

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



**Estabilización química de suelos con geopolímero elaborado de cerámica reciclada mediante activación alcalina para subrasante mejorada**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**AUTOR**

**Jhon Grovert Campos Calderon**

**ASESOR**

**Manuel Alejandro Borja Suarez**

<https://orcid.org/0000-0002-6532-4976>

**Chiclayo, 2025**

**Estabilización química de suelos con geopolímero elaborado de cerámica  
reciclada mediante activación alcalina para subrasante mejorada**

PRESENTADA POR  
**Jhon Grovert Campos Calderon**

A la Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo  
para optar el título de

**INGENIERO CIVIL**

APROBADA POR

Joaquin Hernan Rojas Oblitas  
PRESIDENTE

Angel Alberto Lorren Palomino  
SECRETARIO

Manuel Alejandro Borja Suarez  
VOCAL

## **Dedicatoria**

A mis padres, cuyo sacrificio y amor han sido mi mayor fuente de motivación, mis hermanos, que con su compañía han sido parte importante de mi formación. Y demás familiares, quienes han sido un ejemplo a seguir, inculcándome valores, vivencias y experiencias impulsándome a superar obstáculos y no detenerme en perseguir mis metas.

Esta tesis es un pequeño tributo a su confianza en mí y a su apoyo incondicional.

## **Agradecimientos**

Agradezco a todos aquellos que, de una forma u otra, han contribuido a mi formación académica y personal. A mis docentes, agradezco por su sabiduría y apoyo que han enriquecido mi conocimiento, preparándome para la vida profesional.

## TESIS

### INFORME DE ORIGINALIDAD

21%

INDICE DE SIMILITUD

20%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

### FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	5%
2	<a href="https://tesis.usat.edu.pe">tesis.usat.edu.pe</a> Fuente de Internet	3%
3	<a href="https://repositorio.unsa.edu.pe">repositorio.unsa.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
5	<a href="https://repositorio.ucv.edu.pe">repositorio.ucv.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://repositorio.usanpedro.edu.pe">repositorio.usanpedro.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1%
9	<a href="https://eprints.uanl.mx">eprints.uanl.mx</a> Fuente de Internet	<1%
10	<a href="https://link.springer.com">link.springer.com</a> Fuente de Internet	<1%
11	Submitted to Universidad Señor de Sipan Trabajo del estudiante	<1%
12	<a href="https://dspace.unach.edu.ec">dspace.unach.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1%

## Índice

<b>Resumen .....</b>	<b>14</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>15</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>16</b>
<b>Revisión de literatura.....</b>	<b>19</b>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>19</b>
<b>Bases teóricas .....</b>	<b>22</b>
<b>Suelos.....</b>	<b>22</b>
Definición .....	22
Principales propiedades de los suelos .....	22
Clasificación de los suelos.....	25
Principales tipos de suelos.....	26
<b>Suelos arcillosos.....</b>	<b>26</b>
Definición .....	26
Características.....	27
Composición.....	27
<b>Estabilización de suelos.....</b>	<b>28</b>
Tipos de estabilización de suelos .....	29
Criterios para estabilizar un suelo .....	30
<b>Geopolímeros o Cementos Activados Alcalinamente (CAA) .....</b>	<b>31</b>
Definición .....	31
Composición química.....	32
<b>Activación alcalina .....</b>	<b>33</b>
Componentes en la activación alcalina.....	33
Solución alcalina.....	34
<b>Pavimento.....</b>	<b>34</b>

Estructura de un pavimento .....	34
Tipos de pavimentos .....	35
Subrasante .....	37
<b>Materiales y métodos .....</b>	<b>39</b>
<b>Tipo y nivel de investigación .....</b>	<b>39</b>
Tipo de investigación .....	39
Nivel de investigación .....	39
<b>Diseño de investigación .....</b>	<b>39</b>
<b>Hipótesis .....</b>	<b>39</b>
<b>Población y muestra .....</b>	<b>40</b>
<b>Población .....</b>	<b>40</b>
<b>Muestra .....</b>	<b>40</b>
<b>Operacionalización de variables .....</b>	<b>42</b>
<b>Matriz de consistencia.....</b>	<b>43</b>
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>44</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>44</b>
<b>Procedimiento para el muestreo de suelo arcilloso .....</b>	<b>44</b>
<b>Caracterización del suelo natural .....</b>	<b>47</b>
<b>Procedimiento para la recolección de cerámica reciclada.....</b>	<b>54</b>
<b>Caracterización estructura química de la cerámica .....</b>	<b>56</b>
Análisis por difracción y fluorescencia de rayos x .....	56
Análisis térmico diferencial.....	57
<b>Caracterización y fabricación del geo polímero .....</b>	<b>58</b>
Ensayo de gravedad específica de sólidos de la cerámica .....	58
<b>Caracterización solución alcalina .....</b>	<b>60</b>

Evaluación de la temperatura .....	60
Evaluación de pH.....	61
<b>Fórmulas para la determinación de parámetros de diseño del geo polímero.....</b>	<b>63</b>
<b>Diseño de mezcla del geo polímero .....</b>	<b>63</b>
<b>Determinación resistencia a la compresión del geo polímero sintetizado a diferentes tiempos de curado. ....</b>	<b>66</b>
<b>Caracterización mecánica suelo-geo polímero .....</b>	<b>69</b>
<b>Evaluación de impacto ambiental de la estabilización química de subrasantes.....</b>	<b>89</b>
Mejoramiento de subrasante con adición de materiales.....	89
Identificación de impactos ambientales en el proceso constructivo .....	89
Identificación de factores ambientales.....	90
<b>Comparación técnica y económica con método de estabilización tradicional .....</b>	<b>93</b>
Comparación técnica .....	93
Comparación económica .....	96
<b>Discusión de resultados.....</b>	<b>100</b>
Caracterización y fabricación del geo polímero.....	100
Caracterización mecánica suelo-geo polímero .....	101
Proctor modificado .....	102
Relación de soporte de California (C.B.R.).....	103
Resistencia a la compresión uniaxial de muestras de suelo .....	104
Ensayo de succión .....	104
<b>Conclusiones .....</b>	<b>105</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>108</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>108</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>113</b>

## Lista de tablas

Tabla 1: Clasificación por tamizado según el tamaño de las partículas, MTC [18] .....	23
Tabla 2: Formula índice de plasticidad y clasificación respecto al índice de plasticidad [18].	24
Tabla 3: Categorías de subrasante según porcentaje de CBR [18]. .....	25
Tabla 4: Relación entre los métodos AASHTO - SUCS [18]. .....	25
Tabla 5: Clasificación según el tamaño de partícula en los suelos [17]. .....	27
Tabla 6: Caracterización de suelos finos de forma manual [20]. .....	27
Tabla 7: Diseño de muestras. Elaboración propia. ....	40
Tabla 8: Muestra fabricación de geo polímero. Elaboración propia. ....	40
Tabla 9: Muestras por ensayo. Elaboración propia. ....	41
Tabla 10: Muestras para compresión en muestras de suelo por calicata. Elaboración propia.	41
Tabla 11: Variables independientes. Elaboración propia. ....	42
Tabla 12: Variables dependientes. Elaboración propia. ....	42
Tabla 13: Variables intervinientes. Elaboración propia. ....	42
Tabla 14: Coordenadas de puntos de extracción. ....	44
Tabla 15: Codificación de las diferentes calicatas. ....	44
Tabla 16: Humedad natural según calicata. ....	47
Tabla 17: Distribución granulométrica del suelo natural por calicata. ....	48
Tabla 18: Limites de Atterberg por calicata. ....	49
Tabla 19: Gravedad específica por calicata. ....	50
Tabla 20: Proctor modificado del suelo natural por calicata. ....	52
Tabla 21: C.B.R. del suelo natural por calicata. ....	53
Tabla 22: Composición química de la cerámica. ....	56
Tabla 23: Datos del ensayo de gravedad específica de la cerámica. ....	59
Tabla 24: Resultados gravedad específica. ....	59
Tabla 25: Resultados temperatura reacción solución soda caustica. ....	60
Tabla 26: Diseño final de ge polímero, etapa de fabricación. ....	64

Tabla 27: Datos de resistencia a la compresión de probetas de geo polímero. ....	67
Tabla 28: Variación del índice de plasticidad según calicata.....	69
Tabla 29: Cuadro de resultados de Proctor modificado de las diferentes dosificaciones de geo polímero. ....	72
Tabla 30: Resultados de índices de C.B.R. de suelo natural con la adición de geo polímero de cerámica. ....	75
Tabla 31: Resultados de expansión al 95% de la DMS suelo-geo polímero de cerámica. ....	77
Tabla 32: Resistencia a la compresión del suelo natural.....	78
Tabla 33: Resultados ensayo de succión, muestras de suelo natural. ....	80
Tabla 34: Resultados ensayo de compresión en muestras de suelo-geo polímero para la C-01. ....	82
Tabla 35: Resultados ensayo de compresión en muestras de suelo-geo polímero para la C-02. ....	83
Tabla 36: Resultados ensayo de compresión en muestras de suelo-geo polímero para la C-03. ....	84
Tabla 37: Resultados ensayo succión, muestras de Suelo-Geo polímero C-01. ....	85
Tabla 38: Resultados ensayo succión, muestras de Suelo-Geo polímero C-02. ....	86
Tabla 39: Resultados ensayo succión, muestras de Suelo-Geo polímero C-03. ....	87
Tabla 40: Identificación de factores ambientales .....	90
Tabla 41: Matriz de Leopold.....	91
Tabla 42: Matriz de magnitud-colores. ....	92
Tabla 43: Comparativa entre partículas según su diámetro. ....	94
Tabla 44: Comparación de propiedades solución alcalina vs agua natural.....	96
Tabla 45: Análisis de precios unitarios por porcentaje de adición.....	97
Tabla 46: Costo por kg de geopolímero de cerámica reciclada. ....	98
Tabla 47: Porcentajes de agentes estabilizantes de acuerdo con las recomendaciones del Manual de Carreteras: Suelos y Pavimentos 2014. ....	98
Tabla 48: Evaluación de costos de estabilización con cal, cemento y geo polímero elaborado de cerámica. Elaboración propia. ....	98

## Lista de ilustraciones

Ilustración 1: Composición estructural de la caolinita, la illita y la monmorillonita .....	28
Ilustración 2: Pasos para elegir el tipo de estabilización [18]. .....	31
Ilustración 3: Esquema proceso de formación de Geopolímeros, modificado de [22] .....	31
Ilustración 4: Proceso de geopolimerización, a) Disolución y reorganización de los aluminosilicatos, b) Producción de gel a través de condensación y c) Polimerización [23]....	32
Ilustración 5: Fórmula química de los geopolímeros [22] .....	33
Ilustración 6: Composición de pavimentos asfálticos [28]. .....	35
Ilustración 7: Estructura típica de pavimentos asfálticos [29]. .....	35
Ilustración 8: Estructura típica de pavimentos adoquinados [30]. .....	36
Ilustración 9: Estructura típica de un pavimento rígido [29]. .....	36
Ilustración 10: Ubicación de puntos de investigación. a) Calicata 01, b) Calicata 02 y c) Calicata 03.....	45
Ilustración 11: Zonas de excavación de calicatas. a) Calicata N ° 01, b) Calicata N ° 02 y c) Calicata N ° 03. ....	46
Ilustración 12: Realización del ensayo de límites de Atterberg para muestra natural por calicata.....	49
Ilustración 13:Procedimiento ensayo de gravedad específica.....	50
Ilustración 14: Moldes de C.B.R. Compactación, medición, sumersión y penetración.....	53
Ilustración 15: Lugar de recolección de cerámica.....	54
Ilustración 16: Proceso de adecuación de la cerámica reciclada. Lavado, secado y triturado manual. ....	55
Ilustración 17: Molienda en máquina de los ángeles. ....	55
Ilustración 18: a) cantidad de material por la malla N ° 140. b) Aspecto final cerámica tamizada. ....	58
Ilustración 19: Ensayo de gravedad específica. ....	58
Ilustración 20:Medición de temperatura inicial y temperatura máxima. ....	60
Ilustración 21: Preparación de la muestra para evaluación de pH. ....	61
Ilustración 22: Medición de pH, mediante medidor multiparámetro. ....	62
Ilustración 23: Pesaje de la cantidad de material. ....	64

Ilustración 24: Preparación de solución alcalina.....	65
Ilustración 25: Preparación de geo polímero.....	65
Ilustración 26:Llenado, desmoldado de probetas cubicas.....	66
Ilustración 27: Muestras cubicas de geo polímero elaborado de cerámica.....	66
Ilustración 28: Ensayo de probetas cubicas en máquina de compresión.....	67
Ilustración 29: Aspecto de muestras de geo polímero según tiempo de curado.....	68
Ilustración 30: Preparación de la muestra para el ensayo de Limites de Atterberg.....	69
Ilustración 31: Procedimiento para la realización del ensayo de Proctor modificado suelo-geo polímero.....	71
Ilustración 32: Procedimiento ensayo de CBR Suelo-Geo polímero de cerámica.....	75
Ilustración 33: Compactación de probetas suelo natural.....	77
Ilustración 34: Ensayo de compresión de probetas suelo natural.....	78
Ilustración 35: Procedimiento ensayo de succión muestras de suelo natural.....	79
Ilustración 36: Fractura e hinchamiento de Muestra natural.....	79
Ilustración 37: Probetas suelo- geo polímero de cerámica.....	81
Ilustración 38: Ensayo de compresión- geo polímero de cerámica.....	81
Ilustración 39: Ensayo de compresión probetas Suelo-geo polímero de cerámica.....	81
Ilustración 40: Procedimiento ensayo de succión muestras de Suelo-Geo polímero.....	85
Ilustración 41: Comparativo ensayo de succión en muestras de suelo natural y suelo-geo polímero de cerámica.....	88

## Lista de gráficos

Gráfico 1: Granulometría de suelo natural calicata 01.....	47
Gráfico 2: Granulometría de suelo natural calicata 02.....	48
Gráfico 3: Granulometría de suelo natural calicata 03.....	48
Gráfico 4: Curvas de compactación por calicata.....	52
Gráfico 5: Curva de pérdida de masa – análisis termogravimétrico. ....	57
Gráfico 6: Evolución de la temperatura, reacción solución de soda caustica. ....	61
Gráfico 7: Línea de evolución de resistencia a la compresión promedio.....	68
Gráfico 8: Variación LL según porcentaje de geo polímero.....	70
Gráfico 9: Variación LP según porcentaje de geo polímero. ....	70
Gráfico 10: Variación IP según porcentaje de geo polímero. ....	71
Gráfico 11: Curvas de compactación suelo-geo polímero C-01. ....	72
Gráfico 12: Curvas de compactación suelo-geo polímero C-02. ....	73
Gráfico 13: Curvas de compactación suelo-geo polímero C-03. ....	73
Gráfico 14: Variación de MDS por calicata suelo-geo polímero.....	74
Gráfico 15: Variación de OCH por calicata suelo-geo polímero. ....	74
Gráfico 16: Variación del índice de C.B.R. según porcentaje de geo polímero. ....	76
Gráfico 17: Incremento porcentual de índice de C.B.R. según porcentaje de geo polímero y calicata.....	76
Gráfico 18: Resistencia de las muestras de suelo según el tiempo de curado.....	78
Gráfico 19: Altura de succión vs tiempo de muestras de suelo natural. ....	80
Gráfico 20: Esquema comparativo de resistencia a la compresión en muestras de suelo con la adición de geo polímero de cerámica C-01. ....	82
Gráfico 21: Esquema comparativo de resistencia a la compresión en muestras de suelo con la adición de geo polímero de cerámica C-02. ....	83
Gráfico 22: Esquema comparativo de resistencia a la compresión en muestras de suelo con la adición de geo polímero de cerámica C-03. ....	84
Gráfico 23: Altura de succión vs tiempo de muestras Suelo-Geo polímero C-01. ....	86
Gráfico 24: Altura de succión vs tiempo de muestras Suelo-Geo polímero C-02. ....	87

Gráfico 25: Altura de succión vs tiempo de muestras Suelo-Geo polímero C-03. ....	88
Gráfico 26: Comparación de tamaño de partícula entre cal viva y cerámica triturada. ....	95
Gráfico 27: Comparación de tamaño de partícula entre cemento Portland y cerámica triturada. .....	95
Gráfico 28: Precios de la estabilización por m2.....	99
Gráfico 29: Comparación económica entre la estabilización con geo polímero de cerámica vs cal vs cemento. ....	99

## Resumen

La demanda de materiales de construcción va en aumento con el paso del tiempo y su producción genera también el aumento de agentes contaminantes. Por esta razón, se requiere disminuir estas emisiones realizándose el estudio de materiales alternativos que no ocasionen una contaminación significativa. La presente tesis requiere abordar el uso de un material geopolimérico, como material que mejore las propiedades de los suelos por sus propiedades cementantes, buscando una alternativa para la reutilización de los desechos cerámicos. Para el desarrollo de este estudio se inició con la revisión de los que es un geopolímero y cuál es su proceso de fabricación que también se detalla en esta investigación. Una vez revisada la bibliografía, se procedió a la fabricación de este material constando con la trituración de la cerámica, se utilizó el material tamizado por la #30. Para el diseño de mezcla donde se tengan mayores resultados fueron los siguientes parámetros, como la relación de material precursor/agua de 0.4, concentración de la solución alcalina de 12M. Se realizaron probetas cúbicas que se ensayaron a compresión obteniendo un incremento en su resistencia. Para la siguiente parte de la investigación se realizaron muestras de suelo, donde se les sustituyó parte de las muestras de suelo seco por material geopolimérico a base de cerámica reciclada en porcentajes de 10%, 20% y 30%. Realizándose los ensayos de laboratorio más importantes como: granulometría por tamizado, Límites de Atterberg, Proctor, CBR, Resistencia a la compresión en muestras de suelo y succión por capilaridad. Analizados los resultados mostraron mejora en sus propiedades físico-mecánicas de los suelos finos, en todos los porcentajes se encontró mejoría incrementando según se incrementa el porcentaje de material geopolimérico. El incremento a la del índice de CBR y la máxima densidad seca en todas las calicatas, se obtuvieron con un 30% de geopolímero, así como también se obtuvo mejores resultados para los demás ensayos, siendo el recomendable para la estabilización de suelos. El único factor a tener en cuenta es el punto económico, lo óptimo sería escoger el porcentaje que se acomode a las necesidades y el presupuesto.

