. No existe aumento de ligante pero si catalizadores que hacen que los componentes mineralógicos reaccionen entre ellos para formar redes. Este proceso es comparable con lo que sucede en la fabricación de cerámicos cocidos a temperaturas entre 900°C y 1100°C donde el material arcilloso utilizado para la fabricación sería el ligante. La diferencia radica que con la configuración polimérica a bajas temperaturas podría iniciar este proceso a temperatura ambiente.

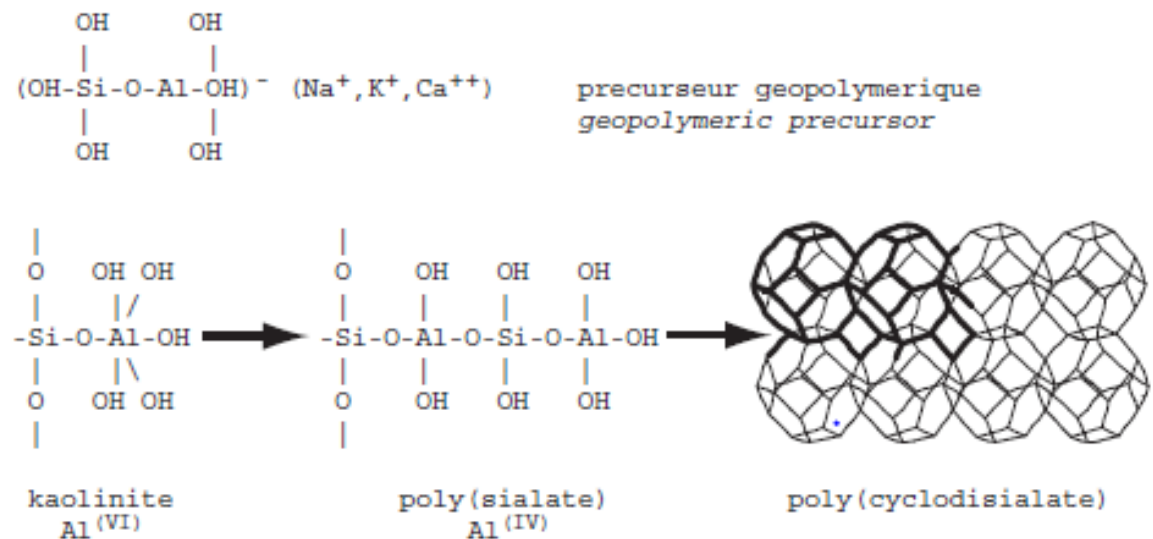


Figura 8 Configuración geopolimérica a bajas temperaturas con la ayuda de un precursor.  
Fuente: Boutterin & Davidovits, (1988)

#### 1.2.4. Activador alcalino y su efecto en sistemas geopoliméricos

La función principal del activador alcalino es la de acelerar la disolución de la fuente de aluminosilicatos, lo cual conlleva a una formación de hidratos estables y consecuentemente una estructura compacta del geopolímero elaborado. Los activadores alcalinos comúnmente utilizados son hidróxidos, sales de ácido débil, sales de ácido fuerte y sales silícicas. Los activadores más comúnmente utilizados son el hidróxido de sodio o potasio, silicatos y carbonatos.

La reacción del activador alcalino con la fuente de aluminosilicatos está basada en la química de la activación alcalina de cementantes propuesta por un científico belga. (Purdon,1940) descubrió que al añadir álcali se produce una nueva forma de endurecimiento rápido. Él propuso que el mecanismo de endurecimiento de una escoria, activada alcalinamente con NaOH en concentraciones del 5.5% al 7.5%, de manera que se disuelva el Si y Al que componen a la materia prima y la precipitación de silicato cálcico hidratado, se podrían obtener resistencias de 27MPa a un día y de 72 MPa a los 5 años.

Según Palomo (2000), cuando la potasa ataca al componente vítreo del aluminosilicato producto de reacción permanente adherido a las partículas originales de la materia prima. No hay dispersión del producto alrededor del sistema y consecuentemente, muchos huecos y poros permanecen sin rellenar. Cuando el activador alcalino es una disolución de hidróxido de sodio se puede observar también un número de poros relativamente alto y un conjunto de esferas huecas. En este caso el producto de reacción se desprende de las esferas individuales formando una masa sólida heterogéneamente distribuida en contacto con las partículas que no han reaccionado. También es interesante observar como algunas esferas de la materia prima están parcialmente cubiertas por productos de reacción, lo cual podría sugerir que la precipitación de los productos de reacción puede formar, en un breve espacio de tiempo, una película sobre partículas sin reaccionar que dificultaría su posterior activación.

Investigadores como Xu y Van Deventer (2000), aseguran que la incorporación de NaOH permite una mejor disolución de los minerales que conforman a la materia prima, comparado con la incorporación de KOH. Además la utilización de soluciones alcalinas compuestas de silicatos solubles produce reacciones más altas frente a soluciones de hidróxidos alcalinos.

Como se mencionó anteriormente el proceso de geopolimerización tiene algunas fases, en las cuales los cationes alcalinos tienen una función importante. En la primera etapa estos ordenan las moléculas de agua y más tarde las especies de silicato solubles inician un proceso de nucleación el cual permite la creación de la estructura geopolimérica. En esta etapa, el catión determina la estructura final y sirve como modelo para direccionar y controlar la

capacidad de la policondensación y del crecimiento estructural. De acuerdo a las investigaciones realizadas por Van Jaarsveld y Van Deventer (1999) y Steveson y Soagoe-Crentsil (2005) el potasio  $K^+$  parece ser el responsable de una mayor resistencia mecánica además de un mejor proceso de condensación del producto final, comparado con el  $Na^+$ , cuando ambos son agregados en las mismas condiciones. El ión metálico  $K^+$  trabaja mejor como base y tiene mayor tamaño, lo cual permite una velocidad más alta de disolución generando estructuras más densas y más compactas.

Gasteiger, Frederick y Streise (1992) aseguran que la variable fundamental para que el proceso químico de lugar a un geopolímero con buenas características es la selección de un buen activador alcalino, ya que la disolución de la materia prima aumenta en consideración cuando el ion hidróxido aumenta.

Uno de los activadores alcalinos preferidos para la elaboración de geopolímeros son los hidróxidos ya que funcionan como base y debido a su excesiva alcalinidad deshace la estructura del aluminosilicato y forma estructuras compactas. Lo negativo del utilizarlos, es la presencia de eflorescencias que si no es controlada podría ser un problema a largo plazo. El exceso de alcalinidad reacciona con el  $CO_2$  atmosférico formando carbonatos de sodio o cristales de bicarbonato, sin embargo esto no afecta a la estructura final del producto elaborado. La utilización de otras soluciones como las carbonatadas da como resultado una reacción pobre con la fuente de aluminosilicatos y una estructura débil sin cohesión entre sus partículas.

Como se mencionó anteriormente, la composición química, mineralógica son también claves para un buen proceso de geopolimerización. La consistencia y la durabilidad son propiedades que se encuentran afectadas por la composición química del material debido a que las estructuras formadas básicamente son enlaces que mientras más fuerte se generen se obtendrá una estructura con mejor comportamiento físico y mecánico. Además las relaciones químicas también afectan estas propiedades por lo que es necesario considerarlas al momento de elaborar un geopolímero. Las relaciones que por lo general se estudian son:  $M_2O/SiO_2$ ,  $SiO_2/Al_2O_3$ ,  $H_2O/M_2O$  y  $M_2O/Al_2O_3$  donde M representa a los metales alcalinos. (K, Na, Ca, Ba y Li).

Algunas de las ventajas de la aplicación y producción de los geopolímeros según Rodriguez Martinez, (2009) son: la gran cantidad de materias primas que pueden ser aplicadas para su creación, el menor impacto ambiental debido a que el consumo del recurso energético se reduciría y por ende la emisión de gases contaminantes a la atmosfera sería menor, además no hay necesidad de equipos con elevados precios ya que las mezclas puede ser preparadas fácilmente con materiales simples de laboratorio. Otra ventaja es que si son expuestos a

medios agresivos presentan una excelente estabilidad frente a otros elementos como por ejemplo el hormigón simple y por último, pueden adquirir elevadas resistencias mecánicas en un corto tiempo, teniendo en cuenta las condiciones como la temperatura de curado concentración alcalina, etc.

### **1.3. Los relaves mineros**

De acuerdo con el Programa de Asistencia Técnica al Ministerio de Energía y Minas del Perú (2005), definen al relave como “desecho mineral con partículas de tamaño entre una arena y un limo que provienen del proceso de concentración del que son producidos, los cuales son transportados y depositados en forma de lodo”.



Figura 9 Relave de mina  
Fuente: Mayo Filio, (2010)

Según Romero y Flores (2010), el relave es “un recurso que proviene de la minería y del procesamiento de minerales. El material es fino y como se encuentra en condiciones húmedas, este debe ser depositado en botaderos de residuos industriales”.

#### **1.3.1. Características de los relaves mineros**

Los relaves provenientes del chancado del mineral proveniente de la mina con tamaños que varían desde centímetros hasta milímetros. Luego es procesado para reducirlo a tamaños menores que un milímetro ya sea en tambores rotatorios o en molinos de bolas. Al material le agregan agua y permanece en forma de lodo por un determinado tiempo. Para la extracción de minerales como la plata este proceso puede variar, ya que en este caso para la óptima

recuperación de los granos de mineral se debe realizar una disminución de partículas mayor a la que habitual se realiza, además de la adición de cal para el incremento del pH y de cianuro para la disolución de las partículas que envuelven este tipo de mineral.

Los residuos sólidos, que son el resultado de la flotación de minerales de las plantas pueden existir en dos modalidades: pasivos y activos mineros. Los pasivos mineros son las denominadas escombreras que por lo general se encuentran fuera de operación y que generan contaminación en el lugar donde se encuentran ubicados. Esta contaminación puede ser en recursos como el agua (superficial como subterránea), suelo, además del impacto visual generado por este tipo de residuos. Los activos mineros son aquellos que se encuentran aún en operación.

Los relaves pueden disolver minerales solubles que se encuentren en los suelos donde se ubiquen y además contener reactivos como mercurio u otros productos que podrían ser peligrosos en el caso de que entren en contacto con el suelo o con el agua utilizada por las personas. Por estas razones se debe considerar el construir estructuras que brinden seguridad evitando que el material se encuentre a la intemperie. Para el depósito de relaves existen varias formas que varían en función de la capacidad de almacenamiento del relave, la topografía del lugar, la producción del yacimiento, etc. Los distintos tipos de depósitos de relaves son: los tanques de relave, los embalses de relaves, los depósitos de relaves espesados

### **1.3.2. Contaminación Ambiental**

Los desechos mineros son producto de operaciones realizadas en dicho sector. En las últimas décadas la producción de este tipo de residuos ha crecido de una manera muy apresurada. En una práctica normal, los desechos de minería son recogidos, transportados y depositados en escombreras. Estos depósitos generan problemas ambientales y problemas de seguridad, entre los que se distinguen contaminación en la superficie del agua, en aguas subterráneas y suelos.

García Saldaña y Tongombol Chuquiango (2011), define a los residuos mineros como materiales peligrosos capaces de dañar el equilibrio del ecosistema por su composición y densidad ocasionando diversos impactos ambientales, sociales y económicos. También expresan que en la Guía para el manejo de relaves mineros, el chancado y molienda de minerales generan un volumen de relaves que es aproximadamente dos tercios más grande que el volumen original del mineral en el sitio.



De acuerdo con el Programa de Asistencia Técnica al Ministerio de Energía y Minas del Perú (2005), se afirma que en el país existen al menos 176 minas metálicas en operación. De estas minas alrededor de 54 producen más de 100 toneladas/día y sólo 26 más de 500 toneladas/día.

Estos relaves que son producto del proceso de flotación de minerales polimetálicos, llegan a 25000 toneladas solamente en un día, lo que al mes sería 750000 toneladas y en el año 9 millones las cuales pasan a formar parte de las escombreras. (Romero & Flores, 2010).

De acuerdo a lo anterior, es necesario seleccionar un candidato que presente características óptimas para su utilización como materia prima, ejecutando un previo análisis de los procesos por los que atraviesa antes de llegar a convertirse en un relave minero, asegurando que se encuentre libre de sustancias que puedan ser dañinas para la salud (metales pesados) y además de disminuir el impacto visual que genera la acumulación de dichos residuos.

### **1.3.3. El relave de mina como materia prima**

En los últimos años, la utilización de los desechos de minería se ha venido desarrollando a nivel mundial, de manera especial para su uso en la construcción y en el campo de la ingeniería civil. Esto podría ayudar a reducir la emisión de gases de efecto invernadero, conservación de recursos naturales, evitar la extracción de materiales para su utilización en la construcción.

Roy, Adhikari, y Gupta, (2007) estudiaron la posibilidad de utilizar desechos de minería de oro de Kolar Gold Field en Karnataka, India. En este estudio, mezclaron este material con proporciones de cemento portland y otros suelos de acuerdo a las dosificaciones. Las mezclas se moldearon y se cocieron a temperaturas entre los 750 y 950°C. La investigación dio como resultado que los ladrillos fabricados con 20% de cemento y con 14 días de curado reunían la resistencia a la compresión requerida, pero el costo fue 2.4 veces más alto que un ladrillo hecho de manera tradicional.

En varios países, el relave de mina ya se encuentra siendo utilizado como materia prima para la elaboración de materiales de construcción. Un claro ejemplo es Perú, donde el reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de ladrillos y baldosas ya se está dando con la finalidad de proponer una alternativa para la solución de la problemática ambiental por la que se encuentra pasando el país.

Investigaciones recientes están buscando la manera de producir ladrillos de manera amigable con el medio ambiente a través de métodos existentes. La geopolimerización es un método

alternativo utilizado para la producción de ladrillos y está al acecho de algunos investigadores por los beneficios ambientales y ecológicos que presenta.

Cabe resaltar que no todos los tipos de residuos mineros pueden ser utilizados para la elaboración de este tipo de elementos ya que algunos procesos implican la utilización de reactivos químicos, los cuales contaminan el material haciéndolo peligroso para su uso en la construcción.

**CAPÍTULO II**  
**ÁREA DE ESTUDIO**

## 2.1. Elección de la Zona de estudio

Como se mencionó anteriormente, es fundamental la elección de un material que contenga características químicas y mineralógicas idóneas para la aplicación del proceso de geopolimerización de manera que el mismo se desarrolle en condiciones adecuadas y obtener de datos fiables en esta investigación.

Zamora Chinchipe es una de las principales provincias del Sur del Ecuador en donde se realizan actividades mineras, por lo que se escogió este lugar para la selección de una muestra de suelo para su estudio y utilización como fuente principal para realizar esta investigación. Luego de un estudio preliminar (el cual se encuentra en el capítulo siguiente) se escogió como materia prima los residuos de minería provenientes de la Concesión Minera "Pituca II". Es necesario mencionar que este residuo de minería fue el único utilizado para el desarrollo de la presente investigación.

## 2.2. Acceso

El acceso a la zona es por vía terrestre con una distancia de alrededor de 10 km, por medio de una vía de primer orden, y desde Timbara hasta el sector minero se lo realiza a pie o en acémila a través de una vía de cuarto orden. El recorrido dura por lo general tres horas y media.



Figura 10 a) Vía de acceso a la Parroquia Timbara b) Vía Timbara - Buenaventura - San Marcos - Marín Ujukam - La Pituca  
Elaborado por: El autor

### 2.3. Localización y Descripción del Área de Estudio

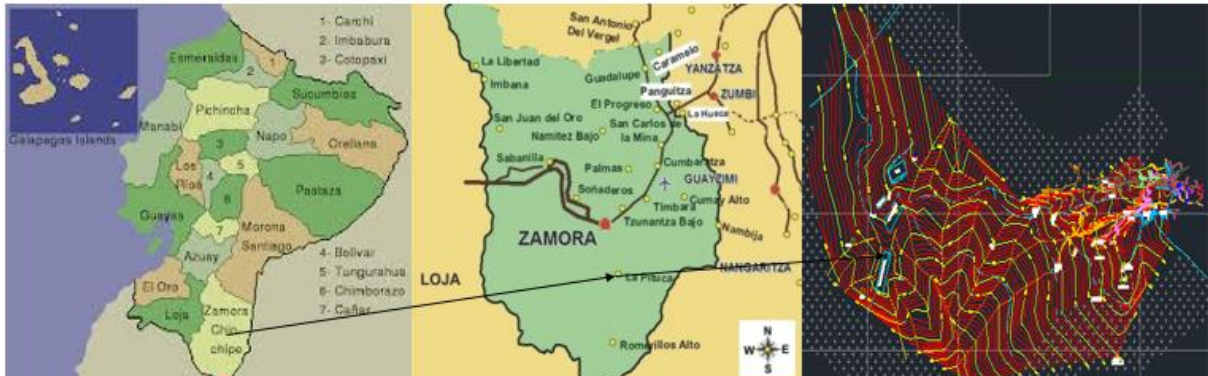


Figura 11. Ubicación del área de estudio.  
Fuente: (Robles Campoverde, 2016)

El sector minero “PITUCA II” COD 500648, se encuentra ubicado en la región amazónica al suroeste de Ecuador, en el barrio Marcos Alto, en la parroquia Timbara, en el cantón Zamora, provincia Zamora Chinchipe con coordenadas (x: 734000 y: 9545000), Datum: PSAD 56. Su superficie es de 50 hectáreas.

A estos sectores también se los conocen como concesiones, las cuales no sólo se dedican a la extracción de minerales metálicos y no metálicos sino también materiales pétreos para la construcción (SNI, 2015).

En la parroquia Timbara, en la cual se encuentra la zona de estudio, el grupo étnico que predomina el lugar es el mestizo. En esta parroquia se encuentra asentado el pueblo Saraguro en los barrios Numbami, La Pituca, Sakantza, Jambue Alto, y se caracteriza por tener actividades económicas que en su mayoría son de producción agropecuarias. (SNI, 2015)

### 2.4. Clima y Vegetación

Según datos del Ministerio del Medio Ambiente, y de acuerdo a los mapas de Isotermas e Isoyetas del INAMHI (2013) la zona goza de una temperatura promedio entre los 16°C y 18°C, lo que quiere decir que la zona tiene un clima templado con pequeñas variaciones a lo largo de todo el año. Los meses más lluviosos son febrero y julio, en donde la precipitación esta alrededor de los 2500 mm a 3500 mm. El sector consta de dos tipos de vegetación: bosque de neblina montano y matorral húmedo montano bajo (Robles Campoverde, 2016).

**CAPÍTULO III**  
**MATERIALES Y METODOLOGÍA**

### 3.1. Materiales

A continuación se describen cada uno de los materiales y equipos que se utilizaron a lo largo del proceso de experimentación.