**Palabras clave:** Estabilización de suelos, geopolímero, Activación alcalina, Arcilla, Materiales reciclados.

### **Abstract**

The demand for construction materials is increasing over time and their production also generates an increase in polluting agents. For this reason, it is necessary to reduce these emissions by studying alternative materials that do not cause significant pollution. This thesis requires addressing the use of a geopolymeric material, as a material that improves the properties of soils due to its cementitious properties, seeking an alternative for the reuse of ceramic waste. For the development of this study, it began with the review of what a geopolymer is and what its manufacturing process is, which is also detailed in this research. Once the bibliography had been reviewed, we proceeded to manufacture this material consisting of grinding the ceramic, using the material sifted through #30. For the mixture design where the greatest results were obtained were the following parameters, such as the ratio of precursor material/water of 0.4, concentration of the alkaline solution of 12M. Cubic specimens were made that were tested under compression, obtaining an increase in their resistance. For the next part of the investigation, soil samples were taken, where part of the dry soil samples were replaced with geopolymeric material based on recycled ceramics in percentages of 10%, 20% and 30%. Carrying out the most important laboratory tests such as: sieving granulometry, Atterberg Limits, Proctor, CBR, Compressive strength in soil samples and capillary suction. Analyzed, the results showed improvement in the physical-mechanical properties of the fine soils; in all percentages, improvement was found, increasing as the percentage of geopolymeric material increased. The increase in the CBR index and the maximum dry density in all the pits were obtained with 30% geopolymer, as well as better results were obtained for the other tests, being recommended for soil stabilization. The only factor to take into account is the economic point, the optimal thing would be to choose the percentage that suits the needs and the budget.

**Keywords:** Soil stabilization, geopolymer, Alkaline activation, Clay, Recycled materials.

## Introducción

La presencia de suelos finos (limos y arcillas) por lo general son materiales pobres para la construcción de estructuras civiles, como los pavimentos donde se presentan grandes problemas como las deformaciones, agrietamientos, la estabilidad volumétrica, y pérdida de resistencia, entre diversos problemas que se le puede presentar a un ingeniero. Con todo esto es necesario una intervención para lograr un suelo con óptimas condiciones, es necesario un método de estabilización que logre aumentar las características que tenga la composición del suelo o específicamente las capas del pavimento [1].

Son solo algunos de los contratiempos que se pueden encontrar durante el desarrollo de los proyectos, pero el principal y mas gran enemigo de los suelos finos (arcillosos y limos) es la humedad, porque al entrar en contacto con el agua, que esta puede provenir de diferentes partes como subterránea, superficial como ríos, lagos; alteran sus propiedades mecánicas, así como físicas, volviendo a los suelos desfavorables para la construcción. Algunas consecuencias que provoca el agua son la capacidad portante disminuyendo drásticamente, además cuando se satura por completo es muy difícil de ser compactado conocido como el fenómeno de la consolidación, también se presenta el problema de la expansión y contracción de los suelos cuando se mojan y secan de manera repentina, que esto afecta a la cimentación de estructuras que se encuentren sobre. Por lo anterior mencionado, muchos de los suelos finos no pueden ser utilizados como subrasante en la construcción de vías, pues no cumplen con los requisitos mínimos de las normativas nacionales, por esto es necesario recurrió a procesos de mejoramiento de suelos. [37]

En la actualidad, los métodos de estabilización utilizan materiales provenientes de los desechos industriales, convirtiéndose recientemente en una técnica muy prometedora. Estos reducen el costo de los proyectos limitando el uso de materiales de buena calidad como principales estabilizadores, como el cemento o la cal. Sin embargo, la fabricación de estos agentes estabilizantes consume grandes cantidades de energía y genera importantes impactos ambientales, aumentando la emisión de CO<sub>2</sub> y el agotamiento de los recursos. Por ejemplo, la producción de cemento en todo el mundo es el 5% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, cada tonelada de Clinker que se fabrica emite aproximadamente 0.8 toneladas de este gas contaminante, teniendo casi la misma consecuencia en cuanto a la producción de cal viva. [2]

En la construcción el material más usado es el cemento Portland, esto debido a que no existe otro conglomerante que posea las mismas propiedades. Principalmente, se debe a sus beneficios, su relación calidad/precio y su materia prima se puede encontrar en cualquier parte del mundo. Debido a esto se tiene la necesidad de desarrollar nuevos materiales con propiedades cementantes, donde su elaboración emita menos gases contaminantes y se obtengan a través de materiales sostenibles. Dentro de estos materiales están los que resultan de la activación alcalina de aluminosilicatos, bien como productos naturales (arcillas) o como residuos de las industrias, escorias de alto horno y/o las cenizas volantes. [3].

A nivel internacional el instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja-España realizaron una investigación sobre la utilización de arcillas calcinadas procedentes de desecho, como puzolanas, llegaron a la conclusión que era viable la utilización de materiales de desecho de arcilla calcinada, pueden utilizarse como sustituto parcial del cemento. También que el calor de hidratación del cemento con un 20% de arcilla es inferior al cemento base y que, a primeras edades, entre 1 y 5 días, el fraguado de estos materiales era superior. [38]

En cuanto al desecho de cerámica, a nivel internacional en Europa se generan aproximadamente 450 millones de toneladas de residuos cerámicos, que estos en su mayoría provienen de materiales de demolición de edificios u otro tipo de actividades en la construcción. En España solo se reciclan el 5% de esos residuos, porcentaje demasiado bajo comparado a los países bajos quienes reciclan un 90% de estos residuos [4].

Mientras que en el Perú se recicla solo el 1.9% del total de los residuos sólidos reaprovechables, menciona el Ministerio del Ambiente. Siendo esto una cifra muy lamentable pues el reciclaje es una necesidad mundial, con el objetivo de mejorar la calidad del ambiente y proteger la salud de las personas. Además, que genera empleo, permitiendo mejorar la vida de las personas al mismo tiempo que se ahorran materias primas que se extraen de la naturaleza y aumentan la vida útil de los rellenos sanitarios de las ciudades, que cada día cuentan con menos espacio para la disposición final de los residuos. En el año 2016, a nivel nacional, se generaron 7 005 576 toneladas de residuos sólidos municipales urbanos, el 18.7% son residuos inorgánicos, que tiene el potencial de ser utilizados siendo estos, papel, cartón, vidrio, cerámicos, metales, entre otros. También menciona que, en la provincia de Lima y el Callao, siendo estos unos de los lugares más poblados del país, cada habitante genera aproximadamente 870 gramos de residuos sólidos al día. [39]

Por otro lado, un estudio de caracterización de residuos sólidos desarrollado en Cercado de Lima, mostro que las cerámicas y otros materiales son el 0.69% de los residuos domiciliarios, además que los ubica según su potencialidad como residuos sólidos inertes no reaprovéchaes, siendo llevados a los botaderos municipales sin ningún fin o potencial uso. [5]

A raíz de esto surge la siguiente interrogante ¿Cuál es la influencia en la estabilización con geo polímero elaborado de cerámica reciclada mediante activación alcalina en las propiedades de los suelos arcillosos para uso como subrasante mejorada? Para responder a esto se tiene como objetivo general “realizar una evaluación físico-mecánica de los suelos con adición de geo polímero elaborado con cerámica y activación alcalina de soda caustica, con la finalidad de usarse como subrasante mejorada”. Como objetivos específicos se tiene los siguientes: caracterizar las propiedades del suelo en el que se realizará la estabilización; proponer un procedimiento para la obtención de cerámica reciclada; establecer la estructura química de la cerámica mediante el ensayo de fluorescencia y difracción de rayos x; analizar estadísticamente los resultados de los ensayos en suelos estabilizados con geo polímero elaborado de cerámica; comprobar los efectos de la geo polimerización en el tiempo en las propiedades de los suelos; determinar el efecto de la estabilización química con geo polímero de cerámica reciclada mediante una evaluación de impacto ambiental, evaluar técnica y económicamente la estabilización química con geo polímero elaborado de cerámica, comparándolo con método de estabilización tradicional.

Este trabajo tiene como justificación dar a conocer que el uso de un geo polímero elaborado con cerámica reciclada mediante activación alcalina, al usarse en estabilización química de suelos finos (limos y arcillas) da resultados positivos mejorando sus propiedades. Estimando que al finalizar esta investigación se obtendrán resultados favorables en este tipo de suelos, mejorando sus propiedades físicas y químicas, a comparación del suelo sin intervención. Además de dar un uso alternativo a los materiales cerámicos, en la mejora de los suelos, que son muy importantes para la construcción, pues surge la necesidad de contar con una alta resistencia. También generar empleo a las personas, pues se necesitará de personas que puedan recolectar el material, para su posterior tratamiento y utilización.

También al ser utilizada para el mejoramiento de subrasantes estabilizadas, se tiene claro que la vida de las estructuras cimentadas sobre ellas será mayor, previniendo los gastos en cuanto al mantenimiento e incluso la reparación de obras proyectadas para varios años de uso, pero estos se ven afectados por el suelo.

Por otro lado, se quiere dar una solución al problema de los suelos finos (limos y arcillas), que son perjudiciales para las estructuras de pavimentos y otras obras en general, mediante la estabilización de suelos, con el uso de un geo polímero elaborado con cerámica reciclada y activación alcalina, comprobando que mejora las propiedades de estos suelos. Reduciendo el impacto que tiene los residuos de cerámica, donde muchas veces no tiene un uso alternativo y solo se disponen en vertederos sin ningún tratamiento para su disposición final. Pues en la actualidad, se busca un desarrollo sostenible, con el objetivo de proteger y salvaguardar nuestro medio ambiente, por ende, estaríamos dándole una reutilización a estos residuos.

Debido a esto la presente investigación plantea un método químico de estabilización en suelos finos (limos y arcillas), con la utilización de un geo polímero elaborado con cerámica reciclada y activación alcalina de soda caustica. Pues debido a sus características tanto físicas como químicas, pueden utilizarse en la mejora de suelos, donde muchas empresas podrían generar grandes beneficios y mejora de la calidad en los proyectos civiles. Pues esta nueva técnica de activación alcalina de materiales con gran cantidad de aluminosilicatos. En los últimos años a sido una prometedora alternativa al cemento Portland y amigable con el medio ambiente, contribuyendo a la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>. [11]

## **Revisión de literatura**

### **Antecedentes**

**Ulloa y otros autores [6]**, publicaron su investigación en Ecuador en el año 2022, estudiaron muestras de mortero de geo polímero usando material precursor las zeolitas naturales como posibles aplicaciones como materiales alternativos para la construcción, utilizaron activadores alcalinos como hidróxido de sodio, con una concentración de 14M y meta silicato de sodio, en diferentes proporciones. Dando como mejores resultados la mezcla de hidróxido de sodio al 14M, con una relación activador zeolita 0.5, tuvo un curado a 60 °C, mostrando mejora en cuanto a la resistencia a la compresión.

**Pourakbar y Kim [7]**, en esta investigación publicada en Malasia en el año 2016, evaluaron el uso de cenizas de un combustible elaborado a base de aceite de palma, residuo agrícola que pretenden utilizarlo como agente estabilizante, mediante una activación alcalina de hidróxido de sodio y de potasio. Resulto que estos dos agentes alcalinos mejoraron las propiedades mecánicas, pero las muestras de suelo junto con las cenizas y la solución de hidróxido de potasio obtuvieron resultados mayores respecto al otro activador, para el curado de las muestras se realizó de 90 a 180 días.

Se concluyó que la densidad y la cantidad del activador alcalino es influyente en la velocidad y el nivel de activación que se alcanza, mejorando las propiedades mecánicas de las muestras según transcurre el tiempo de curado de las muestras.

**Vora y Dave [8]**, artículo publicado en la India en el año 2013, estudiaron la influencia de un concreto geo polimérico, usando ceniza volante de clase F, este material fuente de aluminosilicatos. Aquí realizaron dos diseños, donde los llaman Mix-1 y Mix-2, para la activación alcalina utilizaron hidróxido de sodio con relaciones de 0.35 y 0.4, donde variaron la relación molar en 8M, 10M, 12M y 14M. Además, estas muestras se curaron térmicamente con la finalidad de estudiar el comportamiento de acuerdo a la temperatura en la reacción geo polimérica.

Se rescata que para ambas relaciones precursor/solución alcalina se obtiene buenos resultados a la compresión a los tres días de curado, para la presente investigación se utilizó la dosificación de 0.4 que da mejor trabajabilidad para realizar los ensayos que se requieren.

**Cristelo y otros autores [9]**, en esta investigación publicada en el año 2012, se experimentó con suelos blandos estabilizándolos con cenizas volantes, con el objetivo de ver la influencia que tenía su contenido de calcio, esto se hizo con una solución alcalina de hidróxido de sodio con molaridad de 10M, y relaciones de solución alcalina/ceniza de 2:1 y 4:1, por otro lado, se usó una muestra con una relación de 0.40 respecto a la solución/(suelo + ceniza). Luego de la experimentación se compararon los resultados de las muestras de suelo y cenizas volantes, para el segundo componente de la muestra se usaron cenizas de tipo C (poseen un elevado nivel de calcio) y cenizas del tipo F (poseen menor nivel de calcio), y por último una muestra de suelo mezclado con cemento y otra de suelo mezclado con cal.

Se concluye que su resistencia a compresión con un tiempo corto de curado, la muestra de suelo-cenizas volantes de tipo C fue mayor a la muestra de suelo-cenizas tipo F, comparando estas muestras con las de suelo-cemento y suelo-cal. Entonces la utilización de cenizas y solución alcalina de hidróxido de sodio en suelos blandos mejora la resistencia en amplios periodos de curado.

**Hamidi, Man, y Azizli [10]**, en esta investigación publicada en Malasia el año 2016, se describen los efectos que tiene en las propiedades del geo polímero hecho con ceniza volante, la concentración de Hidróxido de Sodio que se le aplique a las muestras. Se eligió este producto ya que millones de toneladas de cenizas volantes son generadas por las centrales eléctricas de carbón en su país, preocupándose por su reutilización. Se prepararon muestras de geo polímeros

a una temperatura de curado de 60°C y con un tiempo de curado de 24 horas. Se utilizó una concentración de Hidróxido de Sodio (NaOH) en rango de 4M a 18M. Las muestras se ensayaron mediante Espectroscopia Infrarroja para la elucidación estructural, Microscopía Electrónica de Barrido para observar su morfología y se determinaron sus propiedades mecánicas mediante ensayos a la flexión.

Se determinó de acuerdo con los ensayos mecánicos que la relación molar con efectos positivos en cuanto a los materiales geo poliméricos fue de 12M. Por consiguiente, la molaridad de la solución alcalina será de 12 M para la realización del geo polímero que se utilizará en la presente investigación.

**Soto [11]**, en su trabajo de investigación publicado en Arequipa en el año 2019, realizó una estabilización de subrasante con ingnibrita, arcilla calcinada y mortero reciclado, mediante la activación alcalina de hidróxido de sodio, creando geo polímeros, además que se evaluó el efecto de este geo polímeros a la temperatura y resistencia a la compresión. Estos fueron dosificados en porcentajes de 10%, 20% y 30% a muestras de suelo para realizar su mejoramiento y usarse como subrasante. Se obtuvieron resultados positivos cuando se aumenta el uso de geo polímero. Para la estabilización de suelo y un uso como subrasante la dosificación de 10% se obtuvo el mejor resultado, por otro lado, al aumentar su dosificación se empieza a disminuir los valores de CBR. Por otro lado, se encontró aluminosilicatos de calcio, sodio y potasio en la composición de los materiales, donde estos fueron responsables de la etapa de geo polimerización en el suelo.

**Bonilla, González y López [12]**, en esta investigación publicada en Bogotá en el año 2017, evaluaron la resistencia a la compresión de un geo polímero fabricado con residuos de ladrillo. En la primera fase de la investigación se realizó una caracterización física y mineralógica del material precursor para la elaboración del material geo polimérico; en la segunda fase procedieron a realizar la sinterización de este material con diferentes dosificaciones, en total realizaron 12, elaborando probetas cúbicas. Utilizaron dos activadores alcalinos siendo el hidróxido de sodio y el silicato de sodio. En la tercera y última fase se determinó la resistencia a la compresión del geo polímero sintetizado a diferentes tiempos de curado, demostrando que el proceso de geo polimerización sí sucedió, pues se comprueba un aumento de la resistencia a compresión a los 28 días curado.

## **Bases teóricas**

### **Suelos**

#### ***Definición***

En la construcción es el material con más presencia y de mayor uso de todo el mundo. La concepción depende de la ciencia en donde se estudie, pues diferentes profesionales e investigadores le dan diversas definiciones.

Para un geólogo es el material que está a la intemperie y contiene materia orgánica encontrándose cerca de la superficie [13]. Para un constructor, sería el lugar donde ubicará las edificaciones o de donde extraerá los materiales que requiere para hacerlas. Desde el punto de vista de un ecólogo, es la parte del ecosistema que estudia. Para un químico, es su laboratorio donde se producen diversas reacciones en las tres fases de la materia [14].

Una definición más general, es la capa superficial del nuestro planeta donde los seres humanos edifican viviendas, infraestructuras y otro tipo de obras buscando su protección y desarrollo [15].

#### ***Principales propiedades de los suelos***

Los suelos cuentan con propiedades físico-mecánicas, principalmente se ven influenciadas por los materiales que componen su estructura, variando diferentes características de las partículas [15]. El ingeniero civil tiene el deber de identificar las propiedades de los suelos para evaluarlos y lograr unas condiciones favorables que garanticen tanto la durabilidad y la estabilidad de las obras que se pretenda desarrollar. Propiedades que son evaluadas mediante ensayos de laboratorio, definidas a continuación [16]:

**Análisis de granulometría:** Proceso de laboratorio que permite determinar la proporción de los granos del suelo, basándose en el tamaño de las partículas que lo componen. Principalmente se basa en la separación del suelo en dos fracciones, esto es necesario para conocer su eficiencia, desde un punto de vista geotécnico. Aquí se pueden encontrar dos tipos de ensayos: el más utilizado, por tamizado para las partículas grueso-granulares, como las gravas y arenas; el otro ensayo es el de sedimentación, usada para la fracción fina del suelo, encontrando a los limos y las arcillas [16].

Tipo de Material		Tamaño de las partículas
Grava		75 mm – 4.75 mm
Arena		Arena gruesa: 4.75 mm – 2.00 mm
		Arena media: 2.00 mm – 0.425mm
		Arena fina: 0.425 mm – 0.075 mm
Material Fino	Limo	0.075 mm – 0.005 mm
	Arcilla	Menor a 0.005 mm

*Tabla 1: Clasificación por tamizado según el tamaño de las partículas, MTC [18]*

La plasticidad, según el MTC, propiedad que tiene el suelo de mantenerse estable hasta un cierto límite de humedad sin disgregarse, esto se debe principalmente a los finos. Siendo el agua el agente interviniendo principal en esta propiedad, cuando el suelo cuenta con una humedad muy baja, se comporta como un sólido que se rompe con facilidad, cuando aumenta la humedad de los suelos, estos pierden totalmente sus propiedades mecánicas y tiene un comportamiento de un líquido [17].

Aquí encontramos el ensayo de Límites de Atterberg para encontrar los valores de plasticidad, permite determinar cómo se va a comportar un suelo respecto a su contenido de humedad, dividiéndose en límite líquido, plástico y de contracción [18].

- Límite Líquido (LL): cuando el suelo pasa de estar en estado semilíquido a un estado plástico donde se le puede dar forma.
- Límite Plástico (LP): cuando el suelo pasa de estar en estado plástico a un estado semisólido donde puede romperse o aparecer grietas.
- Límite de Contracción o de retracción: es cuando un suelo cambia su estado de semisólido a sólido completamente y cuando se pierde la humedad este deja de contraerse.

Otra característica a tener en cuenta es el índice de plasticidad, se obtiene de restar los valores de límite líquido y plástico del suelo estudiado. Cuando se obtenga un índice de plasticidad grande el suelo será muy arcilloso, por el contrario, un valor pequeño se considera que es poco arcilloso.

El MTC [18] clasifica los suelos según el índice de plasticidad que se obtenga mostrado a continuación:

$$IP = LL - LP$$

Índice de Plasticidad	Plasticidad	Característica
IP > 20	Alta	suelos muy arcillosos
IP ≤ 20 IP > 7	Media	suelos arcillosos
IP < 7	Baja	suelos poco arcillosos plasticidad
IP = 0	No Plástico (NP)	suelos exentos de arcilla

Tabla 2: Formula índice de plasticidad y clasificación respecto al índice de plasticidad [18].

La humedad natural, es importante esta característica pues está asociado directamente con la resistencia de los suelos, especialmente con la parte de los finos que está condicionado a la humedad y densidad que presentan los suelos. El primer caso donde la humedad natural sea igual o inferior a la humedad óptima, se debe proponer una compactación del suelo y el suministro de agua. Por otro lado, cuando encontremos el caso que la humedad del suelo natural se supere la humedad óptima, se debe proponer aumentar la energía de compactación, dejar el suelo al aire libre o sustituir el suelo que se encuentre saturado [18].

Capacidad de soporte: es la capacidad que permite la estabilidad de las estructuras que soporta o de los taludes. El factor que la reduce es la resistencia, por otro lado, compactación o el drenaje del agua hace que se eleve [16].

Según la norma CE.020, lo define como la resistencia que presenta un material que tiene como fin ser parte del diseño de pavimentos [19]. En este apartado se realiza el ensayo de resistencia como subrasante o CBR, que significa California Bearing Ratio en inglés. Para las subrasantes el MTC lo clasifican de acuerdo con el porcentaje obtenido en el ensayo de CBR según esta tabla:

Categorías de Sub rasante	CBR
S <sub>0</sub> : Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S <sub>1</sub> : Sub rasante insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S <sub>2</sub> : Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S <sub>3</sub> : Sub rasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S <sub>4</sub> : Sub rasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S <sub>5</sub> : Sub rasante Excelente	CBR ≥ 30%

Tabla 3: Categorías de subrasante según porcentaje de CBR [18].

### Clasificación de los suelos

A mediados del siglo XIX, en Europa y en Norteamérica se realizaron intentos por clasificar los suelos; fueron propuestas que tuvieron gran impacto en la geológica, pues se definieron las características que diferencian los suelos estudiados. Al término del siglo XIX, Dokuchaev procedente de Rusia, estudió los suelos de su país fijándose en los factores que llevaron a la formación de ese suelo, a raíz de esto se propuso una clasificación de suelo en el año 1886 [14].

En el Perú se utilizan dos sistemas para su clasificación siendo el método ASSHTO y el SUCS. Esta clasificación ayuda a predecir el comportamiento de los suelos, permitiendo determinar sectores homogéneos, desde la geotecnia [18].

Clasificación de Suelos AASHTO AASHTO M-145	Clasificación de Suelos SUCS ASTM -D-2487
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-1-b	GM, GP, SM, SP
A-2	GM, GC, SM, SC
A-3	SP
A-4	CL, ML
A-5	ML, MH, CH
A-6	CL, CH
A-7	OH, MH, CH

Tabla 4: Relación entre los métodos AASHTO - SUCS [18].

### *Principales tipos de suelos*

Los suelos más comunes se describen a continuación con los nombres que generalmente usa un ingeniero para identificarlos [17]:

1. **Gravas:** Son grupos de porciones de rocas que están sueltas, según su origen cuando son movilizadas por los ríos estas sufren desgaste en sus lados y toman una forma redondeada. Su diámetro está entre dos milímetros a más esto según su procedencia [17].
2. **Arenas:** su situación es similar a las gravas, por lo general las podemos encontrar agrupadas en los mismos lugares donde se depositan. La arena de los ríos se compone mayormente por cantidades grandes de arcilla y grava [17].
3. **Limos:** compuesto por granos finos con una plasticidad muy pequeña, puede encontrarse como limo orgánico parecido a los suelos que se encuentran en los ríos, presentando una característica plástica, su resistencia es baja aún seca al horno, se desprende polvo de su superficie, se desmenuza con los dedos fácilmente [16].
4. **Arcillas:** Grupos minerales que están definidos, estos pueden ser la caolinita, illita y montmorillonita, tienen una estructura octaédricas y tetraédricas. Estos suelos a nivel microscópico son cristalinos y sus átomos se disponen en forma de láminas [16].

### *Suelos arcillosos*

#### *Definición*

Generalmente están compuestas por partículas con un aspecto de láminas con tamaños microscópicos y submicroscópicos de otros materiales como la mica, arcillas y otros que se pueden encontrar en su estructura [17].

Entonces un suelo arcilloso se puede clasificar según el tamaño de sus partículas y su nivel de plasticidad. Algunas características de las arcillas son que el volumen de sus poros es de un 98% como máximo, es plástica, cuando se seca o evacua el agua se retrae, tiene la capacidad de ser muy compresible, son muy cohesivas, por su tamaño se les puede encontrar con dimensiones de 0,002mm [16].

Nombre de la organización	Tamaño de grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	>2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	<0.002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	<0.002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U., Oficina de Reclamación de E.U., Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (p.ej., limos y arcillas) <0.075	

Tabla 5: Clasificación según el tamaño de partícula en los suelos [17].

### Características

Como los suelos arcillosos están principalmente compuestos por finos, Duque y escobar describen sus características en la siguiente tabla:

Suelo fino	Resistencia en estado seco	Dilatancia	Tenacidad	Tiempo de asentamiento
Limo arenoso	Muy baja	Rápida	Debilidad a fiable	30seg –60min
Limo	Muy baja	Rápida	Débil a fiable	15min–60min
Limo arcilloso	Baja a media	Rápida a lenta	Media	15min - varias horas
Arcilla arenosa	Baja a alta	Lenta a nada	Media	30seg- varias horas
Arcilla limosa	Media alta	Lenta a nada	Media	15min -varias horas
Arcilla	Alta a muy A	Ninguna	Alta	Varias horas a días
Limo orgánico	Baja a muy alta	lenta	Débil afiable	15min -varias horas
Arcilla orgánica	Media a muy alta	Ninguna	alta	Varias horas a días

Tabla 6: Caracterización de suelos finos de forma manual [20].

### Composición

Su composición está compuesta por una gran variedad de minerales de arcilla, principalmente divididos en tres grupos:

La caolinita, consiste en capas de láminas que se repiten estas son de sílice-gibbsita elementales, su espesor es 7.2 Å aproximadamente, estas capas se unen por los enlaces de

hidrógeno presentes. Sus partículas tienen un área de superficie por cada unidad de masa de  $15\text{m}^2/\text{g}$  aproximadamente, denominada superficie específica [20].

La illita, también llamada arcilla micácea, este tipo de arcillas se compone por dos láminas de  $\text{SiO}_4$  y entre estas se encuentra la lámina de alúmina, unidas por iones de potasio, dándole consistencia a la estructura [16]. Lateralmente estas laminas tienen una dimensión que va entre los 1000 a 5000 Å y los espesores están entre 50 a 500 Å. La superficie de las partículas es de  $80\text{m}^2/\text{g}$  aproximadamente [20].

La montmorillonita, su composición es parecida a la illita, compuesta por láminas de sílice se encuentra una lámina brucita, repitiendo esta composición indefinidamente, como un sándwich. Tiene una capacidad de intercambio de 120 me/100gr, haciendo una arcilla expansiva [16]. La diferencia es que no presenta iones de potasio y se puede extraer una gran cantidad de agua entre los espacios. Tienen dimensiones laterales, que están entre los valores de 1000 a 5000 Å y espesores de entre 10 a 50 Å. Su superficie específica es de  $800\text{m}^2/\text{g}$  [20].

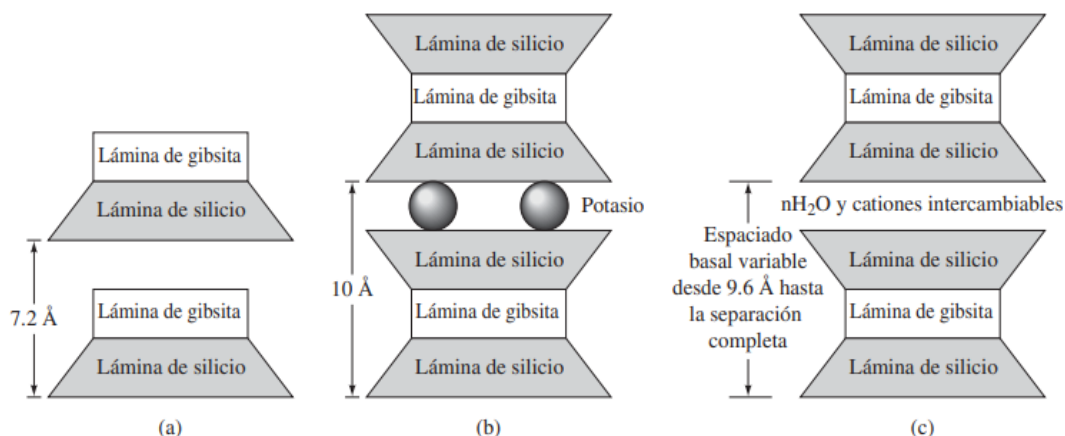


Ilustración 1: Composición estructural de la caolinita, la illita y la monmorillonita respectivamente [20].

### Estabilización de suelos

Comprende una serie de procesos mecánicos, físicos y químicos, teniendo el objetivo de transformar las propiedades de los suelos, donde se tiene interés para la ingeniería, donde se obtiene un material apto para utilizarse, buscando mejorar las propiedades de los suelos a tratar y que mantenga estas propiedades en el tiempo [1]. Buscando principalmente no solo mejorar el suelo hasta obtener una suficiente resistencia a las acciones destructivas, sino que mantenga sus propiedades mejoradas con el tiempo.

### *Tipos de estabilización de suelos*

Esto depende del tipo de suelo que se pretenda dar tratamiento, el proyectista encargado del diseño debe determinar el tipo de estabilización que sea más conveniente, encontrándose los siguientes:

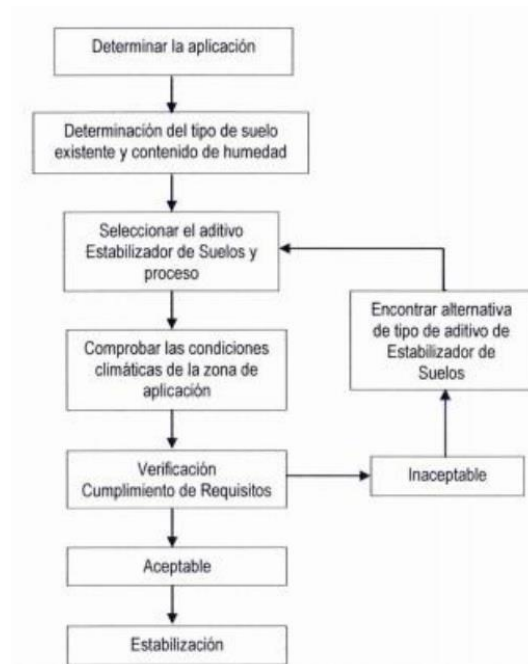
- Estabilización mecánica de suelos: Aquí se realiza la compactación, con el fin de mejorar las propiedades del suelo, principalmente la densificación de este, además de aumentar la resistencia a corte y la capacidad de resistir carga, otros beneficios de este tipo es reducir su compresibilidad y su propiedad de absorber agua [1].
- Estabilización física de suelos: Se busca aumentar la fricción, cohesión entre las partículas e impermeabilidad del suelo. Aquí se busca ajustar la granulometría de un suelo por medio de adición de material, generando un suelo resultante con mayor fricción entre sus partículas y una mayor cohesión entre todo el suelo [1].
- Estabilización fisicoquímica de suelos: Este tipo se enfoca mayormente en suelos compuestos por finos plásticos, como limos y arcillas especialmente. Por ejemplo, al adicionar hidróxido de calcio produce un intercambio de iones y cementación entre las partículas. El objetivo principal de esta estabilización es reducir la plasticidad, aumentar su resistencia a la compresión, mejorar la trabajabilidad y mejorar la estabilidad de su volumetría [1].
- Estabilización química de suelos: Se adiciona un agente hidráulico a suelos de tipo arenas, ejemplo el cemento Portland, al activarse su propiedad hidráulica con el agua, produce una reacción química, surgiendo un intercambio de iones y de cementación entre las partículas del suelo [1].

### *Criterios para estabilizar un suelo*

El MTC [18] en uno de sus manuales nos plantea ciertos criterios para identificar si se requiere la estabilización de un suelo siendo los siguientes:

- Cuando el valor de CBR sea menor al 6%, se considera como una subrasante que es inadecuada; además de los suelos que presenten zonas húmedas. Se debe tener en cuenta clasificación del suelo y principalmente enfatizar en la economía de la obra.
- Las superficies de las subrasantes deben estar arriba del nivel freático, para una subrasante extraordinaria o clasificación excelente debe estar a 0.60 m, con CBR mayor al 20%; para una subrasante buena y regular debe estar 0.80 m, con un  $6\% < \text{CBR} < 20\%$ ; para las subrasantes que se califiquen como pobres e inadecuadas, deben tener 1.00 m y 1.20 m respectivamente, con un CBR menor al 6%.
- En lugares de gran altitud con alturas mayores a los 4000 msnm, se tendrá que evaluar el suelo a su capacidad de soportar congelamiento. Los suelos que contienen limos y material fino con porcentaje superior a 3% de su peso y tamaños de partículas menores a 0.02 mm, son los que están más expuestos a sufrir daños por congelamiento.
- Cuando un suelo sea arcillosa o limosa, y se cuente con riesgo de contaminación con finos en las capas del pavimento, se debe realizar una capa anticontaminante de 10cm o más sofisticado el uso de geotextiles, siendo criterio del ingeniero.
- Se debe definir el tipo de suelo para escoger el mejor método de estabilización, los suelos que es necesario una intervención son los suelos arcillosos o limosos, por su composición.