#### 3.1.1. Relave de Mina de Oro

Como se mencionó con anterioridad, considerando la extensa cantidad de residuos de la explotación minera en la provincia de Zamora Chinchipe y por las características presentadas por el material, se optó por utilizar relave de mina. Este fue tomado del sector minero llamado “La Pituca II” Zamora, ubicada al suroeste del Ecuador en la Provincia de Zamora Chinchipe. El material se encuentra ubicado en escombreras y su traslado se lo realizó mediante acémilas ya que el acceso a la zona no es posible con vehículos.

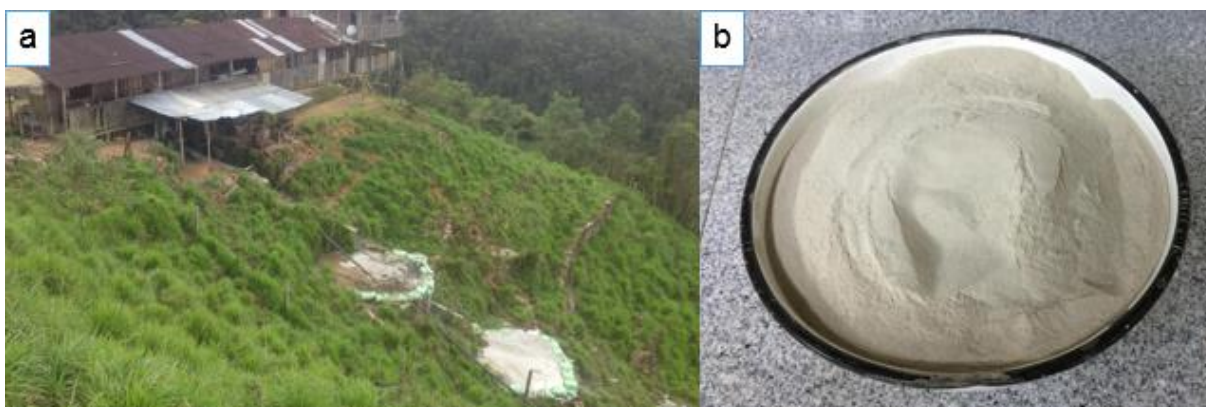


Figura 12 a) Depósitos de relaves. b) Relave de mina  
Elaborado por: El autor

#### 3.1.2. Hidróxido de Sodio

Para la preparación de la solución alcalina se utilizó Hidróxido de sodio, este favorece al proceso de ataque alcalino y con ello la geopolimerización. El hidróxido de sodio es un sólido blanco e industrialmente se utiliza al 50% por su facilidad de manejo. Es soluble en agua, desprendiendo calor, absorbe humedad y dióxido de carbono del aire además es corrosivo con metales y tejidos.

Sus características se resumen a continuación.

Tabla 1 Características físicas del NaOH  
**Hidróxido de Sodio**

|                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| <b>Nombre Químico</b>      | NaOH                  |
| <b>Masa Molar</b>          | 39.99713 g/mol        |
| <b>Densidad</b>            | 2.1 g/cm <sup>3</sup> |
| <b>Apariencia</b>          | Sólido - Blanco       |
| <b>Punto de Ebullición</b> | 1390 °C               |

Fuente: Universidad Pontificia Bolivariana, (1998)  
Elaborado por: El autor

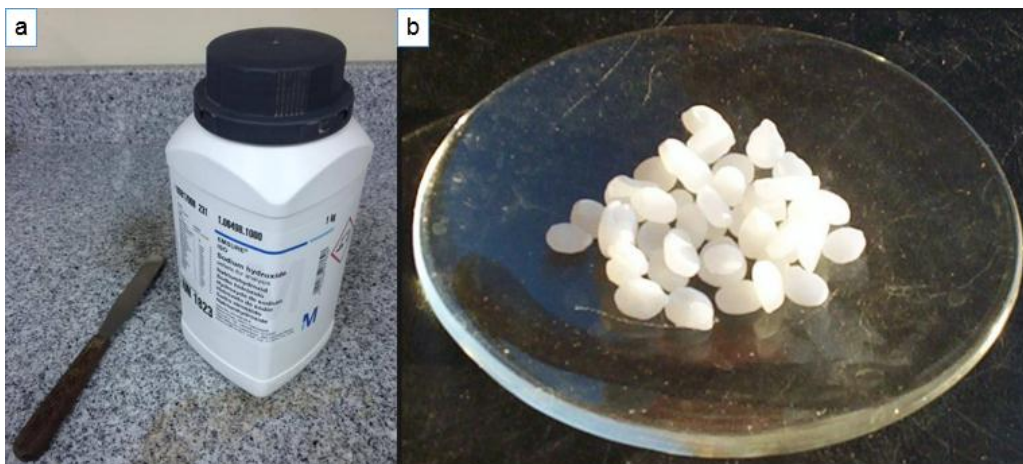


Figura 13. a) Hidróxido de sodio. b) Pellets de NaOH  
Fuente: El autor

### 3.1.3. Molde de acero

Debido a que se va a utilizar solución alcalina basada en hidróxido de sodio, se trabajó con un molde de acero. Moldes de madera quedaron descartados por el hecho de que la madera absorbería parte de la solución, eliminando el grado de reactividad de la misma sobre la muestra de suelo.

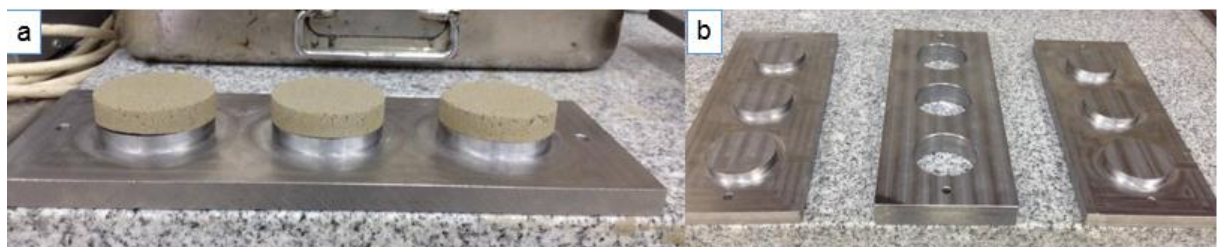


Figura 14. a) Placa con un modelo de discos a elaborar. b) Distintas placas del molde de acero.  
Elaborado por: El autor.



### **3.1.4. Materiales de laboratorio**

Los diferentes materiales utilizados fueron los siguientes:

- Guantes de goma
- Recipientes varios
- Agua destilada
- Espátula
- Estufa
- Probetas de 1000 ml
- Vasos de precipitación
- Hielo
- Mascarillas
- Lentes protectores
- Recipientes de 1000 ml para solución.

### **3.2. Metodología**

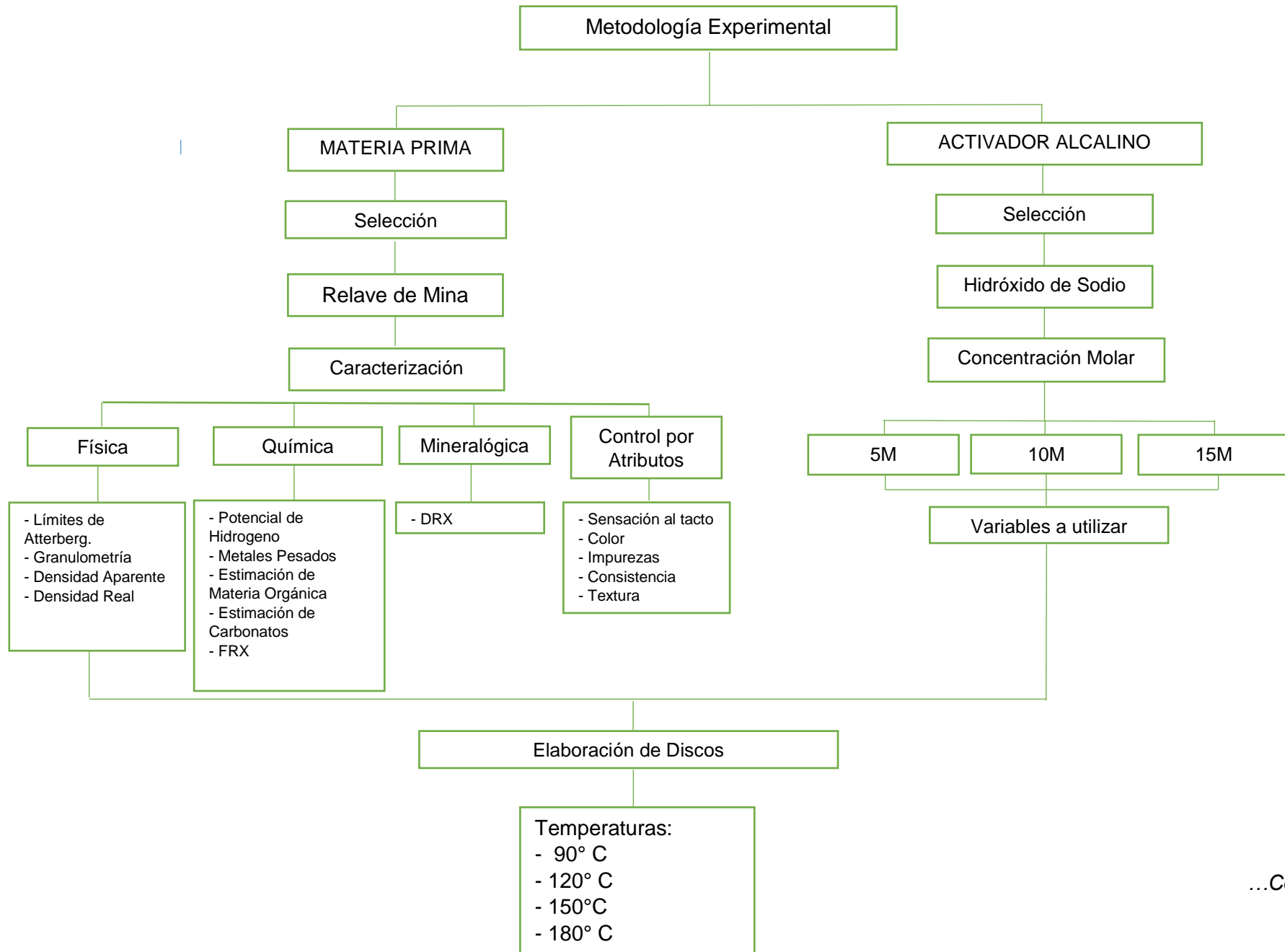
La metodología que se utilizó para llevar a cabo la investigación fue de carácter experimental. De acuerdo a esto, se realizó diferentes etapas a lo largo de la investigación. La primera etapa fue la caracterización de la materia prima, la cual constó de un estudio físico, químico y mineralógico, además de una caracterización por atributos. Esta caracterización ayuda a conocer las propiedades físicas, químicas y mineralógicas del material con la finalidad de conocer su comportamiento durante el proceso de geopolimerización. Cada uno de los ensayos realizados a la muestra se encuentran descritos en las siguientes páginas con profundidad.

Luego de esto se escogió la solución de hidróxido de sodio por ser una solución altamente alcalina y con características idóneas para reaccionar con la materia prima. Para la obtención de la solución se seleccionó tres concentraciones alcalinas en base a su molaridad con el fin de estudiar su efecto en el proceso químico. Las concentraciones alcalinas que se elaboraron fueron de 5M, 10M, y 15M donde M significa Molar. Otro de los factores que se estudió fue la temperatura. De acuerdo a esto se consideró utilizar cuatro para evaluar su efecto: 90 °C, 120 °C, 150°C, 180°C. De todas estas temperaturas analizadas se obtuvo la temperatura óptima que en capítulos posteriores se indican. Por último también se estudió la influencia que tiene sobre el proceso el aumentar la cantidad de solución, para lo cual se estimó tres valores que son 22%, 24% y 26%.

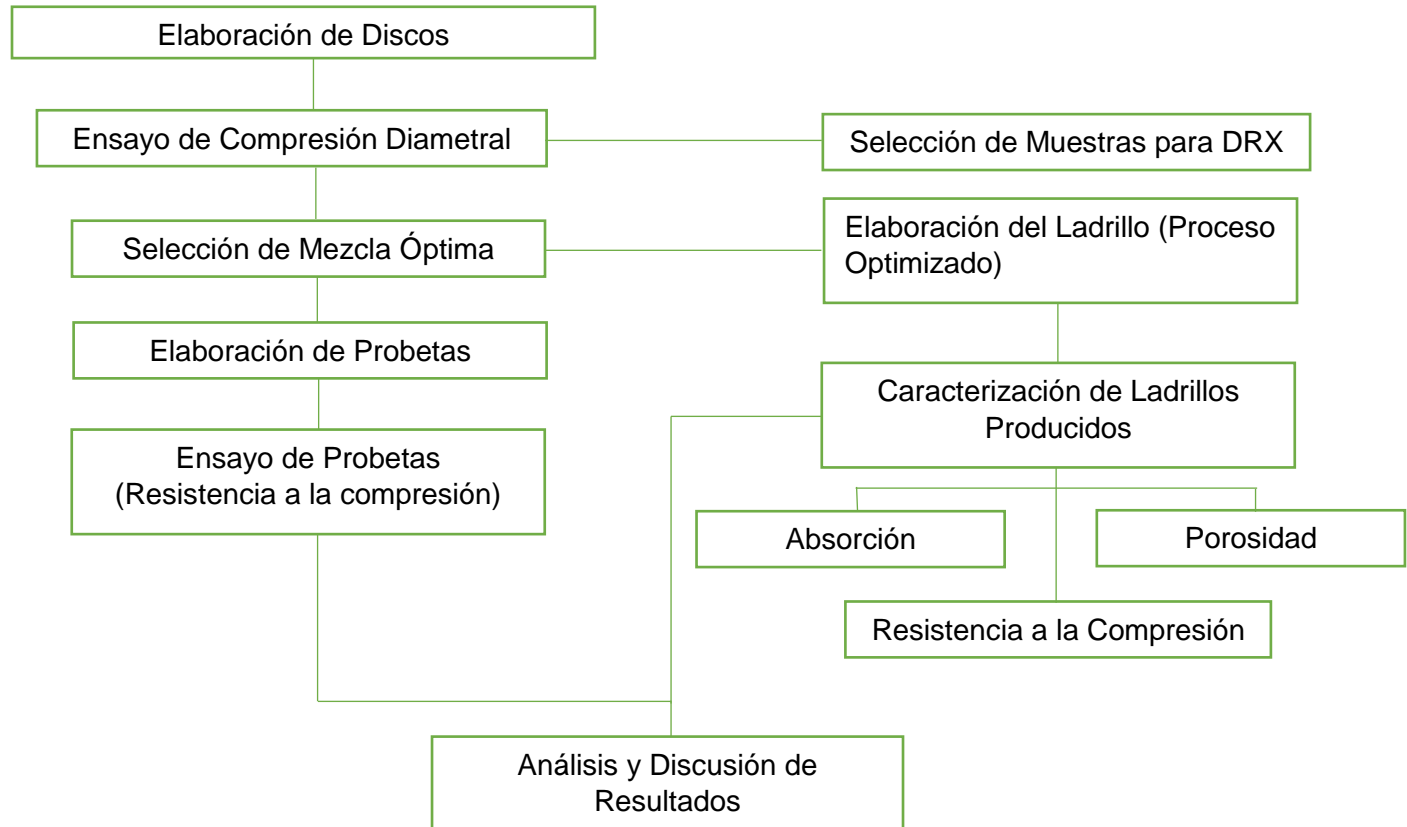
Una vez seleccionadas las variables de proceso a analizar y sus respectivos valores, se procedió a la elaboración de discos mediante la combinación de las variables antes mencionadas. Los discos tuvieron un diámetro "D" igual a 5 cm y un espesor igual a 1 cm. El objetivo principal de la fabricación de estos discos fue para la obtención de la carga máxima que puede soportar la mezcla antes de fallar mediante el ensayo de compresión diametral Brazilian Test y luego la determinación de un factor de optimización FO que sirvió para escoger la mezcla óptima de las variables. Esto se describe a detalle en las páginas siguientes. Cabe mencionar que el ensayo de compresión diametral no guarda ninguna relación con el ensayo de compresión simple a la que luego fue sometido el producto final elaborado, sin embargo este nos dirige de alguna manera a la selección de las variables óptimas del proceso, evitando el utilizar grandes cantidades de materia prima y ahorrando tiempo en la elaboración ladrillos de tamaño normal.

Luego de la selección de la mezcla óptima la cual se analiza de mejor manera en el capítulo IV, se elaboró ladrillos, se estudió sus propiedades físicas (porosidad, absorción) y luego su comportamiento mecánico mediante el ensayo de compresión simple.

En el siguiente diagrama se muestra la metodología experimental adoptada para la investigación.



...Continua



### 3.2.1. Caracterización de la Materia Prima

Para la caracterización de la materia prima se realizó varios ensayos tanto físicos, químicos y mineralógicos con la finalidad de evaluar las características físicas del mismo. Los ensayos realizados fueron: Ensayos por atributos (color, impurezas, sensación al tacto, consistencia) Ensayos Físicos (granulometría, límites de Atterberg, densidad real y aparente) Ensayos Químicos (Potencial de Hidrógeno pH, Estimación de Carbonatos, Estimación de Materia Orgánica, Superficie Específica, Determinación de Metales Pesados, Fluorescencia de Rayos X) y Ensayos Mineralógicos (Difracción de rayos DRX).

En los ítems a continuación se detalla el procedimiento realizado en cada uno de los ensayos mencionados anteriormente.

#### 3.2.1.1. Ensayos por Atributos – Físicos

Los ensayos físicos mecánicos consistieron en una caracterización visual y física del material que se trabajó. Estos ensayos también son conocidos como ensayos por atributos.

##### 3.2.1.1.1. Color

Para esta caracterización se utilizó el sistema de notación MUNSSELL, determinando así atributos cromáticos en estado húmedo.