Entonces los factores para elegir el método de estabilización es el uso que se le va a dar y el tipo de suelo a intervenir, además que aditivo se va a emplear en la estabilización, la experiencia que se tiene con este, la disponibilidad del aditivo y que se cuente con equipo adecuado, además de la economía que es muy importante. Para una buena estabilización se debe seguir los siguientes pasos:

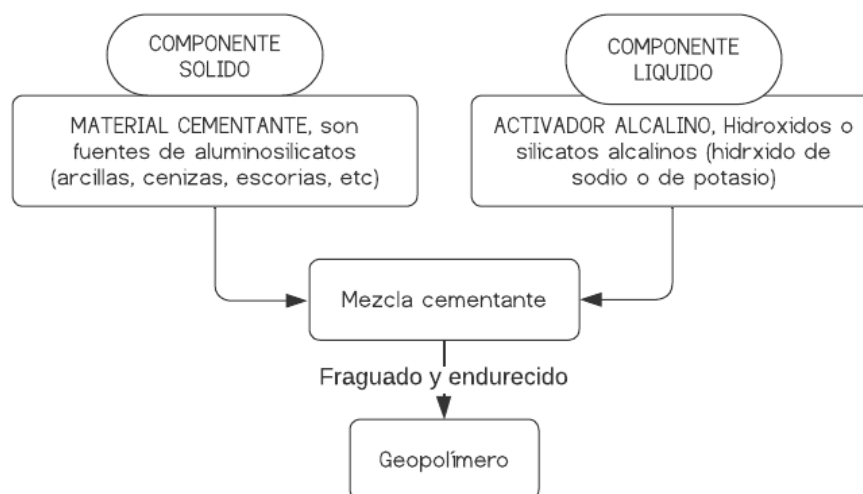


*Ilustración 2: Pasos para elegir el tipo de estabilización [18].*

### **Geopolímeros o Cementos Activados Alcalinamente (CAA)**

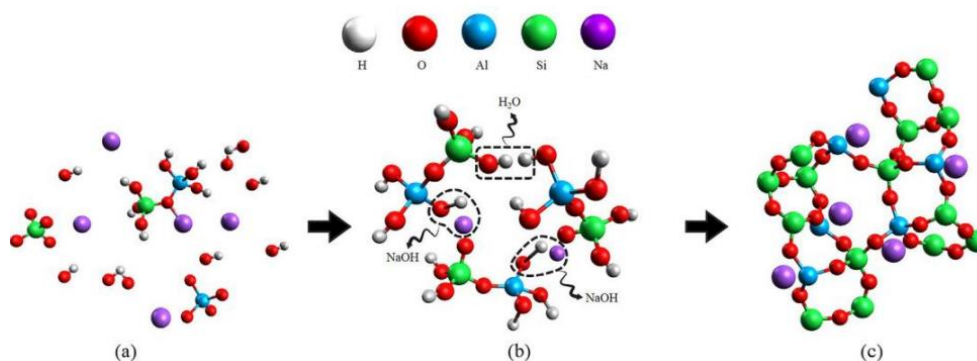
#### *Definición*

Son productos inorgánicos resultan de la combinación de materiales con elevado contenido de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) [21]. Este término se acuñó por el químico francés Joseph Davidovits por ahí de los 70s, primordialmente este proceso químico se basa en su grado de reacción que tienen los componentes, donde este es rápido cuando se tiene condiciones alcalinas con minerales de Si-Al, resultando cadenas de polímeros en 3-D y tiene una estructura de anillos que se compone de enlaces Si-O-Al-O [32].



*Ilustración 3: Esquema proceso de formación de Geopolímeros, modificado de [22]*

En general, son formados en el proceso conocido como geopolimerización, es la mezcla de un componente sólido conocido como precursor, que aporta aluminosilicatos, con una solución altamente alcalina conocida como activador, generalmente aquí encontramos el hidróxido de calcio o silicato de sodio [3]. Este proceso consiste en la disolución y reorganización de los aluminosilicatos formando varios oligómeros; y estos se conectan por la formación de gel en la condensación, llegando a la polimerización de los átomos. [23]



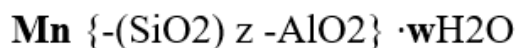
*Ilustración 4: Proceso de geopolimerización, a) Disolución y reorganización de los aluminosilicatos, b) Producción de gel a través de condensación y c) Polimerización [23]*

Este proceso permite el uso de residuos, en grandes cantidades, donde se pueden obtener productos nuevos y permite reducir el impacto ambiental que generan. [24] Esta tecnología de geo polimerización nos permite desarrollar un nuevo producto ecológico con propiedades aglomerantes a partir de residuos que contengan aluminosilicatos [25]. Resumiendo, cualquier material que contenga sílice y alúmina en su composición química se puede utilizar en un proceso de geo polimerización [26], algunos ejemplos de estos son las escorias siderúrgicas, residuos de la fabricación de metales, también las arcillas y cenizas volantes con contenidos de calcio.

### *Composición química*

Este nuevo material, los geopolímeros o también cementos activados alcalinamente, en cuanto a su estructura química es de forma amorfa semicristalina, sus redes en tres dimensiones de átomos se componen de Si-O-Al. Además, que esta estructura de redes se encuentra formada por tetraedros de SiO<sub>4</sub> (sílicio) y AlO<sub>4</sub> (aluminio) [22].

Su fórmula química de este se da por la ecuación



*Ilustración 5: Fórmula química de los geopolímeros [22]*

Donde la variable M son los cationes de K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> o Ca<sup>2+</sup>; la variable n es el nivel de policondensación que se tendrá en la geopolimerización, z es 1, 2, 3 y w representa la cantidad de agua que se utiliza en el mezclado [22].

Varias investigaciones, han comprobado que las propiedades físicas y químicas de los geopolímeros, se relacionan con la variación molar de Si/Al. Demostrando que cuando se incrementa la cantidad de Si, le conviene a mejorar los enlaces de Si-O-Si, resultando más fuertes que los enlaces formados por Al-O-Si y Al-O-Al. Simplificando al aumentar la relación Si/Al, se eleva la resistencia de los CAA o geopolímeros, esto se debe al aumento de la densidad de los enlaces Si-O-Si. [7]

### Activación alcalina

Surge por el conflicto de obtener un material alternativo al cemento portland que cuente con propiedades cementantes, pues este tipo de materiales tienen un positivo impacto ambiental, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente el CO<sub>2</sub>, que se produce en la elaboración de este aglomerante utilizado en todo tipo de obras [3].

### *Componentes en la activación alcalina*

Como materia prima o precursor generalmente se utilizan las escorias que se extraen de los procesos siderúrgicos, compuestas por alta cantidad de calcio; y cenizas volantes extraídas de la combustión de carbón u otros, que cuenten con contenido bajo de calcio; por otro lado, las arcillas mayormente de metacaolín, aunque también se pueden mezclar alguno de estos precursores [3].

En cuanto a los activadores se utilizan las sales de álcalis y las soluciones alcalinas de hidróxidos, estos son los más utilizados en la elaboración de cementos activados alcalinamente. Los activadores más disponibles son NaOH (soda caustica), Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (Carbonato de sodio), Na<sub>2</sub>O·nSi<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Generalmente la preparación de estos cementos se realiza con incorporación de precursor y activador alcalino en estado sólido, pero también puede utilizarse en forma líquida; y para proceder al amasado se utiliza agua. [3]

### *Solución alcalina*

Los líquidos alcalinos que tienen más uso en el proceso geopolimérico resulta de la mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) y/o de potasio (KOH), además de incluir el silicato de sodio o potasio [20]. En diversas investigaciones se demostró que se puede obtener las mismas reacciones alcalinas con solo un activador, además que primordialmente en el proceso geopolimérico tiene que ver con el tipo de líquido alcalino que se utilice para lograr las reacciones químicas, además que las concentraciones de estas también cumplen una función importante [27].

### **Pavimento**

Estructura que cuenta con diversas capas construida sobre la subrasante, su función es resistir las cargas que ejercen los vehículos y transmitir las a las capas inferiores, mejorando la seguridad y transpirabilidad por la vía siendo más cómoda para los usuarios, según la definición del manual de carreteras suelos y pavimentos [18].

### *Estructura de un pavimento*

Capa de Rodadura: En un pavimento es la parte superior, que puede ser de tipo flexible o de concreto con cemento Portland o de adoquines, cuya función es resistir los esfuerzos de los vehículos que transitan por ahí [28].

Base: Tiene la función de distribuir, sostener y transmitir las cargas producidas por los vehículos. Se encuentra debajo de la capa de rodadura. Esta debe tener un CBR mayor o igual a 80% y deberá usarse algún estabilizante entre ellos el asfalto, la cal que esta normada o el cemento para alcanzar la resistencia deseada [28].

Subbase: Es una capa que tiene como objetivo soportar las cargas que transmiten las capas superiores como la base y a la carpeta de rodadura. Además, se utiliza como una capa delante y como control de absorción del agua. Esta capa debe tener un CBR mayor o igual a 40%, o se debe tratar con algún estabilizante [28].

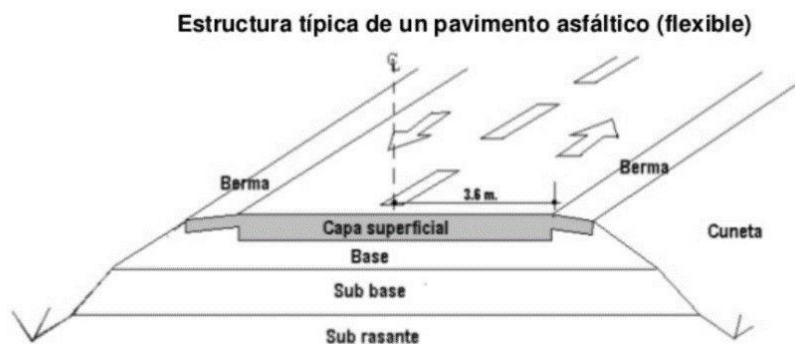


*Ilustración 6: Composición de pavimentos asfálticos [28].*

### *Tipos de pavimentos*

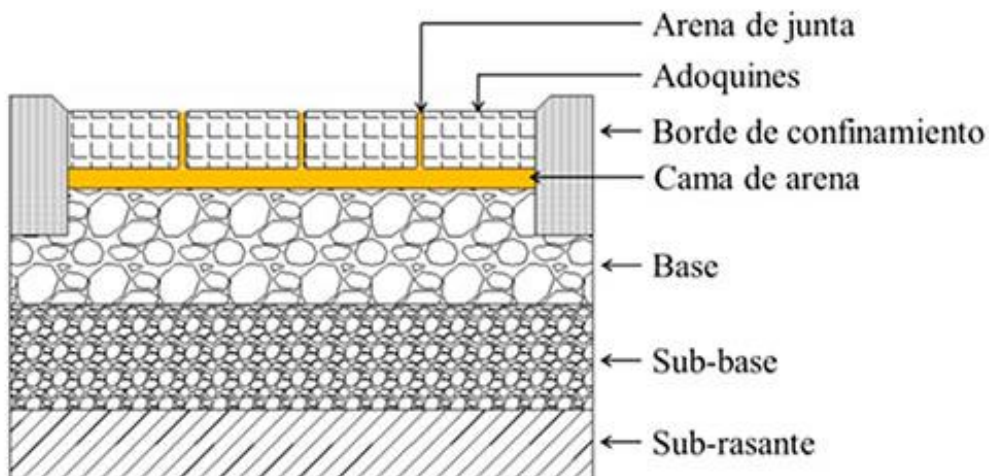
En la normativa del MTC [18] encontramos 3 tipos de pavimentos:

1. El pavimento flexible: estructura compuesta por capas granulares, siendo la subbase y base, y una capa de rodadura pro donde transitaran los vehículos hecha de materiales bituminosos, aglomerando los agregados y de ser el caso se usan aditivos que permitan una mejor estructura.



*Ilustración 7: Estructura típica de pavimentos asfálticos [29].*

2. El pavimento semirrígido: se compone por capas asfálticas, tienen una dimensión total siendo en su mayoría del tipo bituminoso; Aquí se consideran las estructuras compuestas por carpeta asfáltica sobre base tratada con cemento o con cal. Aquí también se incluyen los pavimentos adoquinados.



*Ilustración 8: Estructura típica de pavimentos adoquinados [30].*

3. El pavimento rígido: se compone primero por una subbase, esta puede ser granular o estabilizada con cemento, asfalto o cal; por otro lado, por encima de la estructura de este pavimento se encuentra la capa de rodadura hecha de concreto, agregados finos y gruesos, en el caso se tenga la necesidad se emplearán aditivos.



*Ilustración 9: Estructura típica de un pavimento rígido [29].*

### *Subrasante*

Se define como la parte a nivel de la superficie terminada de una carretera, sobre la cual se coloca el pavimento donde se movilizarán los vehículos [18]. Por otro lado, la norma peruana de pavimentos urbanos, la define como la parte superior de un terreno natural teniendo como referencia una vista de corte [31].

Cuando se quiere intervenir un suelo dándole una estabilización, para un fin de subrasante en un pavimento, el método a usar estará determinado por el valor de CBR que se obtenga. Para el uso de subrasante el valor mínimo de CBR es del 6% según lo que nos define el Manual suelos y pavimentos. Cuando se cuente con un valor menor al 6% de CBR, se debe proceder a la estabilización del suelo, donde el proyectista debe evaluar las alternativas de solución según el tipo de suelo que se necesite estabilizar. Se deben estabilizar las zonas con humedad o partes blandas que contenga el suelo [18].

### **Normatividad**

1. Ensayo de contenido de humedad de un suelo (NTP 339.127) [33]

Consiste en evaluar la relación entre el peso de agua entre su peso seco que contiene la muestra, esto se obtiene luego de 24 horas en el horno con el fin de evaporar el agua.

2. Ensayo granulométrico NTP 339.128. [33]

Este ensayo consiste en determinar la distribución de las partículas de una muestra representativa de suelo, se evalúa en porcentaje respecto al peso de la muestra inicial en condiciones secas.

3. Determinación de límite plástico, Límite Líquido e Índice de Plasticidad: MTC E 110 y MTC E 111.[33]

Este ensayo sirve para describir cual será el comportamiento que tendrán las arcillas al estar saturadas con agua y estudiar su comportamiento.

4. Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (SUCS Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) – (NTP 339.134:1999)

Nos permiten definir de manera concreta las características generales que presenta un suelo, estos métodos utilizan dos parámetros fundamentales para la clasificación, como la granulometría y límites de Atterberg.

5. Ensayo de Proctor modificado NTP 339.14. [33]

Se utiliza una energía diferente respecto al estándar. Tiene como fin determinar el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca de las muestras de suelo. Ensayo que se realiza antes que el de CBR.

6. Ensayo de CBR (laboratorio) MTC E132/ASTM D 1883. [33]

Nos permite encontrar el índice de resistencia de los suelos, se evalúa el soporte del suelo de subrasante de pavimentos. Se utilizan los datos obtenidos del ensayo de Proctor modificado, siendo el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca.

7. Resistencia a compresión en Muestra de Suelo-cemento. MTC E 1103 [33]

Tiene como objetivo este ensayo de compresión, obtener aproximadamente cual es la resistencia a la compresión de los suelos

8. Ensayo de fluorescencia y difracción de rayos x.

Técnicas que se complementan. Se realiza en cualquier material, tiene la finalidad de conocer y analizar las fases cristalinas, es el ensayo de difracción de rayos X y composición de su estructura química, siendo el ensayo de fluorescencia de rayos X.

9. Ensayo de succión en muestras de suelo.

Tipo de ensayo que mide el tiempo que requiere el agua libre para ascender por capilaridad, midiendo el porcentaje de absorción de la muestra de suelo.

## **Materiales y métodos**

### **Tipo y nivel de investigación**

#### *Tipo de investigación*

Es de tipo experimental, buscando medir que propiedades cambian en las muestras de suelo, a través de los ensayos que realizaremos en laboratorio.

#### *Nivel de investigación*

Será de tipo correlacional, pues se analizarán los resultados que encontremos en laboratorio respecto a las propiedades del suelo sin la estabilización planteada.

## **Diseño de investigación**

### **Hipótesis**

La estabilización con geo polímero elaborado de cerámica reciclada mediante activación alcalina influye positivamente en las propiedades de las muestras de suelo, pudiendo usarse como subrasante mejorada.

Objeto de estudio: Suelo arcilloso para subrasante.

Variable independiente: Geo polímero elaborado de cerámica reciclada.

Variable dependiente: Propiedades de los suelos arcillosos.

## Población y muestra

### Población

Para la presente investigación, la población de estudio será el suelo arcilloso extraído por conveniencia por el investigador, que estén dentro del departamento de Lambayeque. También la cerámica que se reciclara de diferentes puntos.

### Muestra

Son las muestras de suelo arcilloso del departamento de Lambayeque, se realizarán 3 calicatas con una profundidad no menor de 1.50m. Serán muestras con proporciones de 200 kg de suelos, extraídas de las diferentes calicatas en distintos puntos de estudio, para luego ser sometidas a los diferentes ensayos de laboratorio. El tipo de muestra es no probabilística por ello las muestras que se recolectan son a criterio del investigador.