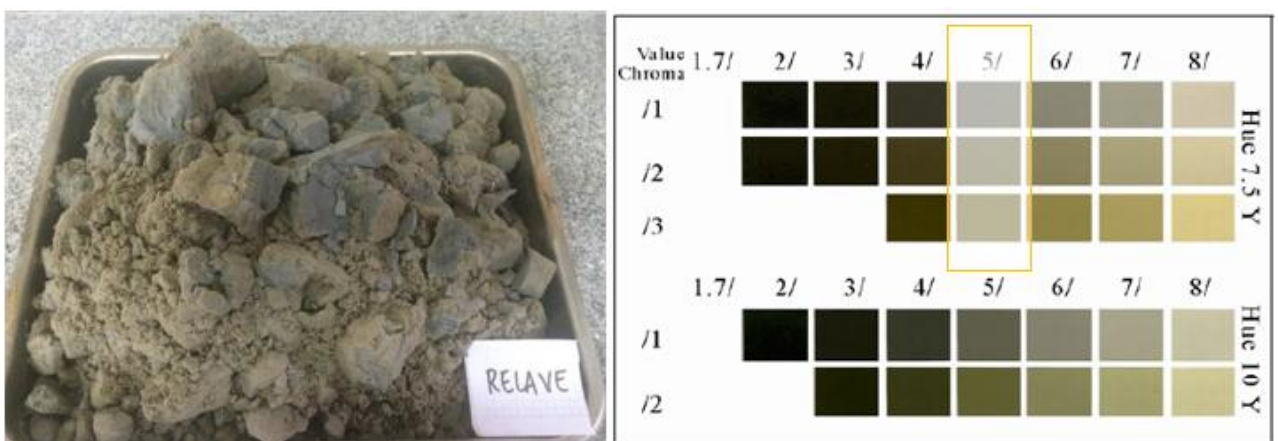


Figura 15. a) Relave de mina b) Sistema de notación MUNSSELL  
Fuente: Munsell Color (1990). Munsell Soil Color Chart. Baltimore  
Elaborado por: El autor

### 3.2.1.1.2. Sensación al Tacto

Este ensayo consistió en conocer la cantidad de retención y almacenamiento de líquido de un suelo, relacionando el tamaño de las partículas. El ensayo consiste en tomar una cantidad de muestra en la mano de manera que se pueda manejar, agregar agua, mezclar y amasar. Luego de estos se forma rollos circulares de 1 a 3 cm de diámetro realizar con este un círculo. De acuerdo al tipo de falla que presente se clasifica el tipo de suelo.



Figura 16. Ensayo de Sensación al tacto.  
Elaborado por: El autor

Tabla 2. Caracterización del material (Sensación al tacto)

| Tipo de Suelo | Cinta               |
|---------------|---------------------|
| Arena         | No forma cinta      |
| Limo          | Casi no forma cinta |
| Arcilla       | Forma cinta         |

Fuente: Uribe S., (2014) Mejores prácticas del control tecnológico de materias primas.  
Elaborado por: El autor

### 3.2.1.1.3. Consistencia

La consistencia se define como las manifestaciones de las fuerzas físicas de cohesión y adhesión que actúan dentro de las arcillas o cualquier otro tipo de suelo, dependiendo de los contenidos de humedad que posean. Estas incluyen el comportamiento del material frente a la presión y a la tendencia que tiene la masa a la adhesión a cuerpos extraños.

El ensayo se realizó tomando un pedazo de muestra y realizando una leve presión sobre ella.



Figura 17. a) Relave de mina b) Tabla para estimación de la consistencia de un suelo  
Fuente: Uribe S., (2014)

#### 3.2.1.1.4. Impurezas

Este ensayo permitió evaluar la homogeneidad de la muestra en cuanto a su constitución y evidenciar la presencia significativa de materias inertes ajenas a la naturaleza mineralógica del material en estudio.



Figura 18. Presencia de Impurezas  
Elaborado por: El autor

#### 3.2.1.1.5. Granulometría

La granulometría del material se realizó en base al ensayo por el Método del Hidrómetro o también conocido como análisis por sedimentación. Este ensayo ayudó a definir la distribución granulométrica de una muestra que es demasiado fina para ser ensayada por medio de tamices. El ensayo se basa en la ley de Stokes (1891) donde el tamaño del grano se lo calcula a partir de la distancia de sedimentación de la partícula de suelo. El porcentaje que pasa es determinado por la medición del peso unitario de una suspensión suelo fluido.

Para la realización del ensayo se basó en la norma Estandar Test for Particle-Size Analysis of Soils código D422 “Análisis Granulométrico por medio del Hidrómetro”. El equipo que se utilizó fue un hidrómetro 151H, un cilindro de sedimentación o probeta de 1000 ml, una balanza, termómetro, agitador, recipientes, agente dispersante.

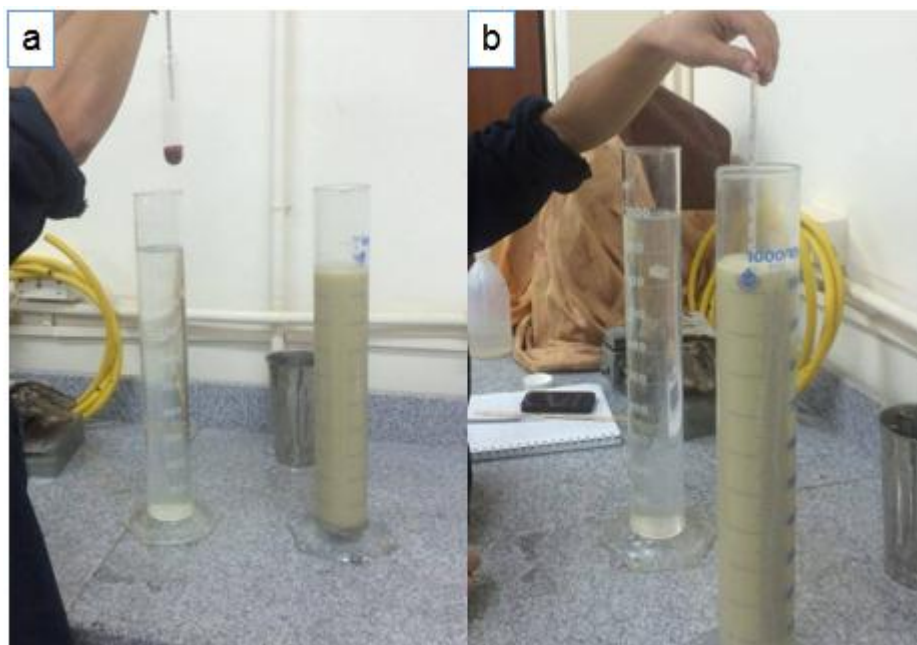


Figura 19. a) Colocación del hidrómetro a la suspensión de suelo b) Estabilización del hidrómetro previo a la lectura.  
Fuente: El autor.

### **3.2.1.1.6. Límite Líquido y Limite Plástico**

Para la estimación del límite plástico de la muestra en estudio se utilizó la norma ASTM D4318 y AASHTO T90 y para el límite líquido las normas ASTM D 4318 y AASHTO T 89.

Se denomina límite plástico (LP) a la humedad más baja con la que pueden formarse barritas de suelo de unos 3.2 mm (1/8”) de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa (vidrio esmerilado) sin que dichas barritas se desmoronen

El límite líquido (LL) de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado al horno, cuando este se halla en el límite entre el estado plástico y estado líquido. Este se determina por medio de la copa de Casagrande (Designación de prueba D-4318 de la ASTM).

Para la ejecución del ensayo de límite líquido y límite plástico se utilizó una espátula de hoja flexible, un recipiente para almacenamiento, una balanza con precisión de 0.01g, un horno o estufa, tamiz de 0.0426 mm (N°40), agua destilada, un vidrio grueso esmerilado.



La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo se define como el índice de plasticidad IP.



Figura 20. a) Materiales para ensayo de límite líquido b) Ensayo de límite líquido  
Elaborado por: El autor



Figura 21. Ensayo de límite plástico Norma ASTM D 4318  
Elaborado por: El autor

### **3.2.1.1.7. Densidad Aparente**

La densidad aparente de un suelo es la relación entre el volumen y peso seco, incluyendo huecos y poros que contenga, aparentes o no. Esta es un bien indicador de características importantes de un suelo tales como porosidad, grado de aireación y capacidad de drenaje. Cuando los valores de densidad son bajos esto quiere decir que los suelos son porosos bien aireados y con un buen drenaje.



Figura 22. Determinación de la densidad aparente.  
Elaborado por: El autor

### **3.2.1.1.8. Densidad Real**

El cálculo de la densidad se realizó en base a la metodología utilizada para la determinación de la densidad del cemento hidráulico. A falta de una normativa que indique el procedimiento para calcular la densidad en este tipo de suelos se vio factible el ajustar el procedimiento de la norma antes mencionada para poseer una idea de este parámetro, que será necesario para posteriores cálculos.

La normativa utilizada para este ensayo fue Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 156:2009 Cemento Hidráulico. Determinación de la Densidad.

Para esto se utilizó un frasco de LeChatelier como lo sugiere la norma que se manejó, un recipiente con una muestra representativa de 50 g, gasolina y una espátula.



Figura 23. a) Materiales para ensayo de Densidad Real  
Elaborado por: El autor.

### 3.2.1.2. Ensayos Químicos

#### 3.2.1.2.1. Estimación de la Materia Orgánica

Para la ejecución de dicho ensayo se utilizó una solución de peróxido de sodio  $H_2O_2$  AL 30%. Con este método se analiza en las muestras la presencia de materia orgánica. Para la estimación se observó el nivel de reacción de la muestra cuando es atacada por la solución antes mencionada.



Figura 24. a) Materiales para ensayo de Eliminación de materia orgánica b) Ensayo de Eliminación de materia orgánica  
Elaborado por: El autor

Tabla 3 Estimación de la efervescencia de la materia con peróxido. Control por atributos

| Efervescencia | Descripción   |
|---------------|---|
| Ninguna       | Si no se observa ninguna reacción   |
| Ligera        | Si se observa una reacción ligeramente efervescente                                     |
| Fuerte        | Si hay una fuerte reacción  |
| Muy fuerte    | Si hay una reacción que demande la utilización de equipos de extinción o anti-incendios |

Fuente: Uribe S., (2014). Control por atributos  
Elaborado por: El autor.

### 3.2.1.2.2. Estimación de Carbonatos

Este ensayo permitió evaluar la liberación de carbonatos en las muestras analizadas. Para su estimación se utilizó una solución de ácido clorhídrico al 10%. Así mismo se observó el nivel de reacción del suelo en estudio a la solución de ácido clorhídrico y la efervescencia producto de esta reacción.

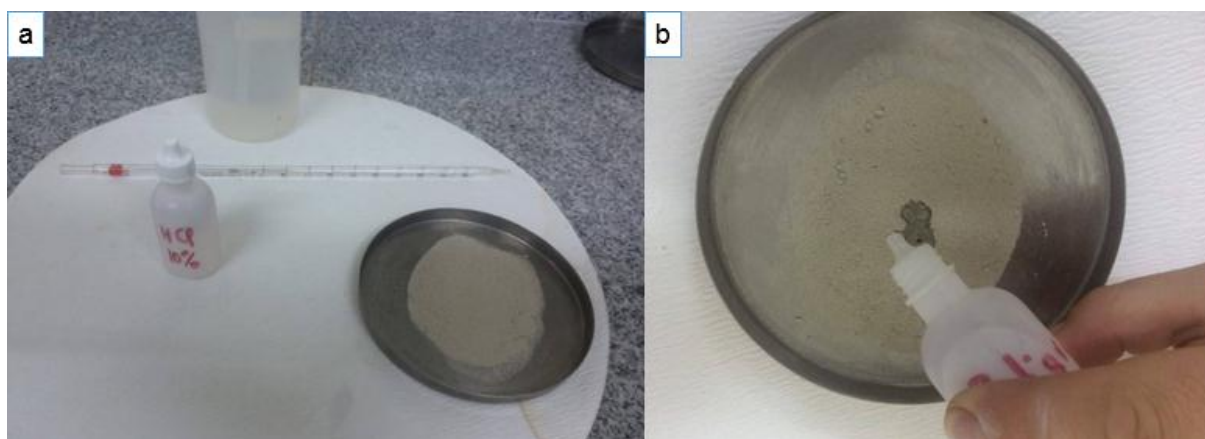


Figura 25. a) Materiales para ensayo de Eliminación de Carbonatos. b) Ensayo de Eliminación de carbonatos

Elaborado por: El autor

### **3.2.1.2.3. Estimación de Potencia de Hidrógeno (pH)**

Este ensayo se lo realizó con la finalidad de conocer el nivel de alcalinidad o de acidez de un suelo. Para esto se utilizó la norma ASTM D-4972.

El procedimiento es el siguiente: se calibró el equipo de medición de alcalinidad de acuerdo a las indicaciones del manual de operación. Se limpió la superficie del electrodo con agua destilada y se sumergió en la muestra disuelta en agua previamente preparada. Se mantuvo fijo el electrodo hasta que se registró una primera lectura del pH. Se realizó el ensayo tres veces para confirmar resultados.



Figura 26. Equipo para determinación del pH de un suelo.  
Elaborado por: El autor

### **3.2.1.2.4. Determinación de la Superficie Específica**

Este ensayo se lo realizó con el objetivo de conocer la superficie específica del material de acuerdo al ensayo de azul de metileno. En este ensayo se puede determinar la cantidad de azul de metileno que es absorbido por la muestra en análisis.

Para esto se preparó primeramente una cantidad determinada de solución de azul de metileno con una relación de 1g de polvo por cada 200 ml de agua destilada. La muestra a analizar se la mezcló con agua destilada (10g en 30 ml de agua). Una vez preparada se fue agregando solución a la suspensión en incrementos de 0.5 ml, para luego ser mezclada durante un minuto para dar tiempo al catión azul de metileno ser absorbido. Luego de esto se tomó con una

pipeta una cierta cantidad de la “suspensión + solución azul de metileno” y se colocó una gota sobre papel filtro. El ensayo terminó cuando se formó alrededor de la gota un halo azul claro, el cual indica la saturación de la superficie específica del material en estudio. Luego de esto se registró el valor de números de incrementos “N” de azul de metileno y se procedió a los cálculos.

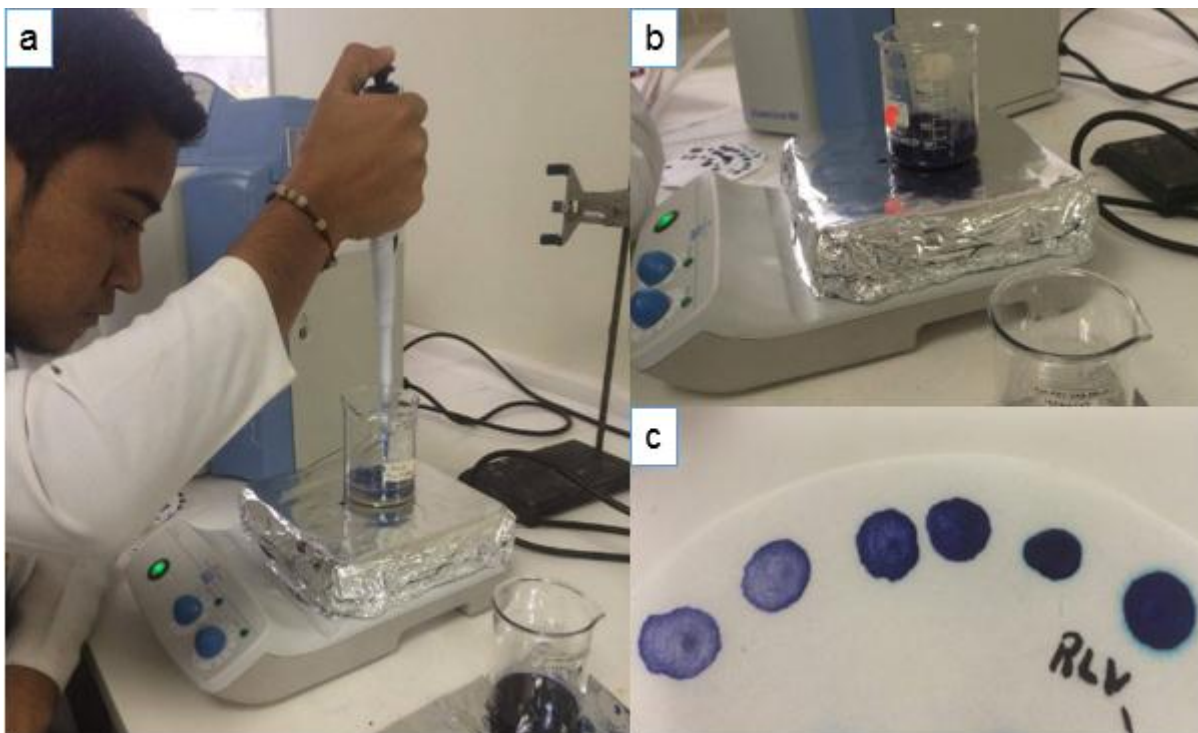


Figura 27. a) Colocación de la solución a la suspensión de suelo b) Mezcla de solución de azul de metileno con suspensión de suelo c) Gotas de azul de metileno en papel filtro.  
Elaborado por: El autor

### **3.2.1.2.5. Determinación de Metales Pesados**

Debido a que la materia prima es producto de un proceso de extracción de minerales, y dicho proceso por lo general está ligado al uso de sustancias que contaminan el suelo previo a la extracción de tales minerales, es conveniente verificar el grado de contaminación del suelo que se pretende utilizar en dicha investigación. Para esto se hizo un seguimiento del proceso por el que pasa el material antes de convertirse en residuo minero.

El proceso de extracción de minerales utilizado comúnmente en la planta consta de tres etapas: la primera etapa consta de la trituration del material hasta un tamaño menor a 3 pulgadas, luego pasa a la etapa de molienda donde el material es triturado a un tamaño mucho más pequeño que el mencionado anteriormente. La etapa final llamada “concentración

gravimétrica” es donde separan los minerales con densidades diferentes utilizando la fuerza de la gravedad.

El proceso en sí demuestra que el material no es contaminado con ninguna sustancia que pueda ser peligrosa, por lo que un análisis de determinación de metales pesados no sería necesario.

De acuerdo a esto se decidió utilizar el material como fuente para el desarrollo de la experimentación considerando que es una materia prima “sana” libre de elementos perjudiciales para la salud.

### **3.2.1.2.6. Fluorescencia de Rayos X (FRX)**

Para la determinación de las características, tanto químicas como mineralógicas, se utilizó los ensayos de fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX). La difracción de rayos X ayudó a conocer los minerales que contienen la muestra a trabajar y la fluorescencia de rayos X a cuantificar los porcentajes de los elementos que componen a la misma.

Como se mencionó anteriormente la fluorescencia de rayos X (FRX) nos ayuda a cuantificar el porcentaje de compuestos químicos que contienen una muestra. Para realizar dicho ensayo se utilizó cerca de 10 g de muestra la cual se la colocó en un recipiente pequeño tipo “tapa de botella”. Luego de esto se pasó a ingresar en el equipo que realiza el ensayo. El análisis no dura más de 2 minutos y los resultados son entregados inmediatamente.



Figura 28. a) Preparación del equipo para FRX b) Análisis de muestra  
Elaborado por: El autor

### 3.2.1.2.7. Difracción de Rayos X (DRX)

Para el análisis de difracción de rayos X en la presente investigación se limitó a la búsqueda de los minerales correspondientes a la muestra, debido a que su estudio a profundidad es extenso. Este ensayo da como resultado un espectro llamado difractograma el cual ayudó a conocer los minerales que contiene. Esta se preparó en los laboratorios de Química de la UTPL, lugar donde se encuentra el equipo para DRX. La muestra fue ubicada en muestreadores en forma de discos que se colocaban en la bandeja del equipo para su respectivo análisis durante aproximadamente 40 minutos. La cantidad de muestra fue alrededor de unos 10 a 30 g.

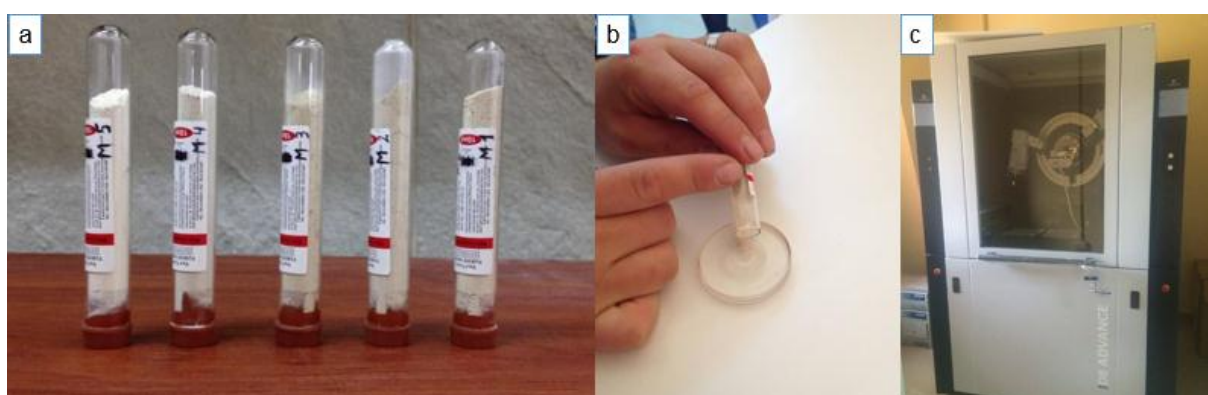


Figura 29. a) Muestras para DRX b) Preparación de muestras c) Equipo para Difracción de Rayos X  
Elaborado por: El autor

### 3.2.2. Preparación del Activador Alcalino

De acuerdo a la investigación de (Robayo Nuñez, 2013) los activadores alcalinos pueden ser compuestos como hidróxidos, sales de ácido débil y sales silícicas. Se escogió hidróxido de sodio. Para la elaboración de la solución alcalina se utilizó una mezcla entre hidróxido de sodio y agua destilada. Debido a que se manejó diferentes concentraciones molares se necesitó realizar varias soluciones. Cada una tuvo concentraciones molares de 5M, 10M y 15M.

Se calculó los gramos de hidróxido de sodio para los ml de solución y la concentración molar requerida. La cantidad de solución fue calculada en base a los porcentajes de contenido de agua y la masa a utilizar de materia prima.

A continuación se muestra un cálculo sencillo de los gramos necesarios de hidróxido de sodio para preparar la solución.



$$NaOH = 250mlsoluciónNaOH * \frac{1l}{1000ml} * \frac{5moldeNaOH}{1solución} * \frac{40gNaOH}{1molNaOH}$$

$$NaOH = 50g$$

La solución alcalina se elaboró en un vaso de precipitación de 1000 ml, un agitador de vidrio, hielo para baño María, con el fin de evitar que el vaso de precipitación se estropee ya que el hidróxido de sodio al entrar en contacto con el agua destilada desprende calor.

La solución se dejó reposar por el lapso de 10 horas antes de ser utilizada. En la figura 31 se puede observar la elaboración de la solución de acuerdo a los pasos sugeridos.

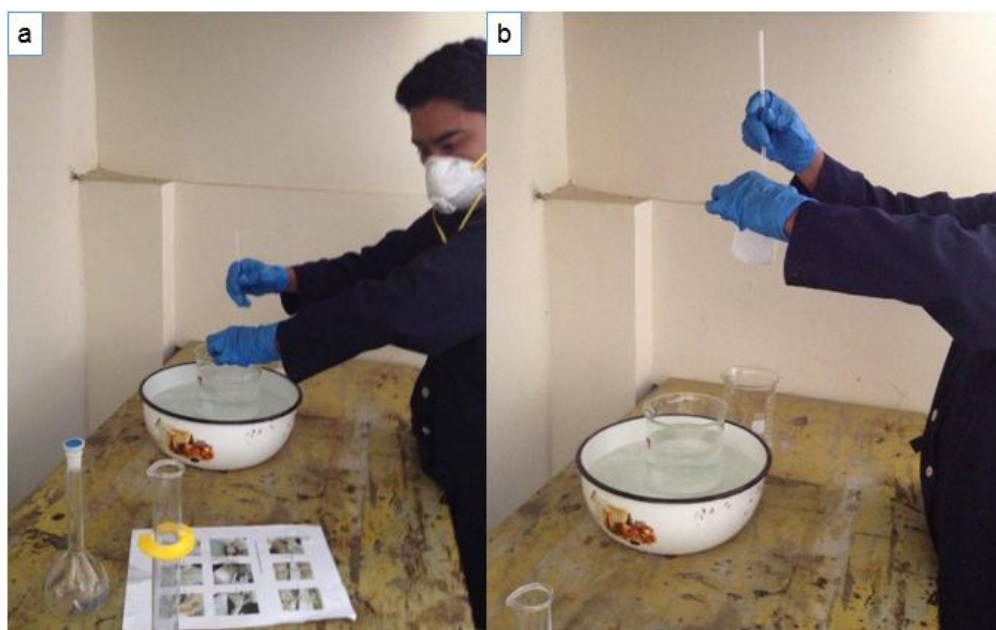


Figura 30. a) Elaboración de solución alcalina b) Solución siendo agitada.  
Elaborado por: El autor

### 3.2.3. Elaboración de discos de prueba

Para la elaboración de discos de prueba, se realizó la mezcla entre la solución de hidróxido de sodio y la materia prima. La mezcla se preparó en un recipiente, primero vertiendo los milímetros de solución a utilizar, y de a poco se fue añadiendo la materia prima, de manera que todas las partículas queden cubiertas de la solución y se genere una pasta homogénea, la cual se dejó reposar por el lapso de 6 a 8 horas en fundas herméticas para que la concentración de la solución active químicamente la fuente de aluminosilicatos. La materia prima utilizada tuvo una granulometría menor a la abertura del tamiz 40 (0.425 mm). En otras investigaciones han tomado partículas menores a este tamiz pero en esta investigación se

limitó a trabajar con ese tamaño. La mezcla fue llevada al molde de acero para la formación de discos. Estos discos elaborados tuvieron un diámetro de 5 cm y un espesor de 1 cm.



Figura 31. a) Formación de la pasta b) Mezcla llevada a fundas herméticas.  
Elaborado por: El autor

En la figura 32 se puede observar la elaboración de la pasta y su posterior colocación en fundas para su activación química.

### **3.2.3.1. Selección de variables de proceso**

Las variables de proceso que se utilizaron en la experimentación fueron en función de los componentes (contenido de solución y concentración) y las condiciones de exposición (temperatura). Estas fueron cuatro: Contenido de solución, presión de moldeado<sup>2</sup> temperatura de curado y concentración molar. Estas variables se tomaron para luego analizar el grado de influencia en las estructuras formadas debido a la acción del proceso de geopolimerización. La presión de moldeado se incluye en las variables pero fue la única que no varió su valor.

#### **3.2.3.1.1. Concentración molar, temperatura de curado, contenido de solución**

Con el propósito de conocer la cantidad de materia prima necesaria para la elaboración de discos a utilizar en el desarrollo de la presente investigación y los mililitros de contenido de solución a utilizar, se analizaron distintas combinaciones con cada una de las variables. Se crearon tres discos de cada combinación (Tabla 4) con la finalidad de realizar una media de las propiedades resultantes de cada uno en próximos ensayos.

---

<sup>2</sup> Cabe recalcar que con presión de moldeado se hace referencia a la compactación que se dio a los discos antes de ser retirados del molde.

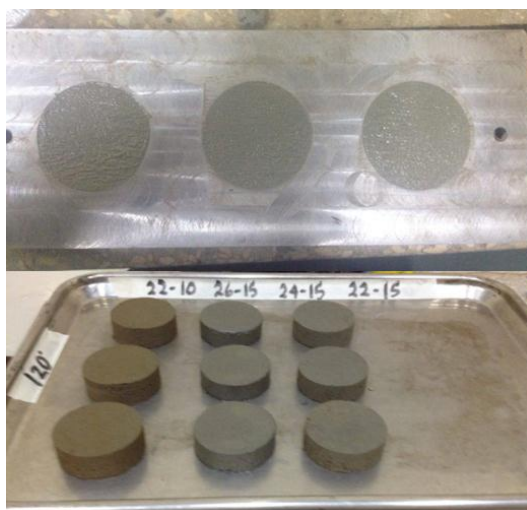


Figura 32. a) Discos de prueba en molde. b) Discos de prueba retirados de molde  
Elaborado por: El autor

Los discos se ingresaron a la estufa para su correspondiente secado. Estos fueron expuestos a diferentes temperaturas por 7 días. A continuación se muestran las diferentes combinaciones realizadas con las variables utilizadas. En total se realizaron 108 discos de prueba.

Tabla 4. Diferentes combinaciones en función de las variables utilizadas

| Contenido de Solución | Concentración Molar |     |     | Temperatura |
|-----------------------|---------------------|-----|-----|-------------|
|                       | 5M                  | 10M | 15M |             |
| 22%                   | ✓                   | ✓   | ✓   | 90° C       |
| 24%                   | ✓                   | ✓   | ✓   |             |
| 26%                   | ✓                   | ✓   | ✓   |             |
| 22%                   | ✓                   | ✓   | ✓   | 120°C       |
| 24%                   | ✓                   | ✓   | ✓   |             |
| 26%                   | ✓                   | ✓   | ✓   |             |
| 22%                   | ✓                   | ✓   | ✓   | 150°C       |
| 24%                   | ✓                   | ✓   | ✓   |             |
| 26%                   | ✓                   | ✓   | ✓   |             |
| 22%                   | ✓                   | ✓   | ✓   | 180°C       |
| 24%                   | ✓                   | ✓   | ✓   |             |
| 26%                   | ✓                   | ✓   | ✓   |             |

Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

Luego de pasar por la estufa con la respectiva temperatura de curado, los discos fueron retirados y puestos al ambiente. Se tomaron medidas, tanto diámetro y espesor de cada disco

elaborado, así como el peso de cada uno de ellos, para respectivos cálculos posteriores. No fue posible tomar dimensiones antes del ingreso a la estufa, debido a que la segunda manipulación de los discos hacía que pierdan su forma.

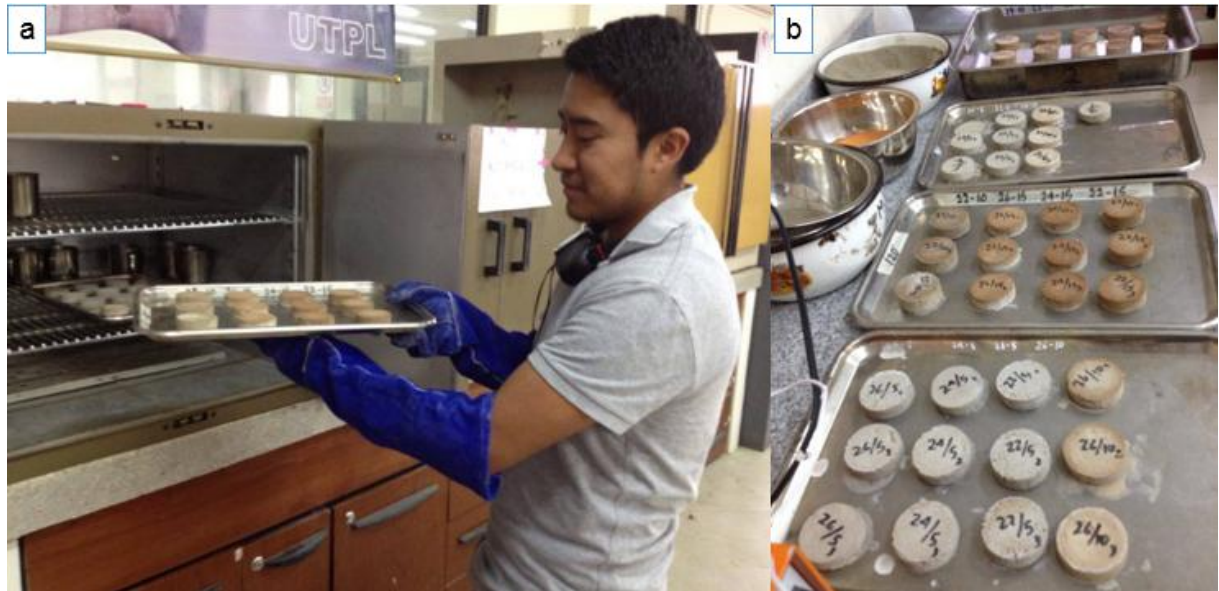


Figura 33. a) Retiro de discos de la estufa b) Discos elaborados.  
Fuente: El autor

Cada bandeja con los discos elaborados se dejó reposar por 12 horas antes de ser ensayados a compresión diametral. Al ser retirados, estos tenían una estructura compacta, sólida y con diferentes tonalidades.



Figura 34. Toma de medidas (espesor y diámetro) de discos  
Elaborado por: El autor

### 3.2.3.1.2. Compresión Diametral de Discos

Para conocer la carga máxima que puede soportar una mezcla antes de fallar, se utilizó el ensayo de compresión diametral más conocido como Ensayo brasileño. Este ensayo es un apoyo para la caracterización mecánica de las piezas producidas y proporciona la resistencia a la compresión diametral siempre que se cumplan proporciones entre el diámetro de la probeta, el ancho de reparto de la carga. Según Rocco, Guinea GV, Planas , & Elices, (2001) este ensayo puede mostrar efecto de escala en el caso de que el material sea dúctil y el diámetro de la probeta sea relativamente pequeño. Además advierte que las condiciones de contorno del ensayo influyen en el resultado. Una manera de saber si este se ha realizado de manera correcta y sus resultados sean validos son mediante los mecanismos de rotura de los discos fabricados. En la figura 36 se muestran las diferentes tonalidades de los discos elaborados en función de las combinaciones realizadas (Tabla 4). Los numeros que se exhiben sobre los discos son de las combinaciones realizadas. Por ejemplo en la figura 36 en el primer disco contando desde la derecha el 26% corresponde al contenido de solución, el 15 es la concentración molar utilizada y el numero al pie es el número del disco a ensayar.



Figura 35. Discos elaborados con combinaciones diferentes  
Elaborado por: El autor

Este ensayo se destaca por ser un método sencillo y representativo. Se acopló una celda de carga de 2000 lb en la máquina de carga directa VERSA TESTER que se encuentra en los laboratorios del Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil (DGMIC). Una vez ubicada la celda de carga se puso en marcha el programa con el cual se haría el control de la carga aplicada y de la deformación que va teniendo lugar por acción de la misma. La velocidad con la que se ensayó cada disco fue de 0.2 mm/s. El proceso del ensayo realizado se puede observar en la figura 37.

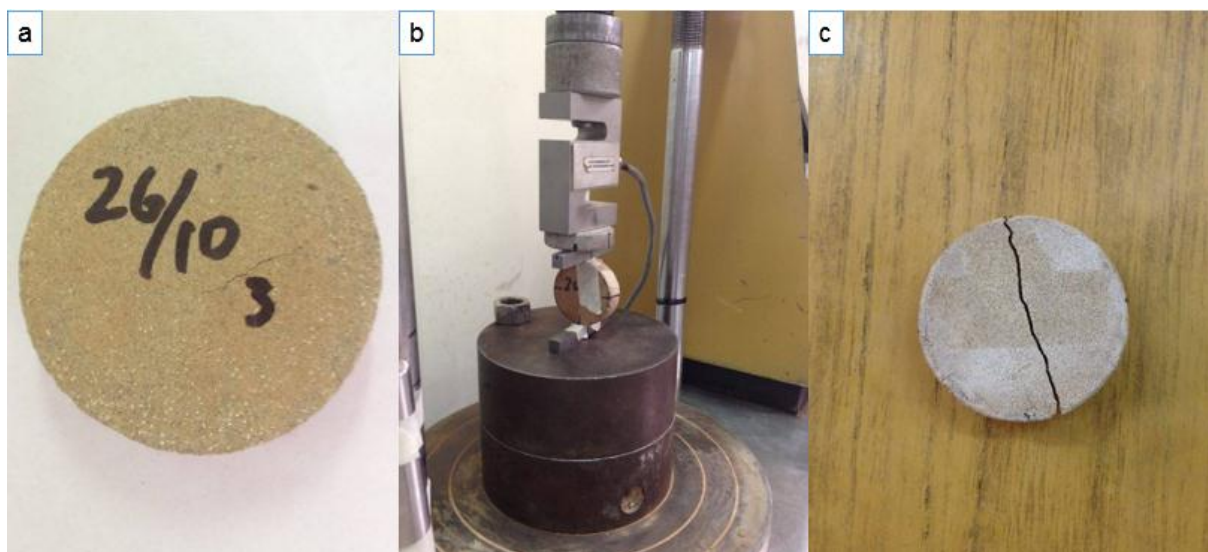


Figura 36. a) Disco a ensayar b) Disco ubicado en la máquina de aplicación de carga c) Mecanismo de rotura presentado luego de ensayo.  
Elaborado por: El autor

De este ensayo se obtuvo la máxima carga soportada por cada una de las mezclas elaboradas. Este resultado ayudó a calcular la esfuerzo a compresión diametral de cada una de las mezclas de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\sigma_{CD} = \frac{2P_{m\acute{a}x}}{\pi de}$$

Donde:

$\sigma_{CD}$ : esfuerzo a compresión diametral

$P_{m\acute{a}x}$ : carga máxima soportada por la mezcla.

d: diámetro del disco

e: espesor del disco.

De acuerdo a los resultados obtenidos con la expresión anterior se calculó factor de optimización FO el cual es la relación existente entre la resistencia a compresión diametral entre la masa del disco. Esto se hizo con la finalidad de conocer la eficiencia de cada mezcla tomando como referencia la investigación de Del Coz, García , Álvarez , & Lozano Martinez-Luengas, (2011).

### 3.2.4. Elaboración de Ladrillos (Variables y Proceso Óptimo)

Se elaboró ladrillos mediante el análisis de las variables escogidas con anterioridad: temperatura (T), contenido de solución (CS) y concentración molar (CM). El análisis se muestra en el capítulo IV donde se estudia y escoge la mezcla óptima en función del valor más alto de factor de optimización FO obtenido a partir de los resultados del ensayo de compresión diametral.