GRUPO	DENOMINACION	PRE ENSAYOS	TRATAMIENTO	POST ENSAYOS
GRUPO DE CONTROL	SUELO NATURAL	Ensayo granulometrico NTP 339.128, Ensayo para determinar LL, LP e IP (NTP 339.129), Ensayo de contenido de humedad (NTP 339.127), , Ensayo de proctor modificado (NTP 339.141), Ensayo de CBR MTC E132/ASTM D 1883, Ensayo de compresion suelo-cemento MTC E 1103, Ensayo de succion en muestras de suelo.	SIN ACTIVACION ALCALINA	Ensayo para determinar LL, LP e IP NTP 339.129, Ensayo de proctor modificado NTP 339.141 Y Ensayo de CBR MTC E132/ASTM D 1883, Ensayo de compresion suelo-cemento MTC E 1103, Ensayo de succion en muestras de suelo.
GRUPO EXPERIMENTAL	SUELO+10%GEOPOLIMERO		ACTIVACION ALCALINA SODA CAUSTICA /CONCENTRACION OPTIMA, RELACION CERAMICA/SOLUCION 2:1)	
	SUELO+20%GEOPOLIMERO			
	SUELO+30%GEOPOLIMERO			

Tabla 7: Diseño de muestras. Elaboración propia.

#### FABRICACIÓN DE GEOPOLIMERO

ENSAYOS	GEOPOLIMERO (MORTEROS)		CURADO	MUESTRA	CONSIDERACIONES
	PRECURSOR	MOLARIDAD DE LA SOLUCION			
RESISTENCIA A COMPRESION	CERAMICA	12 M	7 DÍAS	6	TRABAJABILIDAD
			14 DÍAS	6	RELACION PRECURSOR/SOLUCION ALCALIUNA 0.4
			28 DÍAS	6	24H EN AMBIENTE HERMETICO, CURADO 7, 14 Y 28 DÍAS AIRE LIBRE
MUESTRA TOTAL			TOTAL	18	

Tabla 8: Muestra fabricación de geo polímero. Elaboración propia.

SUELO + GEOPOLIMERO

ENSAYOS	GEOPOLIMERO	MUESTRA
<b>GRAN. POR TAMIZADO</b>	0% de estímulo	3
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b>	0% de estímulo	3
<b>PROCTOR</b>	0% de estímulo	3
	10% de estímulo	3
	20% de estímulo	3
	30% de estímulo	3
<b>Límite plástico Límite Líquido Índice de Plasticidad</b>	0% de estímulo	3
	10% de estímulo	3
	20% de estímulo	3
	30% de estímulo	3
<b>Índice de CBR</b>	0% de estímulo	3
	10% de estímulo	9
	20% de estímulo	9
	30% de estímulo	9
<b>Succión</b>	0% de estímulo	3
	10% de estímulo	3
	20% de estímulo	3
	30% de estímulo	3
<b>MUESTRA TOTAL</b>		<b>72</b>

*Tabla 9: Muestras por ensayo. Elaboración propia.*

ENSAYO	GEOPOLIMERO DE CERAMICA	MUESTRA (DIAS)			MUESTRAS
		7	14	28	
<b>COMPRESION EN MUESTRAS DE SUELO</b>	0% de estímulo	3	3	3	<b>9</b>
	10% de estímulo	3	3	3	<b>9</b>
	20% de estímulo	3	3	3	<b>9</b>
	30% de estímulo	3	3	3	<b>9</b>
<b>MUESTRA TOTAL</b>					<b>36</b>

*Tabla 10: Muestras para compresión en muestras de suelo por calicata. Elaboración propia.*

## Operacionalización de variables

VARIABLES INDEPENDIENTES				
VARIABLE	INDICADOR	RANGO DE APLICACIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	METODO DE MEDICION
Geopolimero elaborado de ceramica reciclada	% en peso	10	%	Balanza
		20		
		30		

Tabla 11: Variables independientes. Elaboración propia

VARIABLES DEPENDIENTES				
VARIABLE	DIMENSION	INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	METODO DE MEDICION
Propiedades de los suelos	Propiedades físicas	Granulometria	mm	Ensayo granulometrico NTP 339.128
		Plasticidad	%	Ensayo para determinar LL, LP e IP NTP 339.129
		Contenido de humedad	%	Ensayo de contenido de humedad NTP 339.127
		Succión	cm/s	Ensayo de succión en muestras de suelo
	Propiedades mecánicas	Maxima densidad seca	g/cm <sup>3</sup>	Ensayo de proctor modificado NTP 339.141
		% óptimo de humedad	%	Ensayo de proctor modificado NTP 339.141
		Compresión de suelos	kg/cm <sup>2</sup>	Compresión en Muestra de Suelo-cemento MTC E 1103
		Indice de CBR	%	Ensayo de CBR MTC E132/ASTM D 1883

Tabla 12: Variables dependientes. Elaboración propia.

VARIABLES INTERVINIENTE		
VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	METODO DE MEDICION
Plasticidad del suelo	%	Limites de Atterberg
Tiempo de curado para ensayo compresión en muestras de suelo	Día	7, 14 y 28
Diametro de cerámica pulverizada	mm	Tamiz #30
Reacion Agua/precursor	0.4	Balanza
Molaridad de la solución alcalina	12 M	-
Análisis estructura química de la cerámica	-	Ensayo de fluorescencia y difracción de rayos x

Tabla 13: Variables intervinientes. Elaboración propia.

## Matriz de consistencia

TITULO	OBETIVOS	PREGUNTA DE INVESTIGACION	HIPOTESIS	VARIABLES	OPERACIONALIZACION DE VARIABLES
Estabilización química de suelos cohesivos con geopolímero elaborado de cerámica reciclada mediante activación alcalina para subrasante mejorada	<b>Objetivo general</b>  Realizar una evaluación físico-mecánica de los suelos con adición de geo polímero elaborado con cerámica y activación alcalina de hidróxido de sodio, con la finalidad de usarse como subrasante mejorada	¿Cuál es la influencia en la estabilización con geo polímero elaborado de cerámica reciclada mediante activación alcalina en las propiedades de los suelos arcillosos para uso como subrasante mejorada?	La estabilización con geo polímero elaborado de cerámica reciclada mediante activación alcalina influye positivamente en las propiedades de las muestras de suelo, pudiendo usarse como subrasante mejorada.	<b>Variable independiente:</b> Geopolímero elaborado de cerámica reciclada	Se evaluara el comportamiento que genera el geopolímero de ceramica reciclada en las muestras de suelo, en 3 porcentajes 10%, 20% y 30% respecto al peso del suelo.
	<b>Objetivos específicos</b>  Caracterizar las propiedades del suelo en el que se realizará la estabilización  Proponer un procedimiento para la obtención de cerámica reciclada  Establecer la estructura química de la cerámica mediante el ensayo de fluorescencia y difracción de rayos x			<b>Variable dependiente:</b> Propiedades de los suelos arcillosos	Evaluaremos las muestras de suelos a través de la revisión de las NTP 339.128, MTC E109, NTP 339.129, AASHTO T125 – 66, NTP 339.127, NTP 339.141, NTP 339.141, MTC E132/ASTM D 1883
	Analizar estadísticamente los resultados de los ensayos en suelos estabilizados con geo polímero elaborado de cerámica  Comprobar los efectos de la geo polimerización en el tiempo en las propiedades de los suelos  Determinar el efecto de la estabilización química con geo polímero de cerámica reciclada mediante una evaluación de impacto ambiental  Evaluar técnica y económicamente la estabilización química con geo polímero elaborado de cerámica, comparándolo con método de estabilización tradicional			<b>Variable interviniente:</b> Plasticidad de los suelos, Diametro ceramica pulvirezada, relacion agua/precursor y molaridad de solucion alcalina, tiempo de curado.	Plasticidad de los suelos según ensayo de Límites de Atterberg. Diametro de la ceramica pulverizada malla #30. Relacion agua/precursor sera 0.4 y molaridad de 12M de la solución alcalina, tiempo de curado muestras de suelo.

## Resultados y discusión

### Resultados

A continuación, se detallarán los materiales y procedimientos que se realizaron para desarrollar el programa experimental de esta investigación. Previo a la fase experimental, se empezó con recolección de materiales que se utilizaron en el desarrollo de la presente tesis.

#### *I. Caracterizar las propiedades del suelo en el que se realizará la estabilización.*

##### Procedimiento para el muestreo de suelo arcilloso

El suelo extraído es fino (arcillosos y limos), obtenido de diferentes zonas. El material es de textura suave. Para el muestreo se excavaron tres (03) calicatas con una profundidad de 1.50 m en promedio, retirando 0.10 metros de la parte superior esto para evitar material orgánico. Al realizar las calicatas se encontró estratos con material cohesivo, acorde a esto se tomaron las muestras a 0.60 m de la superficie o descartando el material de relleno.

A continuación, las siguientes tablas se apreciamos la ubicación de las calicatas realizadas en diferentes zonas. Además, la tabla N° 14 contiene las coordenadas donde se ubican las calicatas de estudio.

CUADRO UBICACIÓN DE CALICATAS		
N ° DE CALICATAS	COORDENADAS UTM ZONA 17 M	
C-01	625371 m E	9249658 m S
C-02	626749 m E	9249566 m S
C-03	622097 m E	9246917 m S

*Tabla 14: Coordenadas de puntos de extracción.*

Las muestras extraídas se caracterizaron por separado, con el fin de que exista diferencia entre estos evaluando el estabilizador de geo polímero elaborado de cerámica. Para tener una mejor comprensión de los datos se les codifico de la siguiente manera:

DESCRIPCIÓN	CODIFICACIÓN
Calicata – N ° 01	C-01
Calicata – N ° 02	C-02
Calicata – N ° 03	C-03

*Tabla 15: Codificación de las diferentes calicatas.*



a) Urb. la purísima-Chiclayo



b) Intersección Av. Colectora - Ca. Santa Rosa



c) Intersección Av. La Garita - La Joyita

*Ilustración 10: Ubicación de puntos de investigación. a) Calicata 01, b) Calicata 02 y c) Calicata 03.*

En la ilustración N° 11 se observa el entorno en donde se realizaron las calicatas. Estas se realizaron en zonas libres, con el fin de obtener una muestra de suelo no alterada por las actividades humanas, por lo antes mencionado el suelo se le dio el tratamiento adecuado para no alterarlo y mantener sus características de un suelo natural.



a) Urb la purísima-Chiclayo



b) Intersección Av. Colectora - Ca. Santa Rosa



c) Intersección Av. La Garita - La Joyita

*Ilustración 11: Zonas de excavación de calicatas. a) Calicata N° 01, b) Calicata N° 02 y c) Calicata N° 03.*

### Caracterización del suelo natural

#### 1. Contenido de humedad Natural.

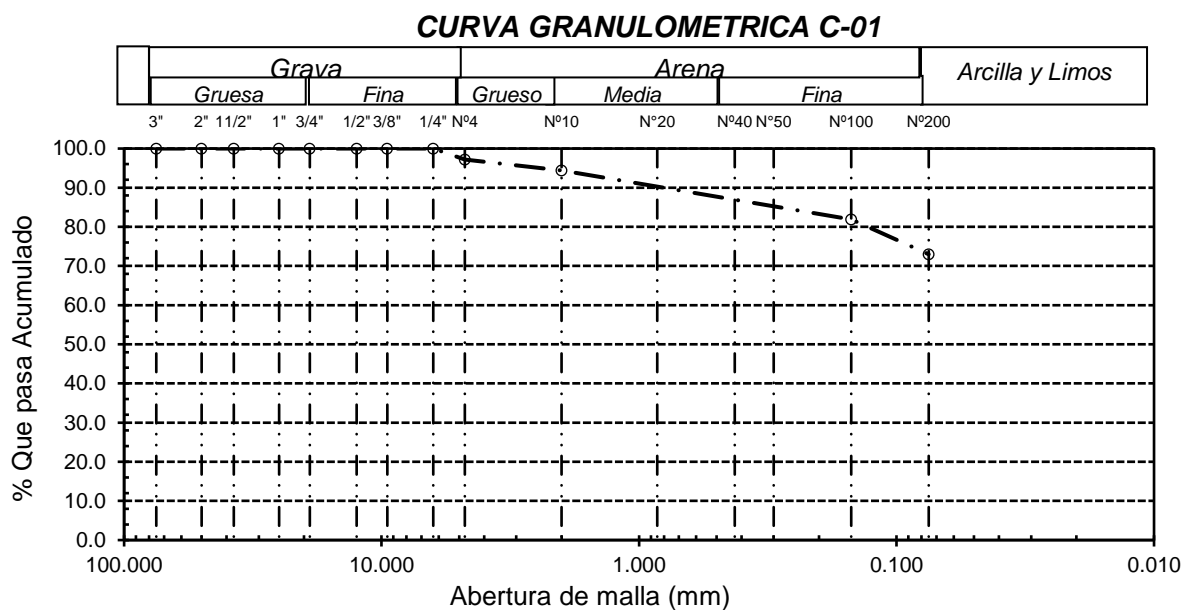
Una vez realizadas las tres calicatas en las diferentes zonas de estudio, se extrajeron muestras de suelo con una cantidad aproximada de 250 gr, se colocaron en bolsas herméticas y fueron llevadas al laboratorio para realizar el ensayo y así determinar el porcentaje de humedad del suelo natural. Estas muestras fueron extraídas de una profundidad aproximada de 0.60m. Se muestra en la tabla 16 la humedad natural de cada calicata.

CALICATA N °	C - 01	C - 02	C - 03
MUESTRA N °	M-01	M-01	M-01
PROFUNDIDAD	0.10 m – 1.50 m	0.10 m – 1.50 m	0.10 m – 1.50 m
HUMEDAD NATURAL	16.0 %	21.2 %	18.8 %

Tabla 16: Humedad natural según calicata.

#### 2. Análisis granulométrico por tamizado (MTC E 107 - NTP 339.128:1999)

Se realizaron los procedimientos de ensayo de la norma MTC E107 siendo el ensayo de granulometría por tamizado esto para cada calicata, a continuación, se detallan los resultados.



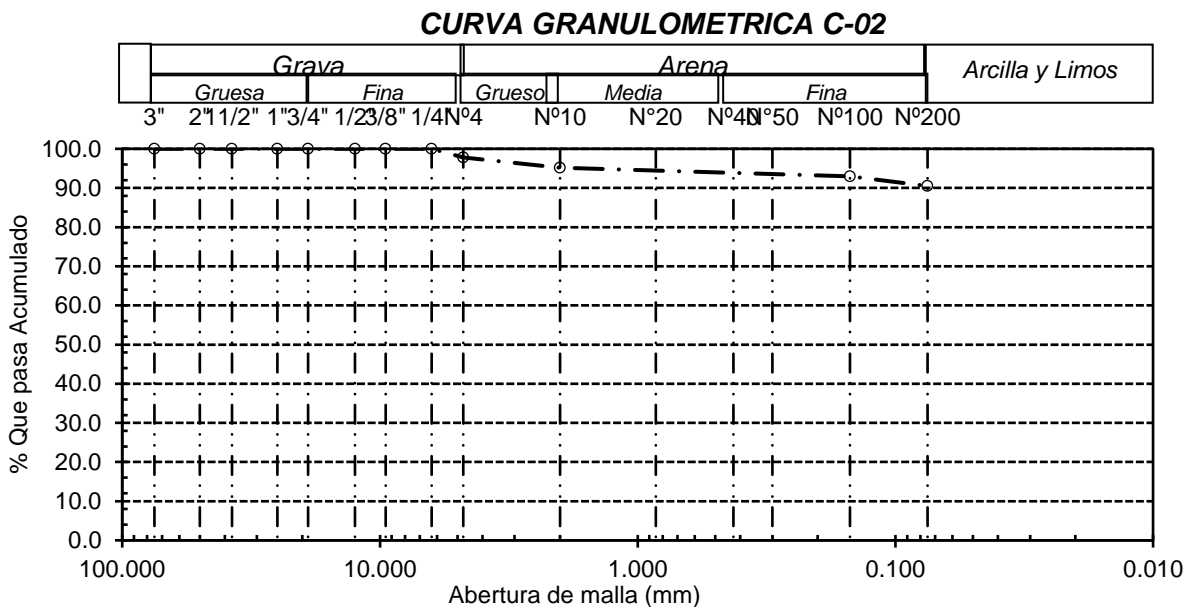


Gráfico 2: Granulometría de suelo natural calicata 02.

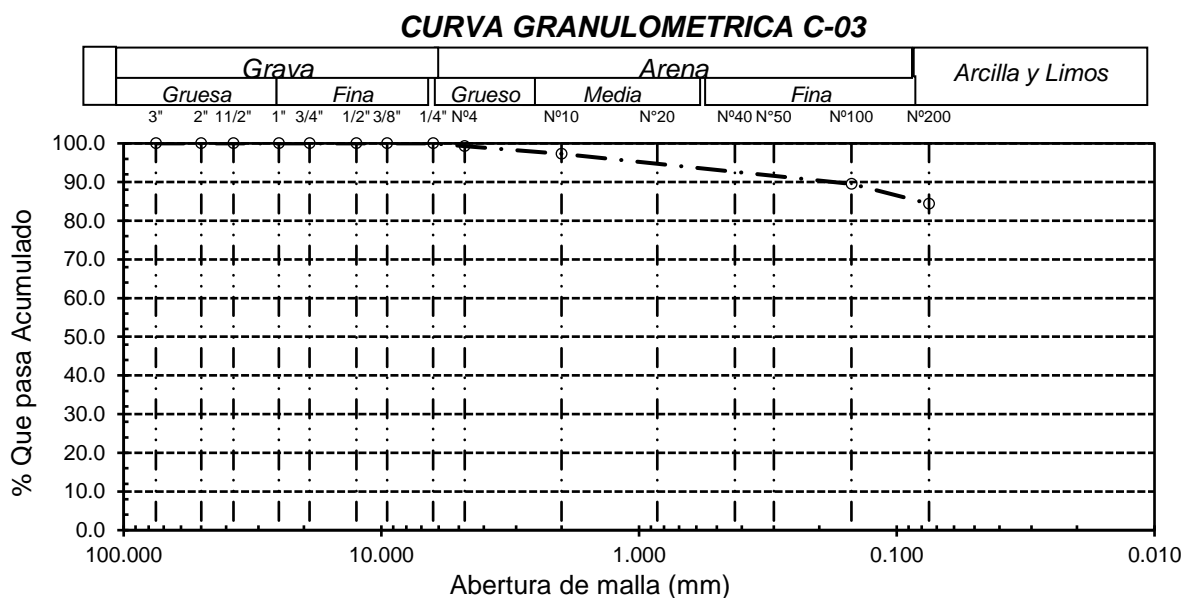


Gráfico 3: Granulometría de suelo natural calicata 03.