El proceso para la elaboración del ladrillo fue similar al de los discos. Se calculó y midió la cantidad necesaria de solución de hidróxido de sodio y se lo vació en un recipiente. Luego se añadió de manera gradual la materia prima de tal manera que se forme una pasta homogénea y al mismo tiempo se saturan todas las partículas de la materia prima utilizada. La mezcla se la colocó en fundas herméticas con el objetivo que la solución de NaOH surta efecto. En este caso se consideró dejar por más tiempo en reposo la mezcla (14 horas), por la cantidad de relave utilizado.

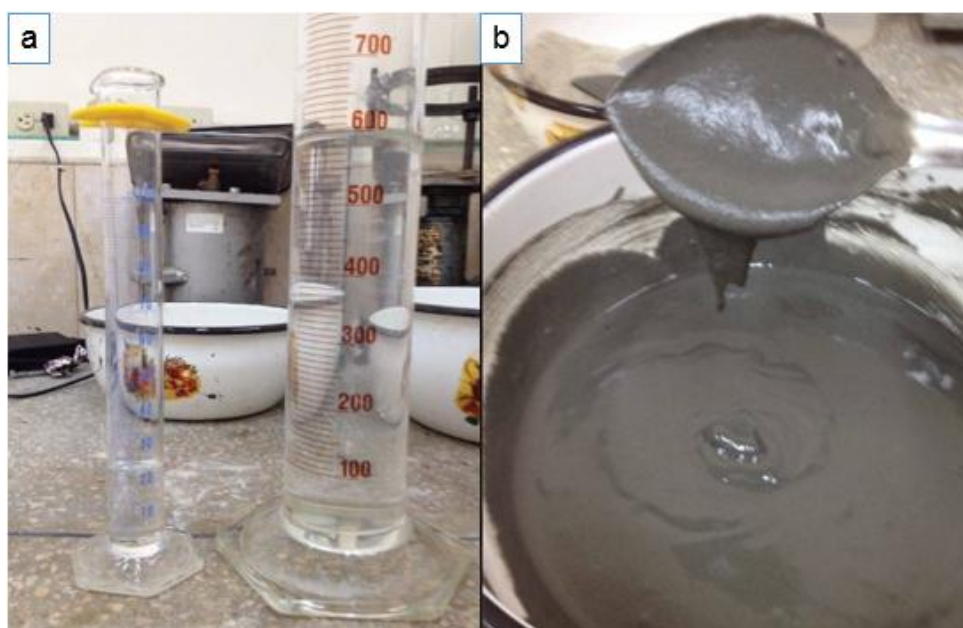


Figura 37. a) ml de solución a utilizar b) Pasta formada por la mezcla de relave y solución.  
Elaborado por: El autor

El molde utilizado para la elaboración del ladrillo fue de madera pero con sus paredes cubiertas de plástico de manera que no absorba parte de la solución de NaOH utilizada. No se realizó un molde de acero como se hizo para los discos ya que su costo era elevado. Se compactó la mezcla por el lapso de 60 minutos. Debido a que para la elaboración de un ladrillo normal mediante este proceso, la cantidad necesaria de solución de NaOH era demasiada y

además por lo complicado de conseguir el reactivo químico se elaboró un ladrillo más pequeño (22x11x7cm). Esto no afecta la evaluación de su comportamiento mecánico ni físico.

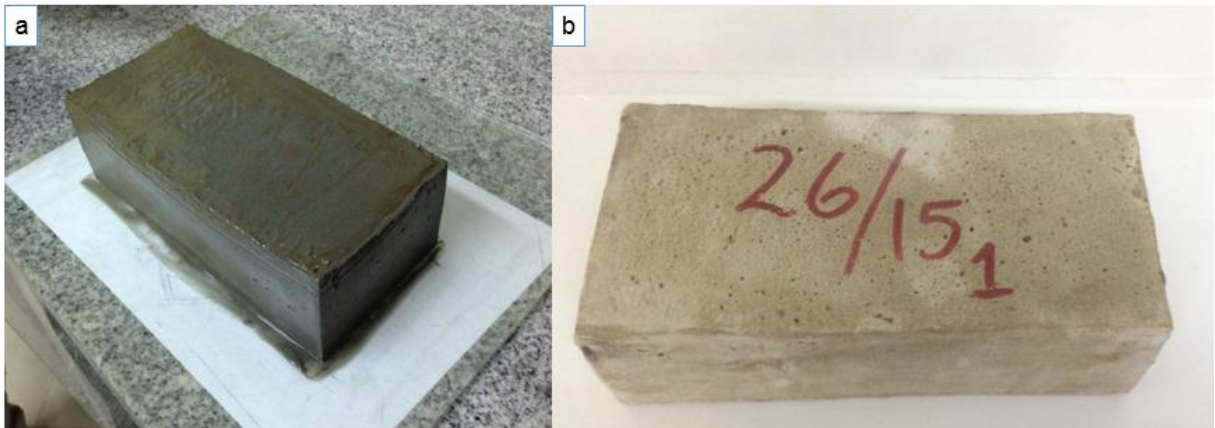


Figura 38. a) Ladrillo antes de entrar a la estufa b) Ladrillo resultante.  
Elaborado por: El autor

### 3.2.5. Elaboración de Probetas y Cubos (Variables y Proceso Óptimo)

Los ladrillos por lo general son ensayados a compresión para cuantificar su comportamiento mecánico, por lo que, para tener una apreciación de su valor se elaboró cilindros con el fin de ser evaluados mediante compresión y asegurar que la mezcla seleccionada sea la correcta.



Figura 39. a) Cilindro elaborado mediante combinación obtenida izq. frente a un cilindro de hormigón normal der. b) Cilindro con mezcla óptima ensayado a compresión simple.  
Elaborado por: El autor



### 3.2.6. Propiedades Físicas de los Ladrillos Producidos

Una vez elaborados los ladrillos, se procedió a la caracterización convencional de los mismos. Esta constó de tres ensayos: absorción, porosidad y resistencia a la compresión. La finalidad de la obtención de estos parámetros fue para conocer las propiedades físicas del ladrillo elaborado luego del proceso de curado, concentración molar y contenido de solución utilizada.

#### 3.2.6.1. Absorción

La capacidad de absorción de agua en ladrillos, está definida como el cociente entre el peso del agua que absorbe y su peso propio cuando se encuentra seco

$$\text{Absorción}(\%) = \frac{P_{\text{sat}} - P_{\text{seco}}}{P_{\text{seco}}} * 100 \quad (1)$$

Donde:

$P_{\text{sat}}$ : Peso saturado (kg)

$P_{\text{seco}}$ : Peso seco (kg)

Para la realización de este ensayo, se tomó medidas del ladrillo antes de ser saturado. Luego de esto se sumergió el ladrillo durante 24 horas. Para conocer si el ladrillo se encontraba totalmente saturado, se realizaron tres lecturas cada cinco minutos luego del día de estar sumergido.

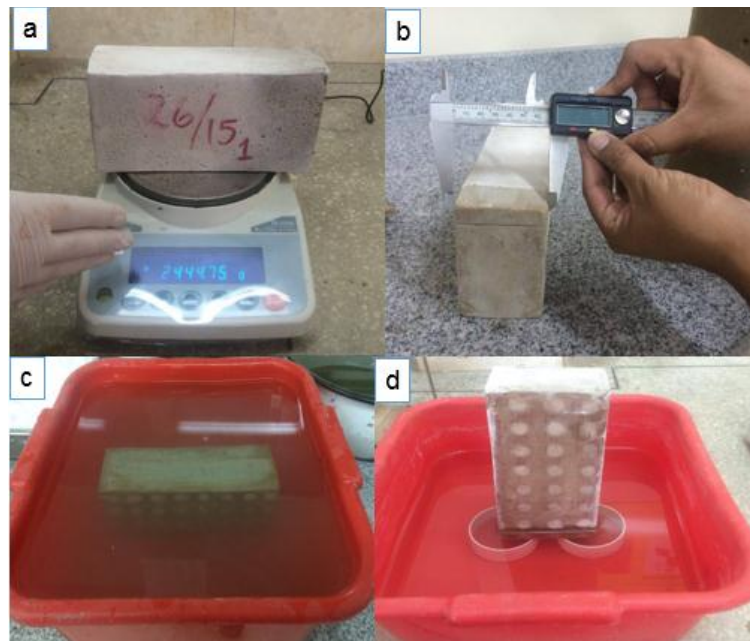


Figura 40. a) Peso de ladrillo b) Toma de medidas c) Ladrillo sumergido d) Absorción de agua.  
Elaborado por: El autor

### **3.2.6.2. Porosidad**

La porosidad de un material, repercute directamente en su resistencia mecánica ya que al aumentar disminuye esta propiedad considerablemente. Esta es desfavorable para la resistencia a la fractura ya que los poros reducen el área de la sección en la cual se aplica la carga.

#### **3.2.6.2.1. Porosidad Abierta**

Para la determinación de la porosidad abierta, se procedió a determinar los pesos seco, saturado y sumergido y se aplicó la siguiente fórmula para su estimación.

$$P_{ab} = \frac{W_{saturado} - W_{seco}}{W_{saturado} - W_{sumergido}} \quad (2)$$

Donde:

$P_{ab}$ : Porosidad abierta (kg)

$W_{saturado}$ : Peso saturado (kg)

$W_{seco}$ : Peso seco (kg)

$W_{sumergido}$ : Peso sumergido (kg)

#### **3.2.6.2.2. Porosidad Cerrada**

La porosidad cerrada es la diferencia entre la porosidad y la porosidad abierta calculada en el ítem anterior.

$$P_{cerrada} = P_{total} - P_{abierta} \quad (3)$$

Donde:

$P_{cerrada}$ : Porosidad cerrada (%)

$P_{total}$ : Porosidad total (%)

$P_{abierta}$ : Porosidad abierta (%)

### 3.2.6.2.3. Porosidad Total

Para el cálculo de la porosidad total se aplicó la siguiente formula:

$$P_{total} = \frac{\rho_{real} - \rho_{aparente}}{\rho_{real}} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

$P_{total}$  (%): Porosidad total en porcentaje

$\rho_{real}$ : densidad real ( $g/cm^3$ )

$\rho_{aparente}$ : densidad aparente ( $g/cm^3$ )

### 3.2.6.3. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se encuentra definida como la carga máxima que soporta un material antes de llegar al límite de fallo o ruptura. Las unidades en la que se expresa son  $kg/cm^2$ . Para la ejecución de este ensayo se tomaron medidas y peso del ladrillo a ensayar. Luego se calibró el equipo de compresión a utilizar de acuerdo a las características físicas (medidas) del elemento. El equipo utilizado de compresión simple fue una ACCU-TEK, la cual nos muestra en su pantalla la carga que se va aplicando en función de la velocidad que se asignó en un comienzo del ensayo. En ladrillo elaborado fue ensayado en la dirección larga, o sea en la cara de mayor superficie.

Se utilizó la norma NTE INEN 0294 por falta de una normativa que indique el ensayo de ladrillos con este tipo de material.



Figura 41. Ensayo de compresión simple de ladrillo  
Elaborado por: El autor.

Una vez conseguida la carga máxima soportada por el ladrillo se utilizó la siguiente fórmula para obtener la resistencia a la compresión simple.

$$\sigma(\text{kg} / \text{cm}^2) = \frac{P}{A} \quad (5)$$

Donde:

$\sigma$ : Esfuerzo máximo a compresión simple (kg/cm<sup>2</sup>).

P: Carga máxima soportada (kg).

A: área de sección (cm<sup>2</sup>).

**CAPÍTULO IV**  
**ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### 4.1. Caracterización de la Materia prima (Ensayos por Atributos, Ensayos Químicos)

De acuerdo a los ensayos realizados para la caracterización de la materia prima se muestran los siguientes resultados:

Tabla 5. Resultados de Ensayos por atributos, Físicos y Químicos.

| <b>Propiedad</b>      | <b>Característica</b>        |
|-----------------------|------------------------------|
| Sensación al tacto    | Limo- arena                  |
| Consistencia          | Frágil                       |
| Color                 | 7.5Y [5/3]                   |
| Impurezas             | Ninguna                      |
| Granulometría         | %A(83.2) - %L(15) - %Ar(1.9) |
| Densidad Real         | 2.76 g/cm <sup>3</sup>       |
| Densidad Aparente     | 1.28 g/cm <sup>3</sup>       |
| Limite Líquido        | 19.5                         |
| Limite Plástico       | 18.07                        |
| Índice de Plasticidad | 1.43                         |

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

De acuerdo al ensayo realizado para medir la cantidad de retención de líquido figura 17, la formación de la cinta con los rollos de 1 cm de diámetro no fue posible debido a que se resquebrajan al momento de ensayarlos, este análisis permite clasificarlo entre un limo y una arena.

De acuerdo al cuadro que se observa en la figura 18, el material analizado presentó una consistencia frágil puesto que los trozos de muestra se rompen con facilidad al aplicarles una leve presión de los dedos.

En lo que corresponde al ensayo de impurezas, se hizo una inspección visual del material, y se puede indicar que el porcentaje de estas es prácticamente nulo. Esto se debe a que el relave es producto de la explotación minera en la cual procesos que actúan sobre el suelo eliminan toda materia orgánica que pueda existir antes de ser utilizado.

El material usado para la presente investigación presentó una baja plasticidad de acuerdo al ensayo para determinar los límites de Atterberg, es decir, se obtuvo un límite plástico (LP) de 18.07, y límite líquido (LL) de 19.5, lo que permite obtener un índice de plasticidad (IP) de 1.43, tal como se observa en la tabla 5. De acuerdo a la clasificación SUCS, el suelo en estudio se lo clasifica como limo arenoso (ML), y, de acuerdo a la clasificación AASHTO a la muestra se la clasificó como un suelo tipo A-5 que corresponde a un suelo limoso y con una calificación de regular a malo.

El ensayo de granulometría realizado para la muestra de relave presentó los siguientes resultados: un 83.1% de contenido de arena, un 15% de limo y 1.9% de arcilla, lo que permite obtener las clasificaciones AASHTO y SUCS.

## 4.2. Caracterización de la Materia prima (Ensayos Químicos y Mineralógicos)

### 4.2.1. Ensayos Químicos

Tabla 6. Resultados de Ensayos Químicos

| Ensayo                            | Resultado              |
|-----------------------------------|------------------------|
| Determinación de Carbonatos       | Ninguna                |
| Determinación de Materia Orgánica | Ninguna                |
| pH                                | 8.06                   |
| Superficie Especifica             | 10.4 m <sup>2</sup> /g |

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

El material analizado no presentó ninguna reacción a las soluciones utilizadas tanto para la determinación de carbonatos como para materia orgánica, lo que sugiere que el material está libre de estos compuestos químicos. El pH del suelo fue de 8.06, de acuerdo a la tabla 6, lo que quiere decir de acuerdo a la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos "Natural Resources Conservation Services" que es un suelo con moderada alcalinidad.

#### 4.2.2. Fluorescencia de Rayos X

La fluorescencia de rayos X muestra la composición química de un suelo. En la figura 44 se muestra los resultados obtenidos.

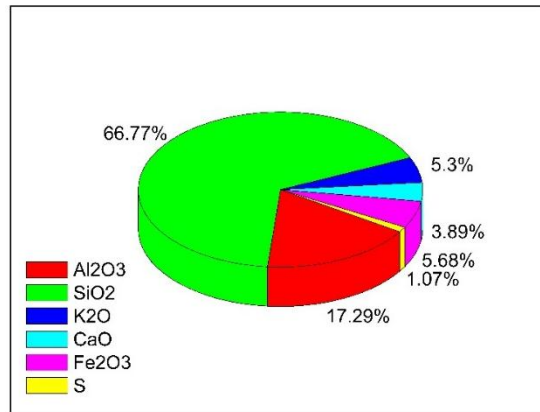


Figura 42. Composición Química de muestra de relave  
Elaborado por: El autor

Los resultados del ensayo se muestran en porcentaje de óxidos que se encuentran presentes en la misma y como se puede observar en la figura 44, los óxidos que gobiernan la composición química de la muestra analizada son los de silicio con un porcentaje del 66.67% y el óxido de aluminio o alúmina con un 17.29%, lo que nos da un indicativo que es un material idóneo para activar el proceso de geopolimerización ya que es necesario una fuente que contenga aluminosilicatos. Seguido de esto se puede observar óxido de potasio en un 5.3%, que resulta beneficioso porque aporta a la formación de la estructura geopolimérica. Por otra parte, se puede apreciar azufre en 1.07%, el cual es dañino en caso de someterse a altas temperaturas (mayores a 500 °C) debido a la creación de óxidos de azufre siendo estos perjudiciales para la salud, incluso existen límites permisibles de emisión a la atmósfera (2000 mg/Nm<sup>3</sup> tomando como referencia la norma IFC/BM). De acuerdo a esta investigación la temperatura máxima a la que se llegarían a producir los ladrillos sería de 120 °C, evitando la generación de estos gases.

#### 4.2.3. Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X es un ensayo el cual nos muestra la composición mineralógica del material en estudio. A continuación en la figura 45 se muestra el difractograma resultante de la muestra analizada. Cabe recalcar que el ensayo de FRX también es de ayuda para conocer los distintos minerales que conforman el material de acuerdo a los compuestos encontrados en dicho análisis.