DESCRIPCION	DISTRIBUCION GRANULOMETRICA		
	C-01	C-02	C-03
Grava (%)	2.8	2.2	0.7
Arena (%)	24.2	7.3	14.9
Limo y arcilla (%)	73.0	90.5	84.4

Tabla 17: Distribución granulométrica del suelo natural por calicata.

### 3. Límites de Atterberg

Aquí se detallan los resultados encontrados para determinar el límite líquido (LL), este siguiendo los procedimientos de la normativa MTC E 110 para la realización del ensayo. Para encontrar el límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) se siguió los procedimientos de la normativa MTC E 111.



*Ilustración 12: Realización del ensayo de límites de Atterberg para muestra natural por calicata.*

Codificación	LÍMITES DE ATTERBERG		
	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
C-01	42.07	25.91	16.17
C-02	39.69	30.25	9.45
C-03	37.67	25.62	12.05

*Tabla 18: Límites de Atterberg por calicata.*

#### 4. Gravedad específica de sólidos

En la tabla 19 muestra los valores obtenidos en cuanto al ensayo de gravedad específica de sólidos del suelo, este fue realizado a las 3 calicatas.



*Ilustración 13: Procedimiento ensayo de gravedad específica.*

Calicata	Gs (g/cm <sup>3</sup> )
C-01	2.737
C-02	2.688
C-03	2.786

*Tabla 19: Gravedad específica por calicata.*

#### 5. Clasificación de suelos

Una vez encontrados los resultados de los anteriores ensayos, se procedió a clasificar el suelo, se utilizaron las metodologías SUCS y AASHTO.

- **Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)**

Para la clasificación mediante SUCS, se necesitan los resultados de la distribución granulométrica y límites de Atterberg, determinando con estos datos la siguiente clasificación.

Calicata N°01:

- Se tuvo que para el tamiz N ° 4 el material que pasa es 97.2% y por otro lado para el tamiz N ° 200 es 73%, además cuenta con un índice de plasticidad de 16.17%, indicándonos que es un suelo arcilloso con una plasticidad baja con arena (CL).

Calicata N°02:

- Se tuvo que para el tamiz N ° 4 el material que pasa es 97.8% y por otro lado para el tamiz N ° 200 es 90.5%, además cuenta con un índice de plasticidad de 9.45%, indicándonos que es un limo de baja plasticidad (ML).

Calicata N°03:

- Se tuvo que para el tamiz N ° 4 el material que pasa es 99.3% y por otro lado para el tamiz N ° 200 es 84.4%, además cuenta con un índice de plasticidad de 12.05%, indicándonos que es un limo de baja plasticidad con arena (ML).

- **Clasificación de suelos basada en AASHTO**

En función de la granulometría, los límites de Atterberg y el índice de grupo del suelo en estudio, procedemos a determinar su respectiva clasificación por calicata.

Calicata N°01:

- El material pasante por el tamiz N ° 200 es 73.0%, esto es un indicador de suelo fino.
- Su LL es 42.07% y un IP de 16.17%, determinando un índice de grupo igual a 11. Determinándose un suelo arcilloso A-7-6 (11).

Calicata N°02:

- El material pasante por el tamiz N ° 200 es 90.5%, esto es un indicador de un suelo fino.
- Su LL es 39.69% y un IP de 9.45%, determinando un índice de grupo igual a 9. Determinándose un suelo limoso A-4 (9).

Calicata N°03:

- El material pasante por el tamiz N ° 200 es 84.4%, esto es un indicador de un suelo fino.
- Su LL es 37.67% y un IP de 12.05%, determinando un índice de grupo igual a 9. Determinándose un suelo arcilloso A-6 (9).

## 6. Proctor

En la tabla N°20, se muestra los resultados del ensayo Proctor, siendo la Máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad, siendo los resultados que se requiere para el ensayo de C.B.R. esto realizado para las tres calicatas.

	SUELO NATURAL		
	C - 01	C - 02	C - 03
<b>Máxima densidad seca (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>	1.71	1.56	1.73
<b>Óptimo contenido de Humedad (%)</b>	18.25	18.34	14.90

Tabla 20: Proctor modificado del suelo natural por calicata.

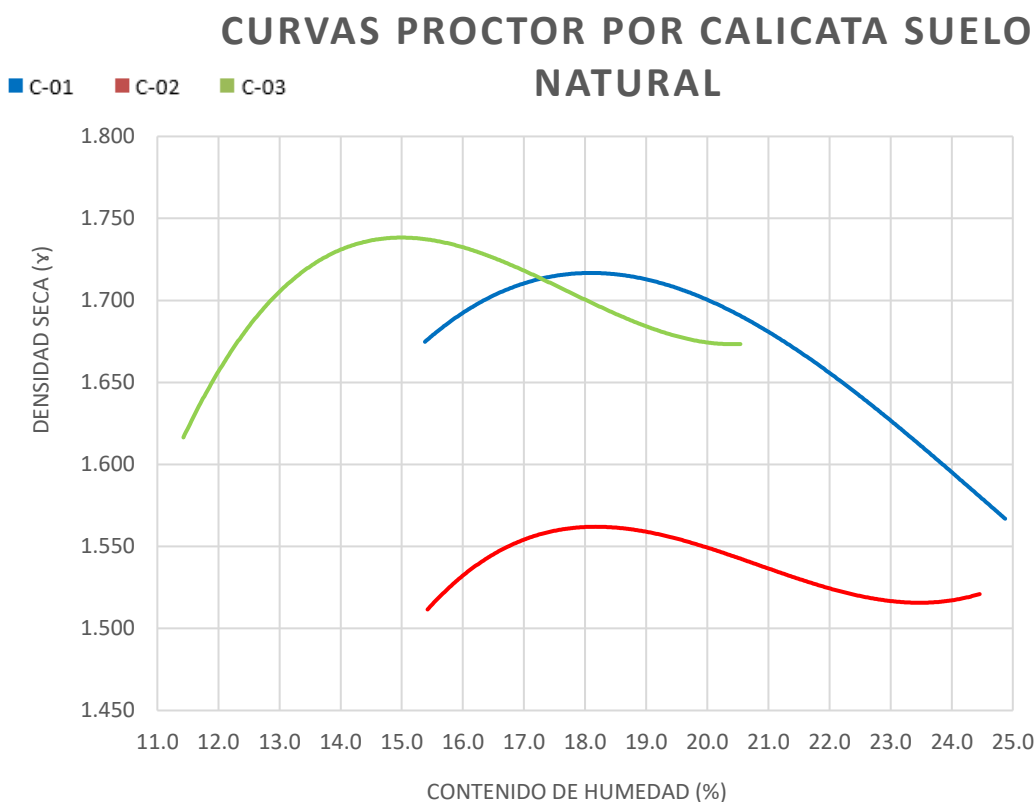


Gráfico 4: Curvas de compactación por calicata.

## 7. Relación de soporte de California (C.B.R.)

La tabla N°21 muestra el valor de C.B.R. del suelo. Las muestras se prepararon según los resultados obtenidos en el ensayo de Proctor encontrando la humedad óptima, para luego ser compactadas. Las muestras se sumergen en agua durante 4 días, para luego realizar la caracterización mecánica por penetración.



*Ilustración 14: Moldes de C.B.R. Compactación, medición, sumersión y penetración.*

C.B.R. para el	SUELO NATURAL		
	C - 01	C - 02	C - 03
95% de la M.D.S. (%)	5	5	3
100% de la M.D.S. (%)	5	11	3

*Tabla 21: C.B.R. del suelo natural por calicata.*

## ***II. Proponer un procedimiento para la obtención de cerámica reciclada.***

### ***Procedimiento para la recolección de cerámica reciclada***

Se procedió a visitar diferentes botaderos donde se encontraron residuos de cerámica que son desechados y no tienen otro uso. En cuanto a la recolección, se realizó en un terreno donde se acepta desmote y otros residuos, ubicado en la carretera Pimentel Km 9. (ver ilustración 15)



*Ilustración 15: Lugar de recolección de cerámica.*

Este material reciclado se compone de cerámica residuales de construcciones (ver ilustración 15), que son desechados. La cantidad recolectada fue en promedio de 80 kg, necesarios para toda la investigación.

Estos residuos de cerámica para la elaboración del geo polímero debe ser añadido en forma de polvo, entonces al ser un material recolectado de reciclaje se procedió a su lavado, triturado y molienda.

Primera etapa, se realizó la limpieza de la cerámica con agua a presión, con el fin de eliminar toda impurezas que alteren los resultados de la investigación. Luego se dejó secar por un tiempo de 24 horas. En todo el proceso de manipulación de los residuos cerámica se deben tener en cuenta las adecuadas medidas de seguridad, como guantes de seguridad, casco, polo con manga larga, pantalón grueso, mascarilla y botas. (ver ilustración 15)

Segunda etapa, una vez realizada la limpieza de la cerámica reciclada se procedió a la trituración manual, con la finalidad que estos sean manejables ilustración 16. Se utilizaron herramientas como comba y martillo, estos se colocaron en sacos esto para evitar accidentes pues al romperse tiene contornos muy afilados. El material resultante se aprecia en la ilustración 16.



*Ilustración 16: Proceso de adecuación de la cerámica reciclada. Lavado, secado y triturado manual.*

Tercera etapa, se realizó la molienda en la máquina de los ángeles, esto para dejar el material con un aspecto de polvo para la elaboración del geo polímero.



*Ilustración 17: Molienda en máquina de los ángeles.*

**III. Establecer la estructura química de la cerámica mediante el ensayo de fluorescencia y difracción de rayos x.**

**Caracterización estructura química de la cerámica**

*Análisis por difracción y fluorescencia de rayos x*

Para conocer la estructura química de la cerámica y conocer los elementos químicos presentes en el material precursor, se realizó el ensayo de fluorescencia de rayos x, la muestra analizada fue de 0.5119 g de polvillo de cerámica, tamizada por la malla N ° 200.

COMPOSICION QUIMICA	RESULTADOS (%)	METODO UTILIZADO
Dióxido de silicio (Si O <sub>2</sub> )	43.97	Espectrometría de fluorescencia de rayos x
Oxido de calcio (Ca O)	8.16	
Trióxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	17.82	
Trióxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	10.08	
Oxido de potasio (K <sub>2</sub> O)	1.09	
Oxido de magnesio (Mg O)	0.17	
Pentóxido de fosforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1.52	
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0.29	
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	0.026	
Oxido de zinc (Zn O)	0.114	
Oxido de manganeso (Mn O)	<0.01	
Perdida por quemado	16.76	

*Tabla 22: Composición química de la cerámica.*

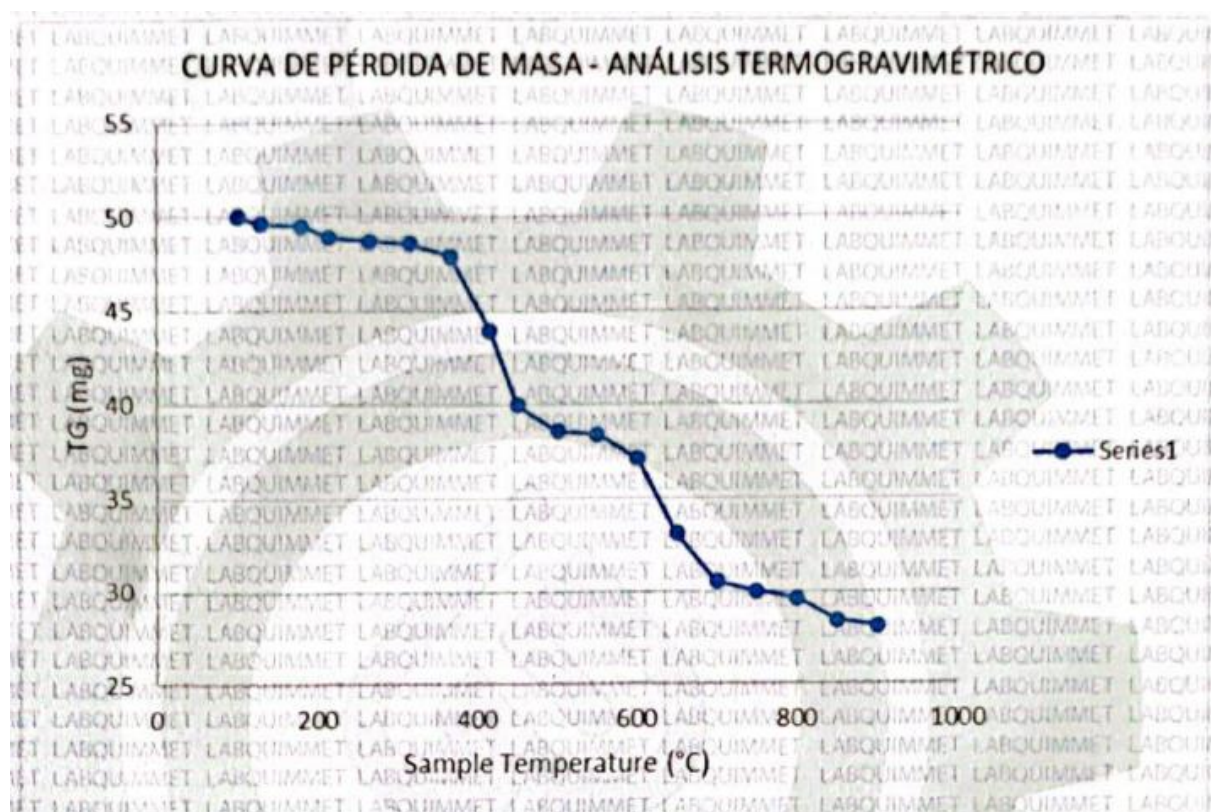
Se realizó la comparación del espectro de la muestra analizada con las energías características de los elementos de la tabla periódica a partir del sodio, se encontró principalmente Sílice (Si), Aluminio (Al) y hierro (Fe) en un alto porcentaje. Siendo estos los principales responsables de producir el efecto geo polimérico. Por otro lado, en menores cantidades se encontró Potasio (K), fosforo (P), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Azufre (S) y Zinc (Zn).

### *Análisis térmico diferencial*

Se realizó con el fin de determinar su pérdida de masa con respecto a la temperatura, se analizó una muestra de 35 mg de polvillo de cerámica, obteniéndose la siguiente curva TGA (análisis termogravimétrico) y ATD (análisis termo diferencial).

#### Condiciones del ensayo

- Rango de temperatura fue de 25 – 920 °C
- Tasa de calentamiento fue de 20 °C/min

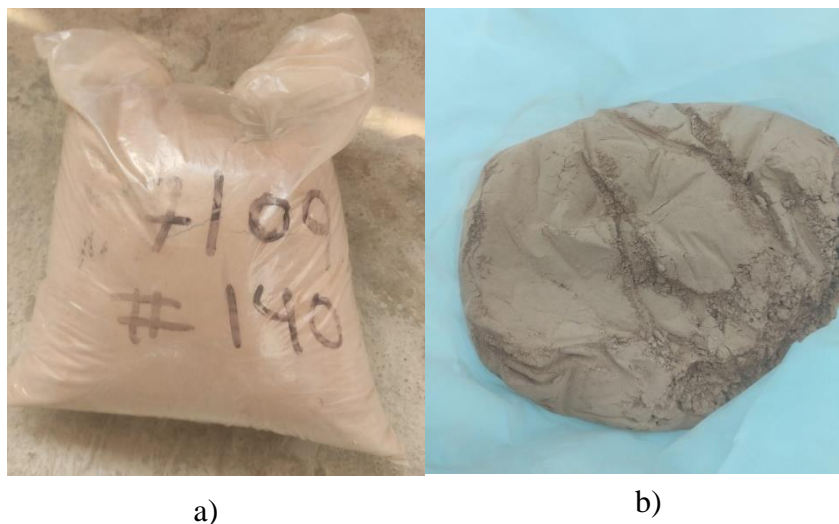


*Gráfico 5: Curva de pérdida de masa – análisis termogravimétrico.*

Según el análisis Termo gravimétrico nos muestra la pérdida de masa en función a la temperatura donde al analizar el grafico se observa dos zonas que se hace más intensa la pérdida de masa, el primero es en un rango de 390 y 500 °C y la segunda menos intensa entre 600 y 700°C, luego la perdida es gradual. El material llega a perder un aproximado de 17% de masa, respecto a la masa inicial a la temperatura máxima de ensayo.

### Caracterización y fabricación del geo polímero

Una vez realizado todo el procedimiento para a preparación del material cerámico, tenemos el material molido se procede a pasar por la malla N° 140, con el fin de obtener un material fino que pueda moldearse en probetas de 5x5x5cm, esto es para la etapa de la fabricación del geo polímero.