R1 (Coupled TwoTheta/Theta)

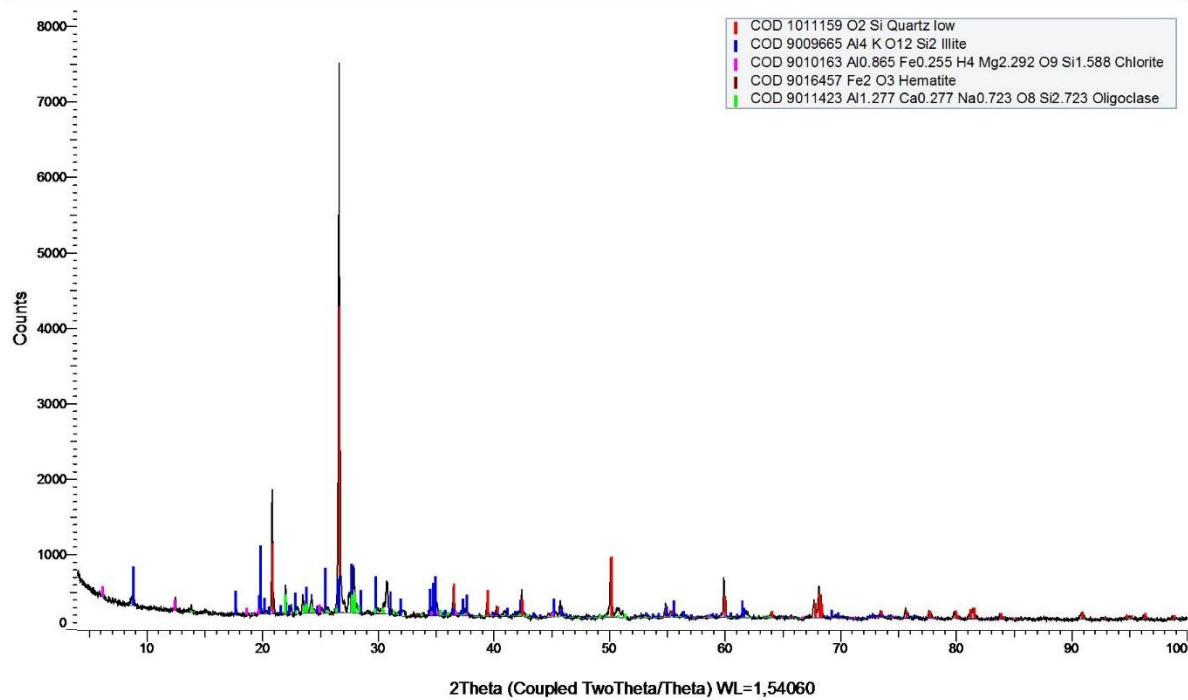


Figura 43. Difractograma de rayos X para la muestra de relave.  
Elaborado por: El autor

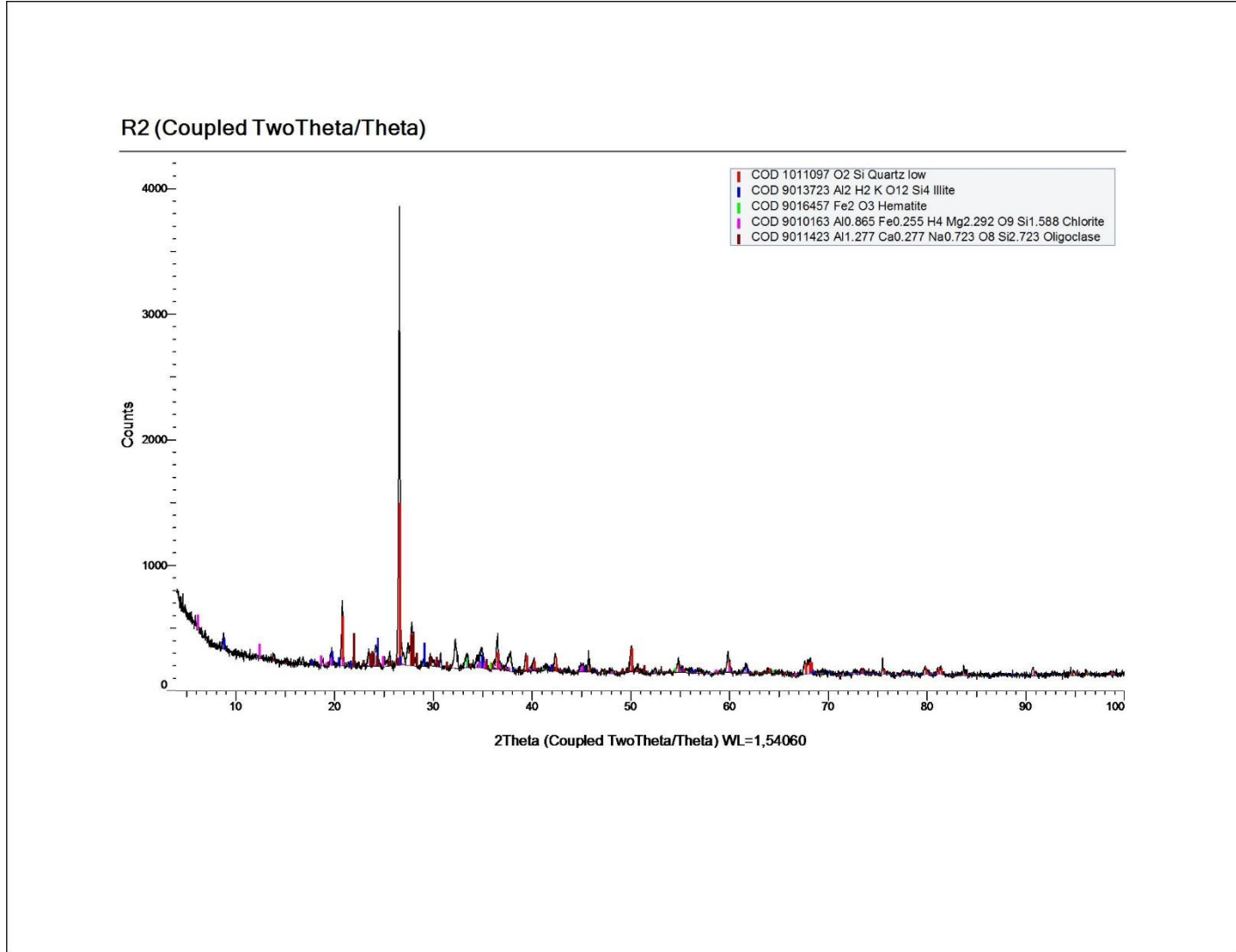


Figura 44. Difractograma de rayos X para la muestra de relave después del proceso de geopolimerización. Elaborado por: El autor.

De acuerdo al ensayo de difracción de rayos X, resultaron los siguientes minerales: el cuarzo bajo, illita, clorita, hematita y oligoclasa en la muestra de relave sin ninguna alteración. Los picos más altos se mostraron con el cuarzo bajo (color rojo) y la illita (color azul) como se muestra en la figura 45, mientras los picos más bajos pertenecen a la hematita (color marrón) y la clorita (color magenta). Los residuos de minería por lo general son materiales cristalinos conformados por una cantidad alta de sílice, lo que se puede confirmar con el ensayo de fluorescencia de rayos X.

En la figura 46 se puede observar picos de alta intensidad, los cuales se extienden desde alrededor de los  $20^\circ$  hasta los  $54^\circ$ . Los resultados luego del proceso de geopolimerización se muestran en la figura 46 donde se puede apreciar una menor intensidad en los picos de la estructura cristalina en un rango de  $2\theta$  de  $22^\circ$  hasta aproximadamente  $28^\circ$ , donde  $2\theta$  es la dirección en la que sale el haz difractado de las familia de planos que se difractan, con la dirección de incidencia del haz de rayos X. Esto se debe a que la superficie de las partículas es cubierta por la solución, disolviéndolas parcialmente y generando el gel geopolimérico.

Si se hace una comparación entre el difractograma del relave de mina y el difractograma luego del proceso de geopolimerización se puede observar que existe un cambio en las intensidades de los picos, esto se debe a la parcial disolución de los aluminosilicatos que componen la materia prima, generando un gel geopolimérico con el que reaccionan también las partículas no disueltas de aluminosilicatos. Este gel formado durante el proceso de disolución fortalece la unión entre las partículas disueltas y no disueltas lo que contribuye a una mayor resistencia. (Palomo , Macias, Blanco, y Puertas , 1992).

#### **4.3. Efecto de la temperatura de curado y contenido de solución.**

Las variables tomadas en cuenta para el análisis de comportamiento mecánico tanto de las pastillas como los ladrillos fabricados fueron la concentración molar, el contenido de solución y la temperatura. En este ítem se analizara el efecto de la temperatura y el contenido de solución mantenido constante la concentración molar.

Como se observa en la tabla 7 la temperatura tiene un efecto importante en el aumento del factor de optimización (FO) en las siguientes condiciones: Concentración molar (CM) de 10 y contenido de solución (CS) de 22%, donde se aprecia un incremento significativo a medida que la temperatura de curado aumenta.

Tabla 7. Efecto de la temperatura de curado en la resistencia a la tracción de discos.

| CS (%) | CM (M) | Temp (°C) | D(cm) | e(cm) | Carga (kg) | $\sigma_t$ (MPa)* | FO (MPa/kg)** |
|--------|--------|-----------|-------|-------|------------|-------------------|---------------|
| 22     | 10     | 90        | 5.04  | 1.65  | 22.60      | 0.169             | 3.29          |
|        |        | 120       | 5.05  | 1.81  | 26.17      | 0.180             | 3.68          |
|        |        | 150       | 5.04  | 1.54  | 42.80      | 0.342             | 6.44          |
|        |        | 180       | 5.07  | 1.62  | 58.76      | 0.439             | 8.25          |

\*Esfuerzo de tracción (MPa)

\*\* Factor de Optimización (MPa/kg)

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

Tabla 8. Efecto del aumento del contenido de solución en el FO de discos.

| CS (%) | CM (M) | Temp (°C) | D(cm) | e(cm) | Carga (kg) | $\sigma_t$ (Mpa) | FO (MPa/kg) |
|--------|--------|-----------|-------|-------|------------|------------------|-------------|
| 24     | 10     | 90        | 5.07  | 1.55  | 27.84      | 0.220            | 4.31        |
|        |        | 120       | 5.03  | 1.55  | 86.39      | 0.691            | 14.99       |
|        |        | 150       | 5.09  | 1.52  | 42.14      | 0.336            | 6.46        |
|        |        | 180       | 5.15  | 1.58  | 40.20      | 0.315            | 6.08        |
| 26     | 10     | 90        | 5.11  | 1.36  | 23.41      | 0.211            | 0.21        |
|        |        | 120       | 5.11  | 1.45  | 69.38      | 0.587            | 0.59        |
|        |        | 150       | 5.03  | 1.49  | 28.77      | 0.241            | 4.84        |
|        |        | 180       | 5.20  | 1.51  | 26.85      | 0.211            | 4.2         |

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor.

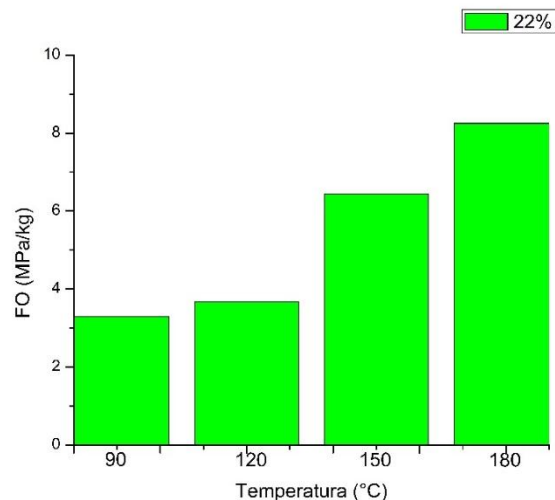


Figura 45. Aumento del FO a medida que la temperatura aumenta.

Fuente: El autor.

Elaborado por: El autor.

Tal como se muestra en la tabla 8, al incrementar el contenido de solución (CS) y temperatura (T) se observa el efecto en la resistencia a la compresión diametral de los discos donde el factor de optimización (FO) calculado subió hasta 14.99, lo que indica que la temperatura bajo

estas condiciones resulta beneficiosa. Con un CS del 24% y una T de 120 °C se obtuvo un FO igual a 14.99 MPa/kg. Así mismo para el caso en el que el CS es el 26% y T de 150 °C, el FO alcanzó un valor de 4.84 MPa/kg.

Tal como se observa en la figura 48, se aprecia un descenso del FO a partir de los 120°C cuando se trabaja con un CS de 24%. Se puede notar que en los discos que se secaron a temperaturas mayores que 120°C aparecen fisuras lo que origina una disminución notable de su resistencia Figura 48.

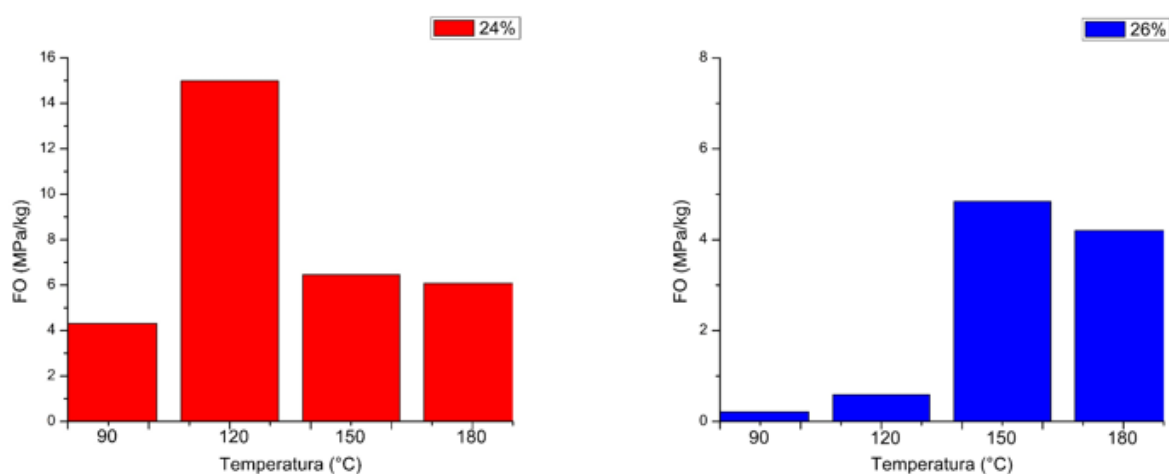


Figura 46. Influencia del cambio de contenido de solución en el valor de FO.  
Elaborado por: El autor.

La elevada temperatura a la que se exponen los discos produce un rápido secado de los mismos, lo que provoca que se creen estas fisuras y por consiguiente una fractura más rápida de los discos al realizar el ensayo de caracterización mecánica.

De acuerdo al trabajo realizado en la parte experimental y coincidiendo con algunos autores en trabajos similares, la temperatura acelera la cinética de reacción de la geopolimerización, pero es necesario tener en cuenta que el aumento exagerado en la temperatura de curado puede afectar de manera negativa las propiedades mecánicas de los discos.

En la figura 49 se presentan discos con fisuras generadas por exposiciones a temperaturas de 150°C y 180°C, donde se puede observar las grietas generadas por la exposición a temperaturas elevadas.

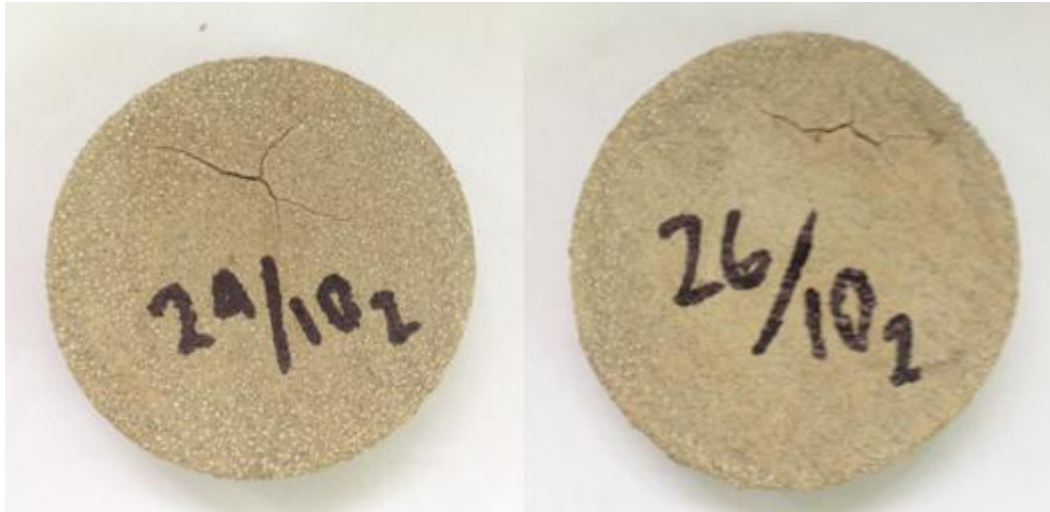


Figura 47. Fisuras generadas por exceso de temperatura de curado.

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

De acuerdo a esto se escogió como temperatura de curado óptima 120°C, ya que a esta no se puede apreciar ninguna reacción desfavorable que afecte el comportamiento mecánico de los elementos fabricados así como variación en las propiedades físicas.

#### 4.4. Efecto de la concentración molar CM

La tercera variable tomada en consideración para el análisis fue concentración molar. Como se puede apreciar en la figura 50, el aumento de esta variable conlleva a un incremento significativo del FO en contenidos de solución de 24 y 26%, sin embargo con el 22% de contenido de solución también se aprecia un incremento pero este existe en baja cantidad.

Considerando una temperatura de 90 °C el aumento más apreciable es el presentado para un contenido de solución del 26% y a una concentración alcalina de 15 M dando un valor de FO de 13.91 MPa/kg, en comparación con los valores de 7.29 MPa/kg que se obtuvieron para un contenido de solución del 24% con igual concentración molar.

En el ítem anterior sucedió algo diferente, se apreció que mientras se aumentaba el porcentaje de contenido de solución el FO disminuye, pero se mantiene constante la concentración molar. Como se puede observar en la figura 51 la concentración utilizada son 15 M. Esto nos indica que la concentración molar es un factor importante en el aumento del comportamiento mecánico de las pastillas fabricadas.

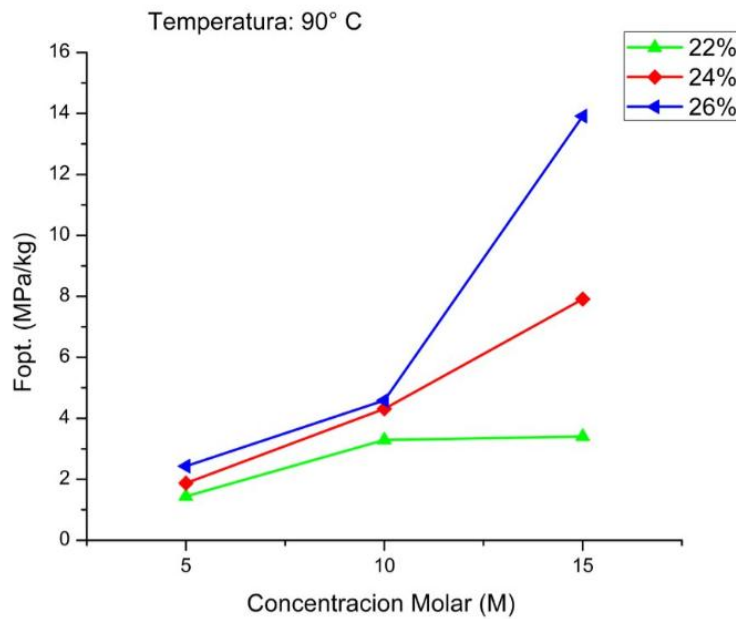


Figura 48. Efecto de la Concentración Molar (CM) en el FO a 90° C.  
 Fuente: El autor  
 Elaborado por: El autor

De manera similar, se observó un aumento en el FO a temperaturas de 120°C, a medida que el contenido de solución aumenta. En la figura 51, muestra los resultados cuando se cambia de una concentración molar de 10 a 15 M mostrando valores de 3.08 y 6.94 MPa/kg respectivamente, con un contenido de solución del 22%. Lo mismo sucede al poner atención al máximo valor de contenido de solución (26%), del cual se obtuvieron mejoras de 10 MPa/kg hasta los 21 MPa/kg (a 10M y 15M).