*Ilustración 18: a) cantidad de material por la malla N ° 140. b) Aspecto final cerámica tamizada.*

### *Ensayo de gravedad específica de sólidos de la cerámica*

Una vez teniendo el material triturado y tamizado se procedió a realizar este ensayo, dando los siguientes resultados.



*Ilustración 19: Ensayo de gravedad específica.*

A continuación, se muestra los datos y resultados del ensayo de gravedad específica que se le realizó a la cerámica triturada.

<b>DATOS</b>	
Peso de la fiola (g)	90.19
Peso de la muestra seca (g)	50
Peso de la muestra + peso de fiola (g)	140.2
Peso de la fiola + agua	339.08
Peso de la muestra + peso de fiola + agua (g)	369.85

*Tabla 23: Datos del ensayo de gravedad específica de la cerámica.*

Una vez obtenidos los datos se procede a calcular la gravedad específica de las partículas sólidas  $G_s$ , con la siguiente expresión:

$$G_s = \frac{S_s}{S_w} = \frac{M_s}{M_s + M_{pw} - M_{pws}}$$

Donde:

$M_s$ : Muestra de sólidos seca al horno (g)

$M_{pw}$ : Masa de la fiola más agua (g)

$M_{pws}$ : Masa de la fiola con agua y sólidos (g)

<b>RESULTADOS</b>	
Gravedad específica $G_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.701

*Tabla 24: Resultados gravedad específica.*

## Caracterización solución alcalina

### *Evaluación de la temperatura*

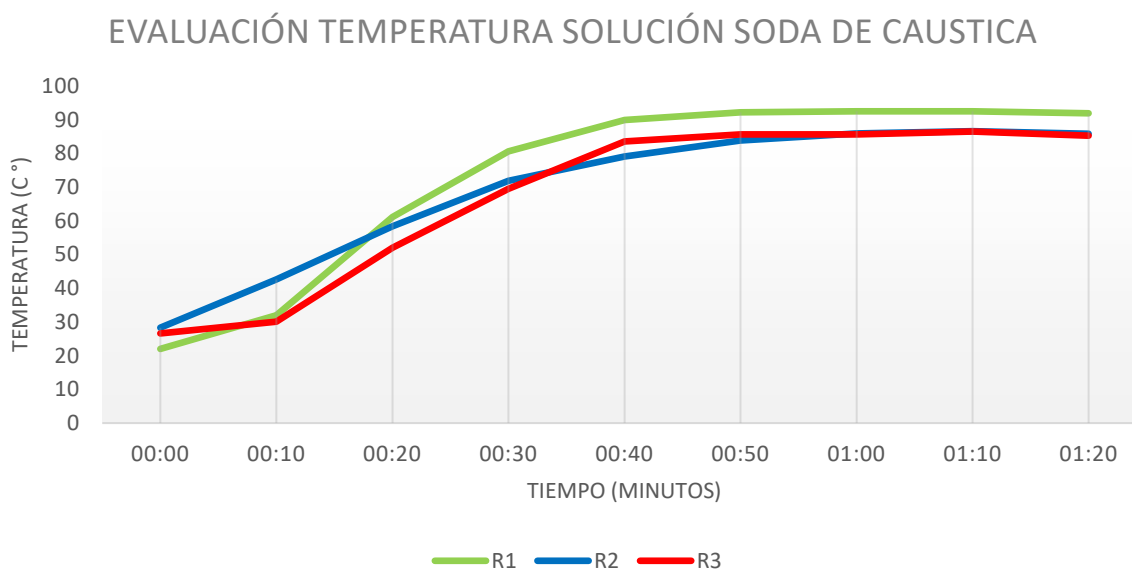
Se evaluó la temperatura que alcanza este material, pues se produce una reacción exotérmica al entrar en contacto con el agua, los resultados que se obtuvieron son los siguientes:



*Ilustración 20: Medición de temperatura inicial y temperatura máxima.*

Tiempo (Minutos)	Temperatura (C °)		
	R1	R2	R3
0:00	22.0	28.3	26.6
0:10	32.0	42.6	30.1
0:20	61.1	58.4	52.0
0:30	80.6	71.9	69.5
0:40	89.9	79.1	83.6
0:50	92.2	83.8	85.6
1:00	92.5	85.9	85.6
1:10	92.5	86.6	86.5
1:20	91.9	85.8	85.3

*Tabla 25: Resultados temperatura reacción solución soda caustica.*



*Gráfico 6: Evolución de la temperatura, reacción solución de soda caustica.*

La temperatura de la soda caustica al entrar en contacto con el agua, aumenta de manera muy rápida denotando que en un periodo de 30 segundos incrementa desde los 20 a 80 C °, luego de ese periodo la temperatura llega a un máximo de 90° C en promedio, para luego decrecer progresivamente hasta la temperatura ambiente.

### *Evaluación de pH*

El pH o potencial de hidrogeno es un índice que se utiliza en la química, este expresa el grado de acidez o alcalinidad de un líquido acuoso. En este caso se realizó la medida de este índice en la solución de soda caustica, se utilizó el medidor multiparámetro, dando el siguiente resultado:



*Ilustración 21: Preparación de la muestra para evaluación de pH.*



*Ilustración 22: Medición de pH, mediante medidor multiparámetro.*

La medición del medidor multiparámetro, se realizó una vez terminada la reacción térmica y la temperatura de la solución se haya estabilizado, esto con el fin de evitar mediciones erróneas. Al iniciar el ensayo se tuvo mediciones inferiores, siendo necesario esperar hasta alcanzar el mayor valor, siendo este de un **pH de 12.12**, estando en el rango de alcalinidad. Pues el pH o potencial de hidrogeno es la medida de acidez o alcalinidad. Se mide en una escala de 0 – 14, siendo 7 el valor neutro, valores inferiores a este se considera acidez y superiores de alcalino. [34]

Una vez caracterizados los materiales que componen el geo polímero, se procede a realizar el diseño de mezcla para la preparación del geo polímero, siguiendo los siguientes parámetros.

- Material precursor: Cerámica tamizada por la malla N ° 140, esto debido a que según los antecedentes mientras más fino el material el proceso de geo polimerización será mejor.
- Molaridad de la solución alcalina: 12M, teniendo el mejor resultado según los antecedentes.
- Relación Agua/Cerámica: 0.3, 0.4 y 0.5. Al finalizar la experimentación para elegir la mejor relación en cuanto a la trabajabilidad se eligió 0.4. Teniendo en cuenta el siguiente diseño.

**Fórmulas para la determinación de parámetros de diseño del geo polímero**

- Relación agua precursor (A/P): es la cantidad de agua en la que se disolverán los activantes alcalinos, y así obtener una pasta homogénea y trabajable.

$$\text{Relacion Agua/precursor} = \frac{\text{cantidad de agua}}{\text{cantidad de ceramica}}$$

En esta investigación se utilizará una relación A/P de 0.4 para obtener una pasta trabajable.

- Molaridad (M): medida de concentración de un soluto en una disolución.

$$\text{Molaridad} = \frac{\text{Masa}}{\text{Masa molar} \times \text{Volumen de agua (Lt)}}$$

Con esta fórmula se pudo encontrar la cantidad de activador alcalino que se debe disolver en la cantidad de agua requerida, esto para obtener una solución alcalina al 12 Molar.

**Diseño de mezcla del geo polímero**

A continuación, se muestra el diseño del geo polímero, para posteriormente ser sometidos a compresión y comprobar la activación alcalina de las muestras de ge polímero.

Diseño para una cantidad de cerámica de 1500 g.

- Para la cantidad de agua en el precursor:

$$\text{Relacion Agua/precursor} = \frac{\text{cantidad de agua}}{\text{cantidad de ceramica}}$$

$$0.4 = \frac{\text{cantidad de agua}}{1500}$$

$$\text{cantidad de agua} = 600 \text{ ml}$$

- Para la cantidad de soda caustica en la solución al 12M:

$$\text{Molaridad} = \frac{\text{Masa}}{\text{Masa molar} \times \text{Volumen de agua (Lt)}}$$

$$12 = \frac{\text{Masa}}{40 \times 0.600}$$

$$\text{Masa} = 288 \text{ g}$$

Diseño final:

<b>Cantidad de cerámica</b>	1500 g
<b>Agua</b>	0.600 lt
<b>Soda caustica</b>	288 g

*Tabla 26: Diseño final de ge polímero, etapa de fabricación.*

Una vez realizado el diseño del ge polímero se procede a preparar la mezcla y colocar en los moldes. Se realizaron probetas de 50 mm x 50 mm x 50 mm, para luego ser sometidas a compresión, con un tiempo de curado de 7, 14 y 28 días y así comprobar la activación de la cerámica mediante la solución alcalina de soda caustica.

A continuación, se muestra la preparación de las muestras de ge polímero.

1. Pesar cantidad de residuos de cerámica, soda caustica y agua.



*Ilustración 23: Pesaje de la cantidad de material.*

2. Preparar la solución alcalina, mezclando la soda caustica y agua. Girar a una velocidad constante hasta que se disuelva todo el material.



*Ilustración 24: Preparación de solución alcalina.*

3. Añadir la solución alcalina a la cantidad de cerámica, girar a una velocidad constante hasta formar una pasta.



*Ilustración 25: Preparación de geo polímero.*

4. El geo polímero se compactó en moldes de 50x50x50 mm (Ilustración 26) en 3 capas, para cada capa se dieron 64 golpes en 8 etapas de 8 golpes esto fue en una dirección perpendicular, asegurándose que sea una compactación uniforme y evitando la presencia de vacíos en el material.



*Ilustración 26: Llenado, desmoldado de probetas cúbicas.*

**Determinación resistencia a la compresión del geo polímero sintetizado a diferentes tiempos de curado.**

En esta etapa de la investigación, se analizó la resistencia a la compresión de cada probeta a tiempos de curado de 7, 14 y 28 días, de acuerdo con la tabla 27. Esto para demostrar la activación alcalina de la cerámica reciclada y formación de un geo polímero.



*Ilustración 27: Muestras cúbicas de geo polímero elaborado de cerámica.*

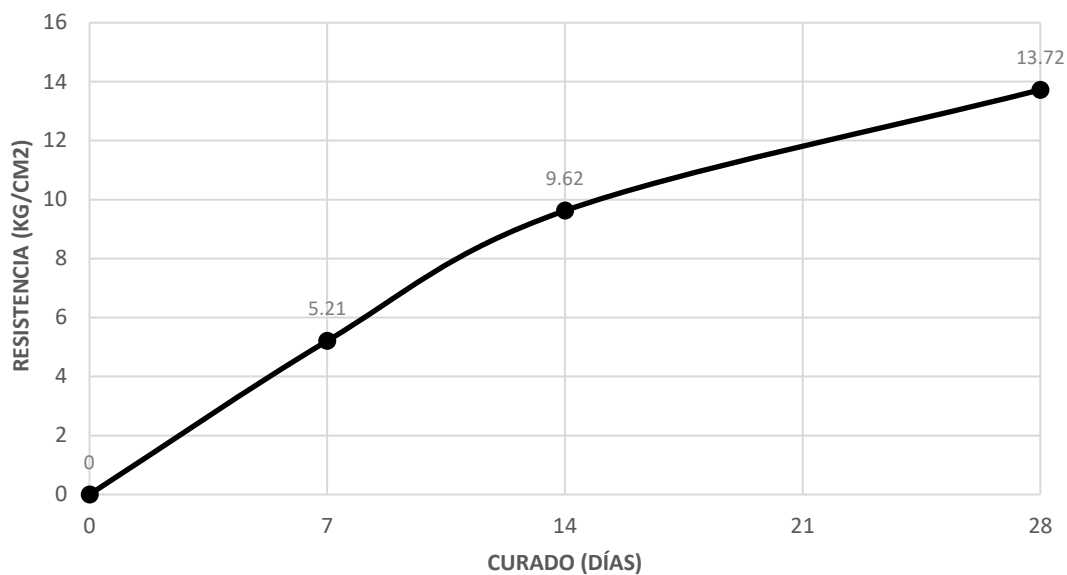


*Ilustración 28: Ensayo de probetas cúbicas en máquina de compresión.*

MUESTRA	RESISTENCIA SEGÚN TIEMPO DE CURADO (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
M-1	5.20	9.42	14.23
M-2	5.19	9.66	13.87
M-3	5.25	9.62	14.07
M-4	5.17	9.58	13.54
M-5	5.23	9.62	13.34
M-6	5.20	9.83	13.30
PROM. DE FUERZA (Kg/cm <sup>2</sup> )	5.21	9.62	13.72

*Tabla 27: Datos de resistencia a la compresión de probetas de geo polímero.*

## RESISTENCIA A LA COMPRESION PROMEDIO MUESTRAS DE GEO POLIMERO



*Gráfico 7: Línea de evolución de resistencia a la compresión promedio.*

Se observa en la gráfica que la resistencia a la compresión aumenta, lo cual al adicionar el geo polímero al suelo ayudara a mejorar sus propiedades mecánicas, además que se comprueba la activación alcalina. Por otro lado, se muestra el aspecto que tienen las muestras de geo polímero según el tiempo de curado, a los 28 día se observa como cristales en la parte superficial.



*Ilustración 29: Aspecto de muestras de geo polímero según tiempo de curado.*

**IV. Analizar estadísticamente los resultados de los ensayos en suelos estabilizados con geo polímero elaborado de cerámica.**

**Caracterización mecánica suelo-geo polímero**

Para esta etapa de la investigación se utilizó la cerámica que pasa por la malla #30, esto para asemejarse a la granulometría de un agregado fino y siguiendo los parámetros antes presentados para el diseño del geo polímero.

**1. Límites de Atterberg**

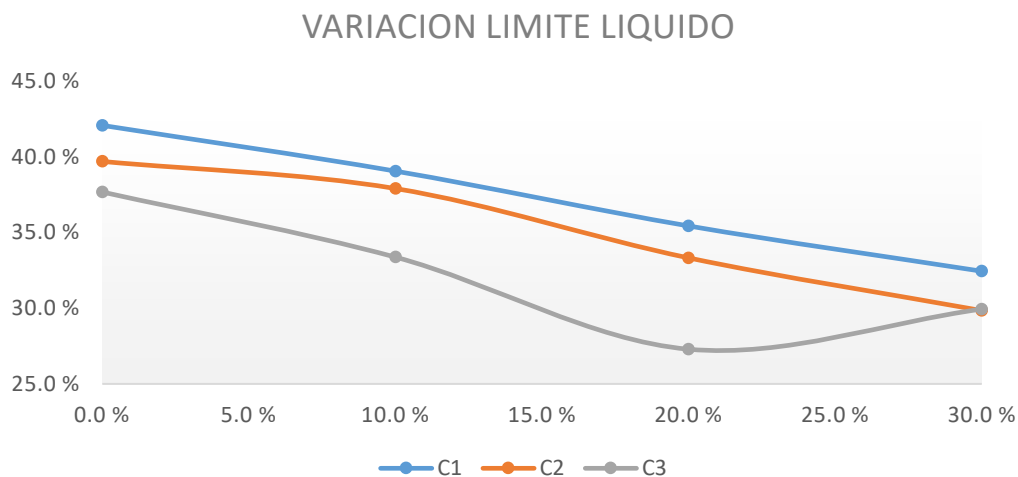
A continuación, se muestra la variación de los límites de Atterberg, según el porcentaje de adición de geo polímero para cada calicata.