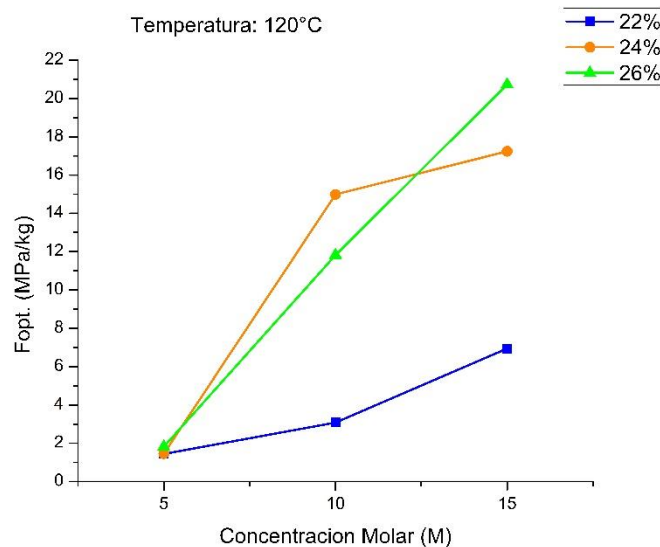


Figura 49. Variación del FO en función de la CM  
 Fuente: El autor  
 Elaborado por: El autor

El contenido de solución se podría explicar de la siguiente manera: la solución actúa como un medio para la reacción de geopolimerización. Una vez llevada a cabo la primera etapa del proceso llamada disolución los monómeros liberados se propagan en el medio líquido al que fueron expuestos y forman oligómeros. Es importante tener en cuenta el contenido de solución, ya que debe ser la suficiente como para que se genere la formación del ligante geopolimérico y reaccione parcialmente o completamente con las partículas de la materia prima. Cabe recalcar que un contenido de solución alto también puede causar una cantidad elevada de poros lo que se traduce en una baja resistencia de los discos.

En las gráficas 50 y 51 se puede observar que la combinación de las variables: CS y CM en valores altos, se obtienen excelentes resultados. Si se compara los resultados entre un 22% de solución y con una concentración molar de 15 M con un 26% y la misma concentración se observa un incremento significativo en la resistencia de los discos. Debido a que la concentración molar de la solución alcalina es alta, las partículas de la fuente de aluminosilicatos reaccionan más rápido y en su totalidad, debido a que el contenido de solución también es alto, lo que hace que toda la materia prima se sature y se genere una primera etapa (disolución) en buenas condiciones y pase a las siguientes etapas en mejores condiciones. La figura 52 muestra el aumento de la resistencia de las pastillas generadas en escenarios de contenido de solución alto y concentración molar alta.

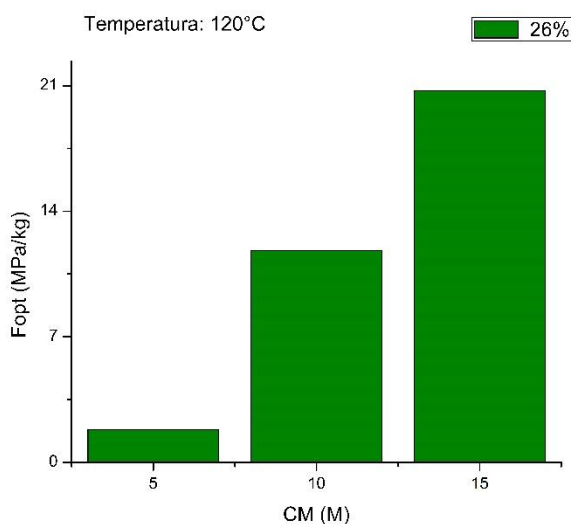


Figura 50. Aumento del FO considerando un aumento del CS y CM.  
Elaborado por: El autor.

Los incrementos en la concentración molar de la solución alcalina de NaOH en el contenido de solución son importantes, ya que la solución es la encargada de atacar al aluminio y silicio (compuestos químicos principales de la materia prima). Cuando se incrementa el contenido de solución se debe añadir más cantidad de NaOH, lo que quiere decir una mayor disolución



de los componentes químicos mencionados anteriormente generando un proceso de geopolimerización adecuado.

#### **4.5. Presión de moldeado**

En un principio se trabajó con una presión de moldeado de 1,3 kg/cm<sup>2</sup> resultando alta para contenidos de solución del 24% y 26%, debido a que parte de la solución se desperdiciaba y se disgregaba de la materia prima. Esto dio como resultado una disminución en la resistencia a compresión diametral de los discos debido a la pérdida de solución de NaOH. Las pruebas dieron como resultado una mejora en las características mecánicas de los discos cuando esta se disminuía en un 25% generando mejores resultados que con la presión de moldeado que se utilizó inicialmente. Esto se debe a que a mayor presión de moldeado va a existir una mayor grado de compactación y por consiguiente una pérdida de solución alcalina en el espécimen. Es muy importante el control de este parámetro (presión de moldeado) debido a que la cantidad de solución es la responsable de que el proceso de geopolimerización se de en buenas circunstancias.

#### **4.6. Selección de la mezcla óptima**

De acuerdo a los resultados analizados anteriormente el contenido de solución y la concentración molar son factores importantes que aportan una excelente resistencia mecánica. Cabe resaltar que si añadimos más contenido de solución y mantenemos la concentración molar, la resistencia mecánica baja notablemente. Se realizó pruebas aumentando dicho parámetro al 28% para conocer la influencia de la concentración molar y se observó que el FO se redujo en al menos 3 veces su valor con respecto al 26% utilizado.

Como se mencionó anteriormente, la temperatura de curado también es importante debido a que un aumento indebido en este factor se traduce en la pérdida de resistencia mecánica de los especímenes de acuerdo a la experimentación realizada.

De acuerdo a esto, para la elaboración de los ladrillos se utilizaron los siguientes valores que se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros y sus respectivos valores para elaboración de ladrillos.

| Parámetro             | Cantidad |
|-----------------------|----------|
| Contenido de solución | 26%      |
| Concentración Molar   | 15M      |
| Temperatura           | 120°C    |

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

#### 4.7. Ladrillos elaborados. Características Físicas y Mecánicas

Los ladrillos fueron elaborados de acuerdo a los resultados mencionados anteriormente teniendo en cuenta el proceso previsto para su fabricación. A continuación se hace un análisis de las propiedades físicas como mecánicas de los mismos con la mezcla óptima realizados mediante el proceso de geopolimerización.

##### 4.7.1. Características Físicas

Los ladrillos elaborados muestran un color gris claro luego de desarrollarse el proceso de curado. La medida de la densidad de los ladrillos elaborados se encuentra alrededor de 1.80 a 2.0 g/cm<sup>3</sup> y su peso cercano a los 2.8 kg. La presencia de poros (Figura 53), es una característica que podría ser dañina en cuanto a la reducción de la resistencia de los mampuestos. Estos poros siempre aparecerán aun cuando el proceso de curado de los ladrillos sea controlado. Con respecto a los ladrillos elaborados los poros son relativamente pequeños por lo que la resistencia a compresión no se vio afectada por la presencia de los mismos.



Figura 51. Ladrillo elaborado con mezcla óptima  
Elaborado por: El autor

#### 4.7.2. Características Mecánicas

Se aplicó el ensayo de compresión simple a los ladrillos elaborados en la dirección larga (lado con mayor superficie) y se comparó con la normativa vigente (NTE INEN 0297). Su resistencia resulta elevada a los tres días con temperatura de curado (120 °C). La media de tres ladrillos elaborados fue de 12 MPa con tres días de curado.

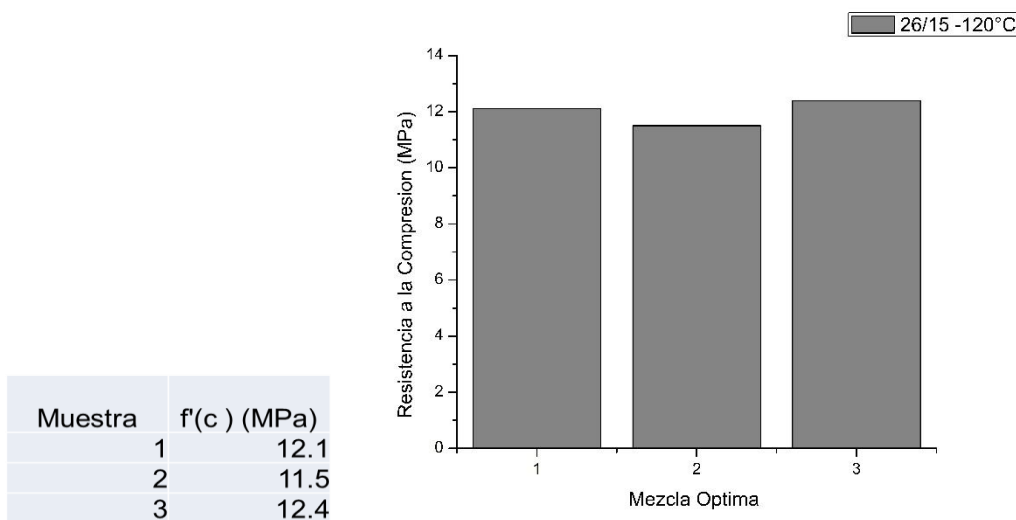


Figura 52. Resistencia a la compresión de 3 ladrillos ensayados.  
Elaborado por: El autor

La falla presentada en los ladrillos elaborados es diferente a la de los ladrillos que se fabrican tradicionalmente con arcilla, los cuales por lo general presentan fisuras que se generan por la aplicación carga dando como resultado una falla por aplastamiento. Al realizar el respectivo ensayo se observó que el ladrillo presenta una falla de tipo vertical luego de ser aplicada cierta carga, lo que muestra que existe una buena adherencia entre las partículas de la materia prima atacadas por la solución activadora formando una estructura compacta y con buenas características mecánicas.

Con el fin de clasificar los ladrillos elaborados en función de la resistencia a compresión se tomó como referencia la tabla 1 de la norma NTE INEN 0297 (Ladrillos Cerámicos. Requisitos), donde se detalla los requisitos de resistencias mecánicas y porcentajes de absorción que deben cumplir. De acuerdo a los resultados obtenidos estos se clasifican entre un ladrillo macizo tipo B o C.

Respecto al ensayo de absorción realizado a los ladrillos, los resultados son los siguientes:

Tabla 10 Cálculo de absorción de agua en ladrillos elaborados

| LADRILLO # | Wseco (g) | W saturado (24 h) (g) | Absorción (%) |
|------------|-----------|-----------------------|---------------|
| 1          | 2444.75   | 3229.2                | <b>32.09</b>  |
| 2          | 2470.3    | 3251.12               | <b>31.61</b>  |
| 3          | 2501.35   | 3312.8                | <b>32.44</b>  |

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

Como se puede observar en la tabla 10 el porcentaje de absorción de agua en los ladrillos elaborados es medianamente alta. Esto se debe a la presencia de poros en el ladrillo lo que hace que estos alojen mayor cantidad de agua haciendo que su absorción aumente.

Tomando como referencia la norma NTE INEN 0297 (Ladrillos Cerámicos. Requisitos) los ladrillos elaborados se clasifican como un ladrillo macizo tipo C, donde el porcentaje máximo de humedad es de 25%, sobrepasando este límite.

A continuación se muestra los resultados de la porosidad obtenida mediante el ensayo realizado.

Tabla 11 Cálculo de la Porosidad de ladrillos elaborados

|  | Ladrillo #   |              |              |
|--|--------------|--------------|--------------|
|  | 1            | 2            | 3            |
| Densidad Real (g/cm <sup>3</sup> )     | <b>2.76</b>  | <b>2.76</b>  | <b>2.76</b>  |
| Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) | <b>1.51</b>  | <b>1.44</b>  | <b>1.49</b>  |
| Wseco (g)                              | 2444.75      | 2470.3       | 2501.35      |
| W saturado (24 h) (g)                  | 3229.2       | 3251.12      | 3312.8       |
| W sumergido (g)                        | 1221.4       | 1279.9       | 1302.6       |
| Porosidad Abierta (%)                  | <b>39.07</b> | <b>39.61</b> | <b>40.37</b> |
| Porosidad Cerrada (%)                  | <b>6.22</b>  | <b>8.22</b>  | <b>5.64</b>  |
| Porosidad Total (%)                    | <b>45.29</b> | <b>47.83</b> | <b>46.01</b> |

Fuente: El autor.

Elaborado por: El autor.



Figura 53. Porosidad de ladrillos elaborados  
Elaborado por: El autor.

La tabla 11 muestra los resultados del cálculo de la porosidad. Un acelerado incremento en la temperatura de curado hace que la cantidad de solución se seque rápidamente y dejando poros grandes, los cuales influyen en la resistencia a la compresión de los ladrillos elaborados. La temperatura de curado en los ladrillos fue controlada, desarrollando su valor máximo a las tres horas de su ingreso a la estufa. Este programa de secado se vio reflejado en el tamaño del poro desarrollado el cual es relativamente pequeño (Figura 55) si afectar la resistencia a la compresión de los ladrillos, en donde se obtuvieron valores que son aceptables para su uso en la construcción.

## CONCLUSIONES

- Los ladrillos a base del proceso químico llamado geopolimerización preparados con una concentración de 15M de solución de NaOH tienen una alta resistencia mecánica comparada con los de 5 M o 15 M. Esto se debe a que una cantidad alta de concentración molar necesita un alto contenido de gramos de NaOH en la cantidad de agua destilada que se utilice para activar el proceso de geopolimerización.
- Un aumento en la cantidad de contenido de solución se traduce en el uso de una mayor cantidad de solución de NaOH y de acuerdo a la concentración molar que se utilice la resistencia de los ladrillos aumentara. La cantidad óptima de contenido de solución fue del 26%.
- La presión de moldeado es un factor importante, debido a que grandes cantidades de presión en los especímenes realizados hace que cierta cantidad de solución alcalina se desperdicie y por consiguiente no se desarrolle el proceso químico de manera óptima.
- La temperatura de curado también tiene su efecto en el proceso de geopolimerización. Se observó que el FO aumenta con la temperatura, siendo favorable en ciertas condiciones. En esta investigación la temperatura de curado óptima para la mezcla que se obtuvo fue de 120°C.
- La materia prima obtenida del Sector “La Pituca II” se puede utilizar para la fabricación de ladrillos geopoliméricos con la utilización de las cantidades necesarias de las variables óptimas (contenido de solución, concentración molar, temperatura).
- Los ladrillos elaborados con la mezcla óptima lograron resistencias mecánicas en muy corto tiempo (tres días con temperatura de curado), dando una media de 12 MPa en pruebas de resistencia a la compresión.
- Los ladrillos elaborados mediante el relave de mina del sector “La Pituca II” fueron caracterizados mecánicamente solo por compresión simple y de acuerdo a los resultados estos presentan buenas características. Otras propiedades como el aislamiento acústico, resistencia al fuego, transmitancia térmica no fueron estudiados en esta investigación.
- Se observó en el ensayo de Difracción de Rayos X (DRX) una disminución de los picos de la estructura cristalina debido a que mediante el proceso de geopolimerización hay una disolución parcial de los aluminosilicatos los cuales generan un gel geopolimérico

el cual fortalece las uniones con las partículas que no se disuelven resultando en un aumento en la resistencia.

- Debido a la temperatura utilizada, los procesos de sinterización no son requeridos como en los ladrillos fabricados artesanalmente. El endurecimiento de la pasta se logra a temperaturas menores de los 200°C.
- Los ladrillos elaborados por el proceso de geopolimerización tienen un beneficio medio ambiental con respecto a los ladrillos fabricados tradicionalmente debido a que para su producción no es necesaria un consumo alto de energía eliminando los gases de efecto invernadero producidos en su elaboración. Además de esto, la cantidad de desechos de minería que es devuelta al medio ambiente causando contaminación, podrá ser aprovechada para la producción de los mismos.

## RECOMENDACIONES

- Investigar acerca de la influencia del cambio de activador alcalino (hidróxido de potasio, hidróxido de calcio, etc.) en el comportamiento mecánico como sus efectos en las características físicas de los ladrillos producidos por esta metodología.
- Realizar un análisis económico comparativo entre los ladrillos producidos artesanalmente y los ladrillos producidos por geopolimerización, teniendo en cuenta la disminución de la temperatura para su elaboración.
- Se recomienda manejar el hidróxido de sodio utilizado en la preparación de la solución con mucho cuidado debido a que es altamente corrosivo y podría hacer daño tanto a ojos, piel o vías respiratorias. Utilizar guantes, gafas de protección y mascarilla.
- Estudiar el efecto del uso de un hidróxido de sodio técnico en las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos debido a que para un mejor desarrollo de la presente investigación se utilizó un hidróxido químicamente puro.
- El tipo de materia prima que se utilice es muy importante en el proceso de geopolimerización, por lo que se recomienda hacer un estudio de la misma antes de ser utilizada verificando si contiene las características tanto químicas como mineralógicas necesarias para ser un posible candidato.
- Analizar la resistencia a la compresión, pérdida de masa y durabilidad de los ladrillos preparados por geopolimerización expuestos a ambientes agresivos.
- Si se desea hacer una evaluación de los ladrillos producidos con hidróxido de sodio a altas temperaturas se recomienda tener en cuenta los vapores emitidos por dicha solución a temperaturas mayores de 200°C y trabajar en un lugar adecuado con una cámara de extracción que absorba los gases emitidos y no perjudiquen la salud de la persona que maneja dichos reactivos.
- Investigar propiedades como aislamiento acústico, resistencia al fuego, transmitancia térmica, etc. mediante la utilización de la mezcla óptima obtenida en esta investigación.



## BIBLIOGRAFÍA

- Ahmari, S., & Zhang, L. (2012). *Production of eco-friendly bricks from cooper mine tailing through geopolymerization*. *Construction and Building Materials*, 323-331.
- Álvarez Mantilla, H. (2010). *Síntesis Y Caracterización De Las Propiedades Fisicomecánicas De Geopolímeros a Partir De Puzolana Para Su Aplicación En La Industria*, p.118.
- Bakhaver , T. (2005). *Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing*. *Cement and Concret Research*, 6.
- Barbosa, V., Mackenzie, K., & Thaumaturgo, C. (2000). *Synthesis and characterisation of materials base on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers*. *International Journal of Inorganic Materials* Vol. 2, 309-317.
- Barranzuela, J. (2014). *Proceso productivo de los ladrillos de arcilla producidos en la región Piura*, 95. Retrieved from [http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1755/ICI\\_199.pdf?sequence=1](http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1755/ICI_199.pdf?sequence=1)
- Betejtin, A. (1987). *Curso de Mineralogía*. La Habana : Pueblo y Educación.
- Bianucci, M. a. (2009). *EL LADRILLO : Orígenes y Desarrollo. Área de La Tecnología Y La Producción*, 39.
- Boutterin, C., & Davidovits, J. (1988). *Geopolymeric Cross-Linking (LTGS) and Building materials (Unofficial English Translation)*. *Geopolymer '88*, 1(0), 79–88.
- BS 1881-117. (1983). *Testing concrete-Part 117: Method for determination of tensile splitting strength*. London, Inglaterra.
- Caballero, E., & Sánchez, W. (2014). *Síntesis de geopolímeros a partir de la activación alcalina de residuos de minería del oro*. *Ingeniería Y Competitividad*, 16(1), 317 – 330.
- Cárdenas , B., Aréchiga , U., Munguía, J. L., Márquez, C., & Campos, A. (2012). *Evaluación preliminar del impacto ambiental por la producción artesanal de ladrillo: cambio climático, eficiencia energética y calidad del aire*. México: Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, Instituto Nacional de Ecología.
- Caso de Estudio Detrás de los Ladrillos: Una gestión integral para el sector informal*. (Junio de 2009). Programa Regional Aire Limpio. Lima, Perú.

- Chamba Quezada, M. A., & Moreno Aguilar, M. F. (2011). *Impactos Ambientales de las ladrilleras de la parroquia Malacatos, Cantón Loja, y su repercusión en la salud humana*. UNL.
- Chen, Y., Zhang, Y., Chen, T., Zhao, Y., & Bao, S. (2011). *Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailing*. *Constr. Build. Mater*, 2107-2111.
- Davidovits, J. (1987). *Ancient and modern concretes: What is the real difference?* Concrete International.
- Davidovits, J. (1991). *Geopolymers*. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633–1656. <http://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Davidovits, J. (1999). *Chemistry of Geopolymeric system, terminology*. *The Proceedings of Geopolymere '99*, 9-39.
- De Monte Dirce, P., & Díaz, O. (2011). *La Industria ladrillera Actividad milenaria, millonaria y postergada*. Argentina.
- Del Coz, D. P., García, N. F., Álvarez, R. A., & Lozano Martínez-Luengas. (2011). *Design and shape optimization of a new hollow concrete masonry block using the finite method*. *Eng. Struct.* 33, 1-9.
- Duxon, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. (2006). *Geopolymer technology: the current state of the art*. *Advance in Geopolymer Science & Technology*, 2917-2933.
- Ebel, G. A., Jacobo, G. J., & Corvalán, R. E. (2006). *Desarrollo de criterios para la producción de ladrillos comunes según las normas técnicas en el NEA. Provincia del Chaco, Argentina*.
- El ladrillo*. (2009). Argentina: FAU-UNNE.
- Fernández Ortega, L. (2010). *Etapas Constructivas*. España: AMV Ediciones.
- García Saldaña, C. A., & Tongombol Chuquiango, D. V. (2011). *Los relaves mineros, su efecto en el ambiente y la salud*. San Martín: Centro de Investigación en Ingeniería y Arquitectura.
- Gasteiger, H. A., Frederick, W. J., & Streisel, R. C. (1992). *Solubility of aluminosilicates in alkaline solution and a thermodynamic equilibrium model*. *Ind. Eng. Chem Res*, 1183-1190.

- Gonzalez Cuervo, C. P., Montaña Angarita, Á. M., & Castro Rodríguez, D. C. (2012). *Obtención Y Caracterización De Geopolímeros, Sintetizados a Partir De Ceniza Volante Y Piedra Pómez, Utilizados Para El Desarrollo Y Mejoramiento Del Concreto.*, 59–65.
- Hendry , A. W., & Khalaf, F. M. (2001). *Masonry Wall Construction*. USA: Taylor and Francis Group.
- Jaya, J. L., & Vásquez, J. L. (2012). *Análisis comparativo de la contaminación atmosférica producida por la combustión en ladrilleras artesanales utilizando tres tipos de combustibles*. Tesis de Grado.
- Lee, W., & Van Deventer, J. (2002). *Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solution*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspect*, 49-66.
- Lopez-Arce, P. (2011). *Caracterización de Ladrillos Históricos*. Madrid: Programa Geomateriales.
- Mayo Filio, R. (04 de Julio de 2010). *Huancavelica: El 40% de la población afectada por derrame de relave no cuenta con agua*. El Comercio.
- Morales Galoc, M. Á. (2012). *Ladrillos*. Perú.
- Nugteren, H. W., Butselaar-Orthlieb, V., Izquierdo, M., Jan Witkamp, G., & Kreutzer, M. (2009). *High Strength Geopolymers from fractionated and Pulverized Fly Ash*.
- Pabon Vallejo, J. L. (2007). *Propuesta técnica para la mitigación de los impactos ambientales generados por la producción de cal y ladrillo en el municipio de Sn Francisco Departamento de Putumayo*. *Journal of Chemical Information and Modeling*.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomez, J., & Jalali, S. (2008). *Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder*. *Construction od tungsten mine waste geopolymeric binder*, 1201-1211.
- Palomo , A., & Palacios , M. (2003). *Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrice for the immobilization of hazardous wastes - Part I*. *Stabilisation of chromium and lead, Cemente and Concrete Research*, 289-295.
- Palomo , A., Macias , A., Blanco, M., & Puertas , F. (1992). *Physical, chemical and mechanical characterization of geopolymers*. New Delhi: Proceeding of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement.

- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). *Alkali-activated fly ashes: A cement for the future*. *Cement and Concrete Research*, 1323-1329.
- Programa de asistencia técnica al ministerio de energía y minas del Perú*. (2005). *Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros*.
- Provis, J. L. (2006). *Modelling the formation of geopolymers*.
- Provis, L., & Van Deventer, J. (2009). *Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications*. Norte América: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC.
- Purdon, A. (1940). *L'action des alcalis sur le laitier de haut-fourneau (The action of alkalis on blast furnace slage)*. Bruxelles, Belgium: Journal de la Societe des Industries Chimiques.
- Quillupangui Peñaherrera, L. C., & Villa Cevallos, T. W. (2011). *Diseño y Simulación de un sistema para ladrillo crudo con medidas 34x16x7*.
- Ramírez Morandé, N. A. (2007). *Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves*, 38.
- Rees, C., Provis, J., Lukey, G., & Van Deventer, J. J. (2008). The mechanism of geopolymer gel formation investigated through seeded nucleation. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspect Vol 318*, 97-105.
- Robayo Nuñez, E. (2013). *Comportamiento Mecánico y durabilidad de morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente*. Bogota: Facultad de Ingeniería Civil.
- Robles Campoverde, L. K. (2016). *Pruebas comparativas de flotación, cianuración y concentración gravimétrica centrífuga de los relaves de la Planta de Beneficio "PITUCA II" sector Zamora*. Loja: UTPL.
- Rocco, C., Guinea GV, Planas , J., & Elices, M. (2001). *Review of the splitting-test standards from fracture mechanics*. *Cement and Concrete Research*, 73-82.
- Rodríguez Martínez, E. D. (2009). *Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante*.

- Rodríguez, E., De Gutiérrez, R. M., Bernal, S., & Gordillo, M. (2009). *Effect of the SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> ratios on the properties of geopolymers based on MK*. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, 3, 30–41.
- Romero, A., & Flores, S. (2010). *Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas*. *Revista de La Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú*, 13(1), 75–82.
- Roy, S., Adhikari, G. R., & Gupta, R. N. (2007). *Use gold mill tailing in making bricks: A feasibility study*. *Waste Manage*, 475-482.
- Simonetti, J. El ladrillo. Definición.
- Sindhunada, J. (2006). *A conceptual model of geopolimerisation*. Australia: University of Melbourne.
- SNI. (2015). *Diagnostico Parroquial*. Quito: Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo.
- Soares, P., Pinto, a T., Ferreira, V. M., & Labrincha, J. a. (2008). *Geopolímeros basados en residuos de la producción de áridos ligeros Geopolymerization of lightweight aggregate waste*. *Materiales de Construcción*, 58, 23–34.
- Stevenson, M., & Soagoe-Crentsil, K. (2005). *Relationships between composition, structure and strength of organic polymers Part 1 Metakaolin-derived inorganic polymers*. *Journal of Materials Science*, 2023-2036.
- U.P.B. (1998). NaOH Hidróxido de Sodio. *Hoja de Seguridad Hidróxido de Sodio (NaOH)*, 4.
- Uribe S., R. (2014). *Mejores Prácticas de Control Tecnológico de Materias primas arcillosas*. Venezuela.
- Van Jaarsveld, J. S., & Van Deventer, J. J. (1999). *Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers*. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 3932-3941.
- Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2006). *Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long term properties*. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology.

- Xu, H., & Van Deventer, J. (2000). *The geopolymerisation of alumino-silicate minerals*. International Journal of Mineral Processing, 247-266.
- Xu, H., & Van Deventer, J. (2002). *Microstructural characterisation of geopolymers synthesised from kaolinite/stibillite mixture using XRD, MAS-NMR, SEM/EDX, TEM/EDX*. Cement and Concrete Research, 1705-1716.
- Zhang, L., Ahmari, S., & Zhang, J. (2011). Synthesis and characterization of fly ash modified mine tailings-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 25(9), 3773–3781. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.005>

## **ANEXOS**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
*La Universidad Católica de Loja*

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINAS E INGENIERÍA CIVIL  
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ANEXO  
FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)

SOLICITANTE: Juan Pablo Paladines  
DIRECCIÓN: San Cayetano

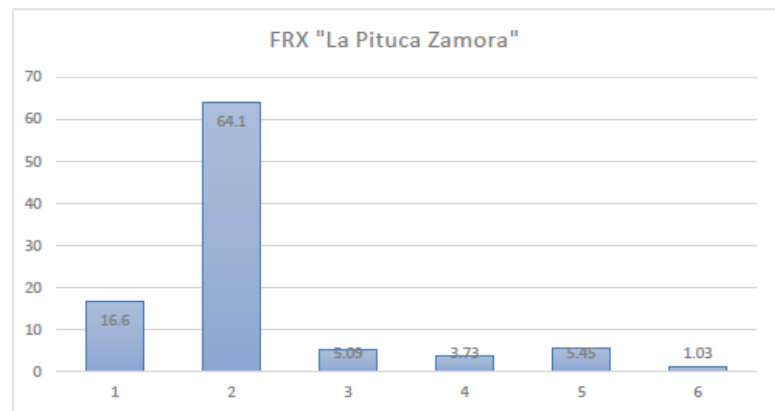
Institución UTPL  
Proyecto: Tesis: Fabricación de Ladrillos a base de lodos de relaves de mina

ENSAYO:  
Norma: Fluorescencia de Rayos X.  
Meaning Light Element  
Realizado : Juan Pablo Paladines

Datos de la muestra:

|            |                       |
|------------|-----------------------|
| Análisis # | 817                   |
| Lugar      | Zamora                |
| Código     | Relave La Pituca      |
| Método     | Meaning Light Element |

| ELEMENTO                       | %    |
|--------------------------------|------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.6 |
| SiO <sub>2</sub>               | 64.1 |
| K <sub>2</sub> O               | 5.09 |
| CaO                            | 3.73 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.45 |
| S                              | 1.03 |



---

Juan Pablo Paladines Benítez  
Profesional en formación

---

MSc. Alonso Zúñiga Suárez  
Director TFT





**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINAS E INGENIERÍA CIVIL  
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ANEXO  
ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

SOLICITANTE: Juan Pablo Paladines  
DIRECCIÓN: San Cayetano

Institución: UTPL  
Proyecto: Tesis: Fabricación de Ladrillos a base de lodos de relave de mina

**ENSAYO:**  
Norma: Determinación de la materia orgánica (S.N)  
Realizado : Juan Pablo Paladines

| Muestra   | Efervescencia | Materia orgánica |
|-----------|---------------|------------------|
| Relave PZ | NO            | NO               |

---

Juan Pablo Paladines Benítez  
Profesional en formación

---

MSc. Alonso Zúñiga Suárez  
Director TFT



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINAS E INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ANEXO

ENSAYO DE COLOR

SOLICITANTE: Juan Pablo Paladines

DIRECCIÓN: San Cayetano

Institución UTPL

Proyecto:

Tesis: Fabricación de Ladrillos a base de lodos de relaves de mina

ENSAYO:

Norma: Clasificación del color.  
Nomenclatura de Munsell

Realizado : Juan Pablo Paladines

| Muestra          | Matiz | Claridad | Pureza | CODIGO MUNSELL |
|------------------|-------|----------|--------|----------------|
| La Pituca Zamora | 7.5 Y | 5        | 2      | 7.5 Y [5/2]    |

Juan Pablo Paladines Benítez  
Profesional en formación

MSc. Alonso Zúñiga Suárez  
Director TFT



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINAS E INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ANEXO 1

ENSAYO DE DENSIDAD

SOLICITANTE: Juan Pablo Paladines

INFORME:

DIRECCIÓN: San Cayetano

CÓDIGO LAB: RM-DN-C-004

Institución: UTPL

ENSAYO:

Proyecto: TESIS

Norma: NTE INEN 156:2009

Fiscalizador:

Fecha: 11/6/2015

Constructor:

Realizado: Juan Pablo Paladines

Muestra: La Pituca Zamora

DATOS:

|                            |          |      |      |
|----------------------------|----------|------|------|
| Peso Recipiente:           | 155.14   | t°C: | 20.8 |
| Peso Recipiente + Muestra: | 205.28   |      |      |
| Peso Muestra:              | 50.14 gr |      |      |
| Lectura inicial:           | 0.75 ml  |      |      |
| Lectura Final:             | 18.9 ml  |      |      |
| Diferencia de volumen:     | 18.15 ml |      |      |

DENSIDAD : 2.760 gr/cm<sup>3</sup>

DENSIDAD : 2754.48 kg/m<sup>3</sup>

PESO ESPECÍFICO : 2.754

Juan Pablo Paladines Benítez  
Profesional en formación

MSc. Alonso Zúñiga Suárez  
Director TFT



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA  
La Universidad Católica de Loja

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINAS E INGENIERÍA CIVIL  
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

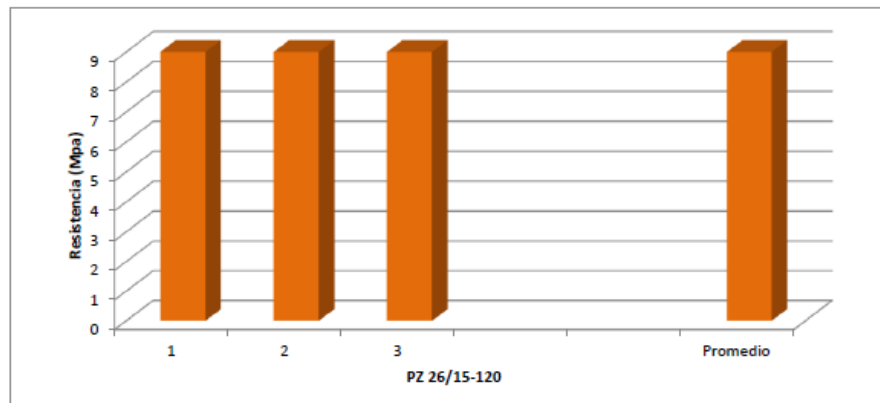
ANEXO  
ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA LADRILLOS

SOLICITANTE: Juan Pablo Paladines  
DIRECCIÓN: San Cayetano

Institución: UTPL  
Proyecto: Tesis: "Fabricación de Ladrillos a base de lodos de relaves de minas"

ENSAYO:  
Norma: Determinación de la resistencia a la compresión (INEN 294)  
Realizado : Juan Pablo Paladines

| Ladrillo # | Resistencia (Mpa) |
|------------|-------------------|
| 1          | 12.1              |
| 2          | 11.8              |
| 3          | 12.5              |
| Promedio   | 12.13             |



---

Juan Pablo Paladines Benítez  
Profesional en formación

---

MSc. Alonso Zúñiga Suárez  
Director TFT



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINAS E INGENIERÍA CIVIL  
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ANEXO  
LÍMITE LIQUIDO Y LÍMITE PLASTICO

SOLICITANTE: Juan Pablo Paladines Benítez  
DIRECCIÓN: San Cayetano

Institución: UTPL  
Proyecto: Tesis: "Fabricación de Ladrillos a base de lodos de relaves de minas"

ENSAYO:  
Norma: ASTM D4318 AASHTO T90  
AASHTO T89  
Realizado : Juan Pablo Paladines

**LIMITE LIQUIDO**

| No. | PESO REC. | PESO REC+HUM | No DE GOLPES | PESO REC+SECO | CH    |
|-----|-----------|--------------|--------------|---------------|-------|
| JA2 | 49.69     | 64.86        | 19           | 62.25         | 20.78 |
| B6  | 61.73     | 73.9         | 23           | 71.88         | 19.90 |
| A-4 | 52.9      | 69.15        | 28           | 66.56         | 18.96 |

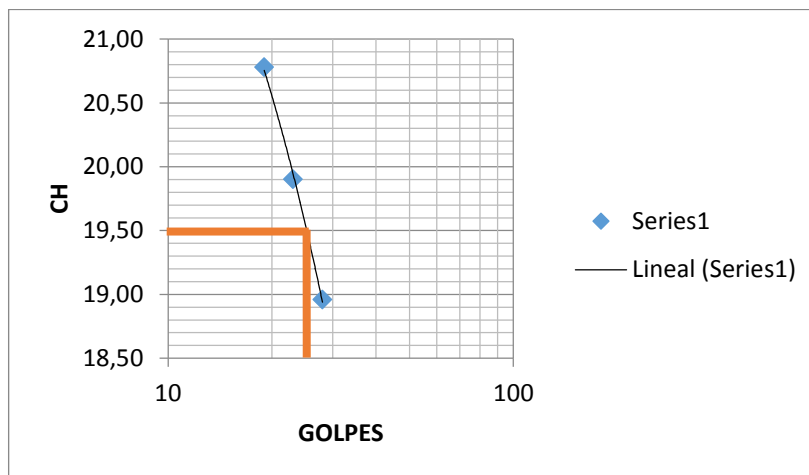
|    |      |
|----|------|
| LL | 19.5 |
|----|------|

**LIMITE PLASTICO**

| No. | PESO REC. | PESO REC+HUM | PESO REC+SECO | CH    |
|-----|-----------|--------------|---------------|-------|
| G2  | 52.4      | 53.26        | 53.1          | 22.86 |
| G12 | 58.82     | 59.2         | 59.14         | 18.75 |
| GB5 | 53.71     | 54.25        | 54.17         | 17.39 |

|    |       |
|----|-------|
| LP | 18.07 |
|----|-------|

|     |      |
|-----|------|
| IP= | 1.43 |
|-----|------|



Juan Pablo Paladines Benítez  
Profesional en formación

MSc. Alonso Zúñiga Suárez  
Director TFT