*Ilustración 30: Preparación de la muestra para el ensayo de Límites de Atterberg.*

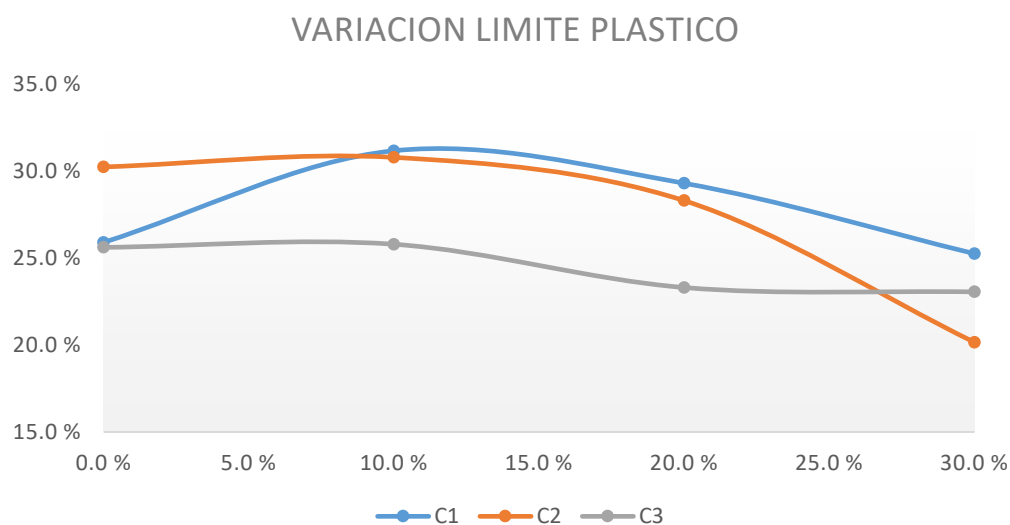
Codificación		LÍMITES DE ATTERBERG		
		Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
C-01	Natural	42.07	25.91	16.17
	10%	39.05	31.18	7.87
	20%	35.43	29.31	6.13
	30%	32.44	25.26	7.18
C-02	Natural	39.69	30.25	9.45
	10%	37.90	30.80	7.10
	20%	33.32	28.31	5.02
	30%	29.84	20.16	9.68
C-03	Natural	37.67	25.62	12.05
	10%	33.37	25.80	7.57
	20%	27.29	23.31	3.98
	30%	29.94	23.06	6.88

*Tabla 28: Variación del índice de plasticidad según calicata.*



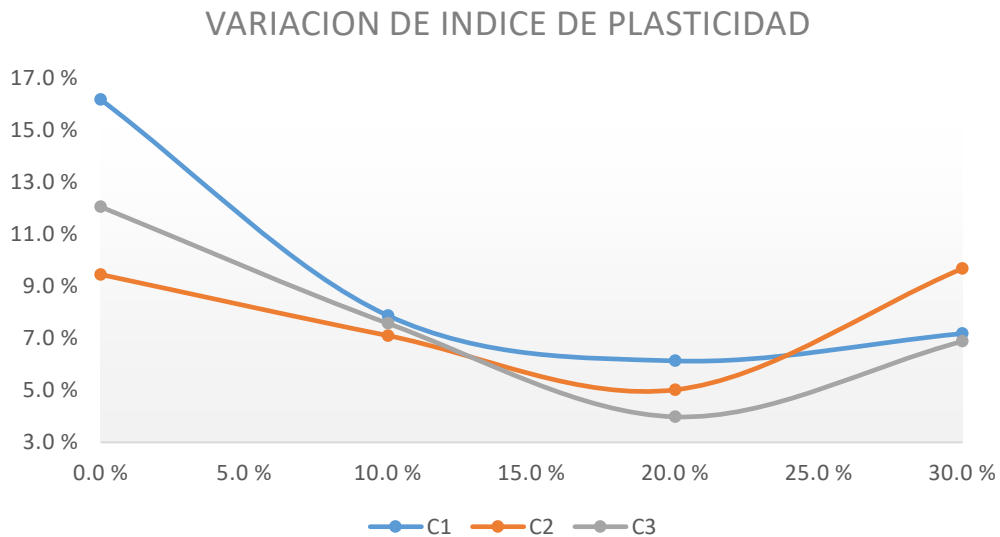
*Gráfico 8: Variación LL según porcentaje de geo polímero.*

Se observa una reducción progresiva en cuanto al límite líquido, según aumenta el porcentaje de adición. Tendiendo a la baja en todo momento. Donde se observa que la reducción de mayor valor se da con 30% de geo polímero, siendo drástico hasta alcanzar valores inferiores a los de las muestras naturales.



*Gráfico 9: Variación LP según porcentaje de geo polímero.*

En cuanto al límite plástico, se observa un aumento con el porcentaje de adición del 10%, pero al seguir aumentando el porcentaje de adición este se reduce hasta valores inferiores o similares a las muestras naturales, como sucede en la C-01, esto puede deberse al tipo de suelo. Teniendo como mejor resultado la adición de 30%, en la C-02.



*Gráfico 10: Variación IP según porcentaje de geo polímero.*

Para el índice de plasticidad, se observa una reducción significativa en las adiciones de 10% y 20%; sin embargo, esta vuelve a aumentar para la adición de 30%, pero siendo todos estos valores muy inferiores a los índices de plasticidad de la muestra natural. Resultando la adición de Geo polímero beneficioso para la reducción del índice de plasticidad.

## 2. Proctor

A continuación, en la tabla 29 se detallan los resultados que se obtuvieron de los ensayos de Proctor de las mezclas de suelo-geo polímero con una activación alcalina al 12 M, estas se realizaron con el fin de poder conocer la relación de humedad y densidad seca máxima de las mezclas, para la elaboración de las muestras de C.B.R. y resistencia a la compresión.



*Ilustración 31: Procedimiento para la realización del ensayo de Proctor modificado suelo-geo polímero.*

	C - 01		C - 02		C - 03	
	Máxima densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Optimo contenido de humedad (%)	Máxima densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Optimo contenido de humedad (%)	Máxima densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Optimo contenido de humedad (%)
Suelo	1.71	18.25	1.56	18.34	1.73	14.90
S90/GP10	1.87	15.50	1.76	16.50	1.85	15.96
S80/GP20	2.08	15.35	1.78	16.82	1.93	12.50
S70/GP30	2.13	15.25	1.85	15.41	2.00	11.00

Tabla 29: Cuadro de resultados de Proctor modificado de las diferentes dosificaciones de geo polímero.

### CURVAS PROCTOR POR ADICION C-01

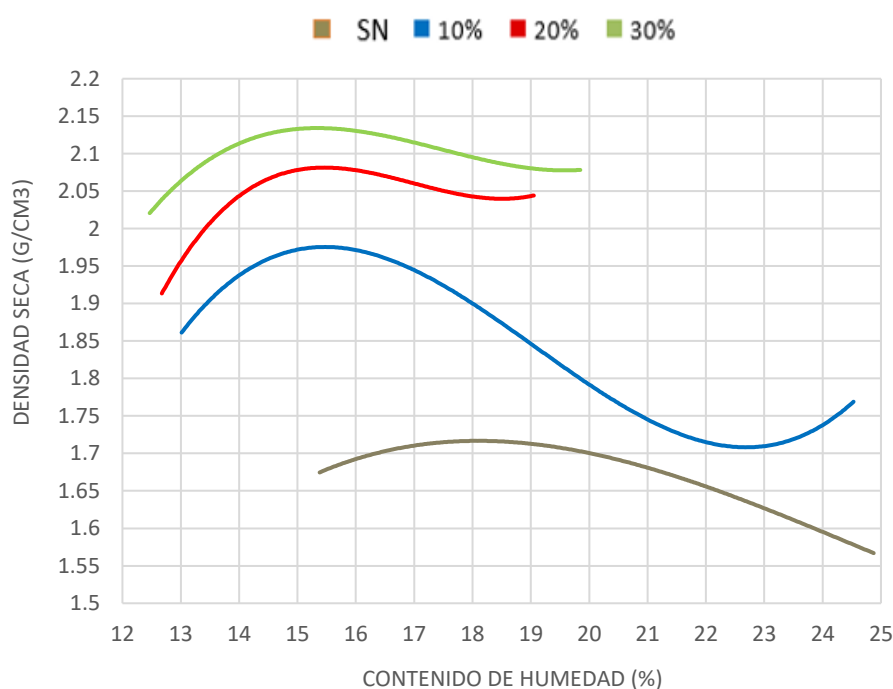


Gráfico 11: Curvas de compactación suelo-geo polímero C-01.

El gráfico anterior se aprecia como modifica el geo polímero de cerámica la Máxima Densidad Seca del suelo natural. Se observa que la MDS aumenta a medida que incrementa el porcentaje de geo polímero de cerámica, mientras que el Optimo Contenido de Humedad disminuye. Esto puede explicarse debido a que las reacciones geo poliméricas y el calentamiento que produce la solución alcalina de hidróxido de sodio, sucede el fenómeno de la floculación, produciendo el agrupamiento de las partículas de la cerámica a través de la reacción química [11]. Este fenómeno sigue ocurriendo en todas las calicatas, variando según el tipo de suelo u otras características que puedan afectar la reacción del geo polímero, como se muestra en los siguientes gráficos.

### CURVAS PROCTOR POR ADICION C-02

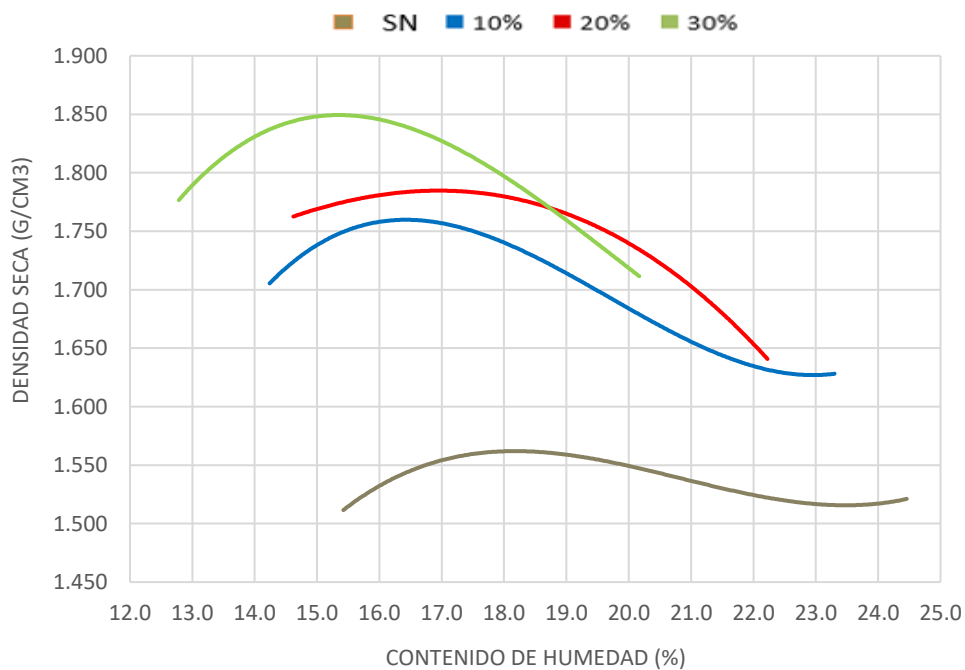


Gráfico 12: Curvas de compactación suelo-geo polímero C-02.

### CURVAS PROCTOR POR ADICION C-03

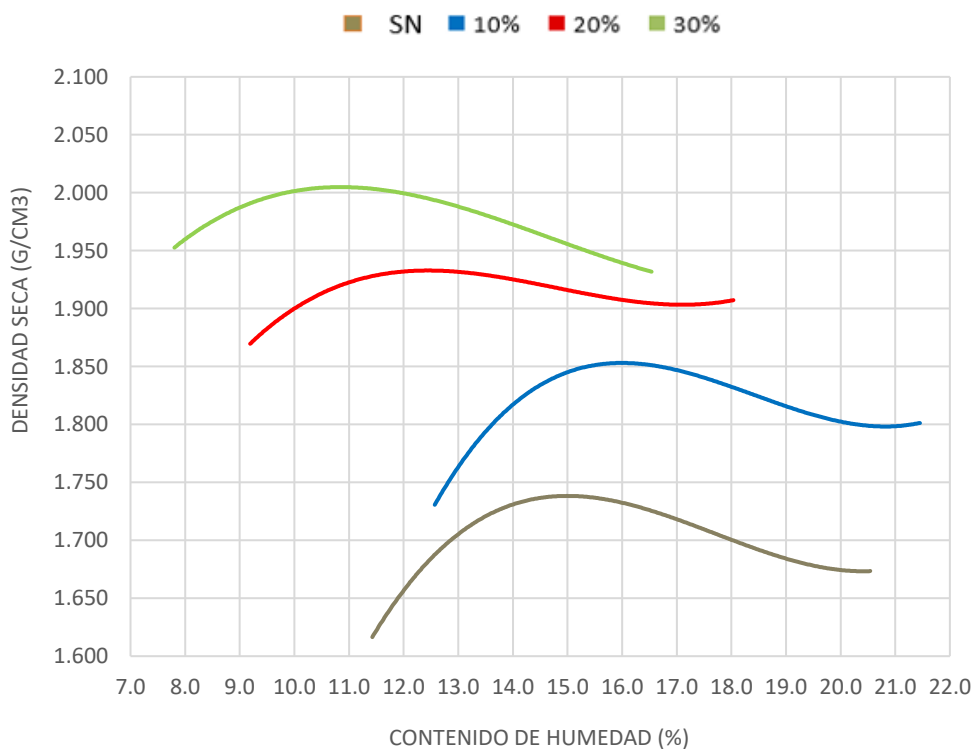
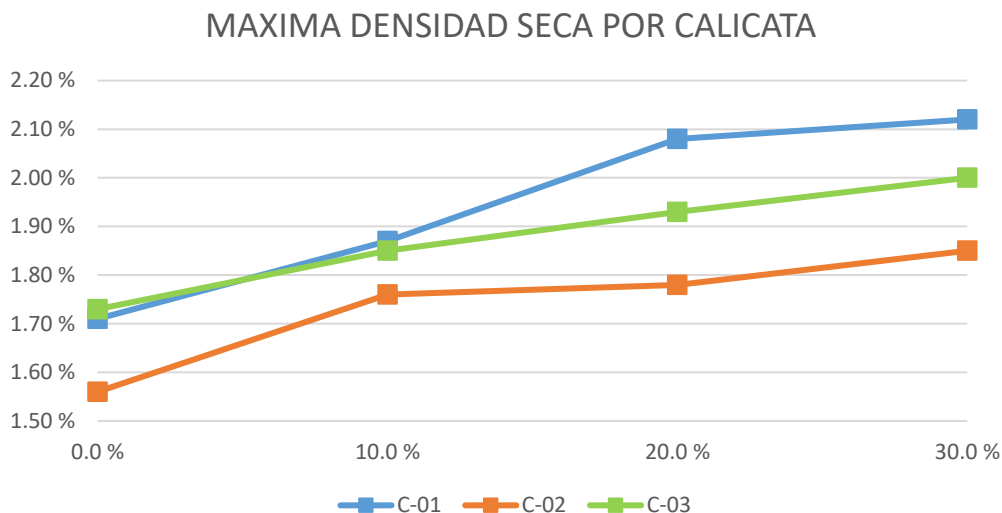


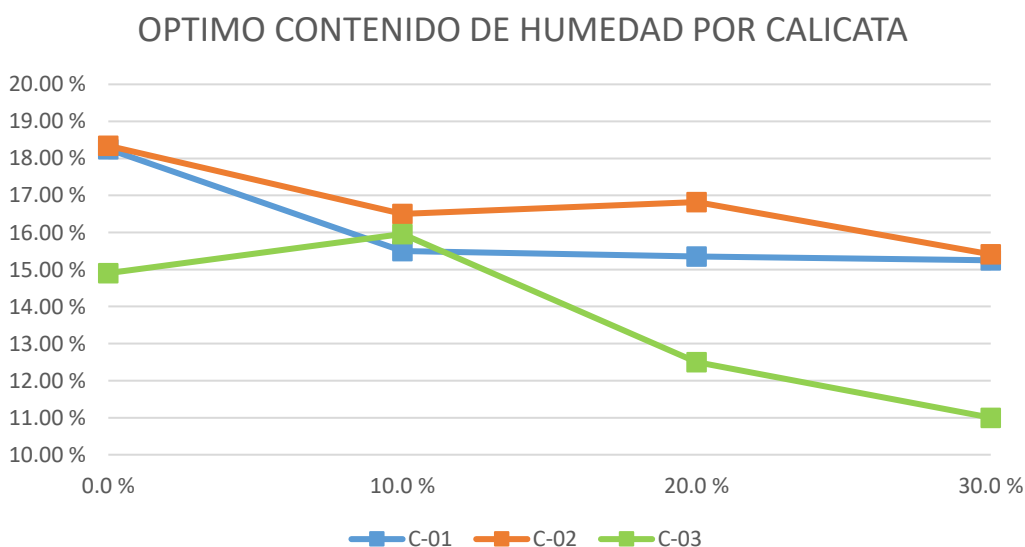
Gráfico 13: Curvas de compactación suelo-geo polímero C-03.

Se observa que para las tres calicatas se visualiza que al incrementar el porcentaje de geo polímero de cerámica aumenta su Máxima Densidad Seca inicial del suelo, siendo el de mejores resultados la adición de 30%. Se observa un incremento para la C-01 de 1.71 del suelo natural a 1.87, 2.00 y 2.12 g/cm<sup>3</sup>, para la C-02 de 1.56 del suelo natural a 1.76, 1.78 y 1.85 g/cm<sup>3</sup> y para la C-03 aumento de 1.73 a 1.85, 1.93 y 2.00 g/cm<sup>3</sup>.



*Gráfico 14: Variación de MDS por calicata suelo-geo polímero.*

En cuanto al Optimo Contenido de Humedad, también disminuye según se aumenta el porcentaje de geo polímero de cerámica, sucediendo el mismo comportamiento en todas las calicatas lo que se puede deducir que este material produce efectos beneficiosos para diferentes suelos cohesivos o finos.



*Gráfico 15: Variación de OCH por calicata suelo-geo polímero.*

### 3. Relación de soporte de California (C.B.R.)

En la siguiente tabla se muestra los valores de expansión e índices de C.B.R. al 95% de su densidad seca, del suelo natural con la adición de geo polímero de cerámica reciclada mediante activación alcalina. Para la realización de este ensayo se tuvo la consideración de saturar la muestra, dejarla en un depósito hermético durante 24h, esto para dejar que la muestra se enfríe y las partículas se saturan por completo, para luego ser compactada; una vez compactada se dejó reposar 3 días antes de ser sumergidas al agua durante 96 horas, los valores de C.B.R se presentan a continuación.



*Ilustración 32: Procedimiento ensayo de CBR Suelo-Geo polímero de cerámica.*

		Índice de C.B.R. (%)		
		95% DMS		
MUESTRA		C-01	C-02	C-03
SUELO NATURAL		5	5	3
S90/GP10 (10%)	R1	63	49	64
	R2	52	51	63
	R3	59	50	64
	PROM	58	50	64
S80/GP20 (20%)	R1	116	85	85
	R2	113	86	80
	R3	109	83	94
	PROM	113	85	86
S70/GP30 (30%)	R1	148	126	110
	R2	154	128	103
	R3	148	114	111
	PROM	150	123	108

*Tabla 30: Resultados de índices de C.B.R. de suelo natural con la adición de geo polímero de cerámica.*

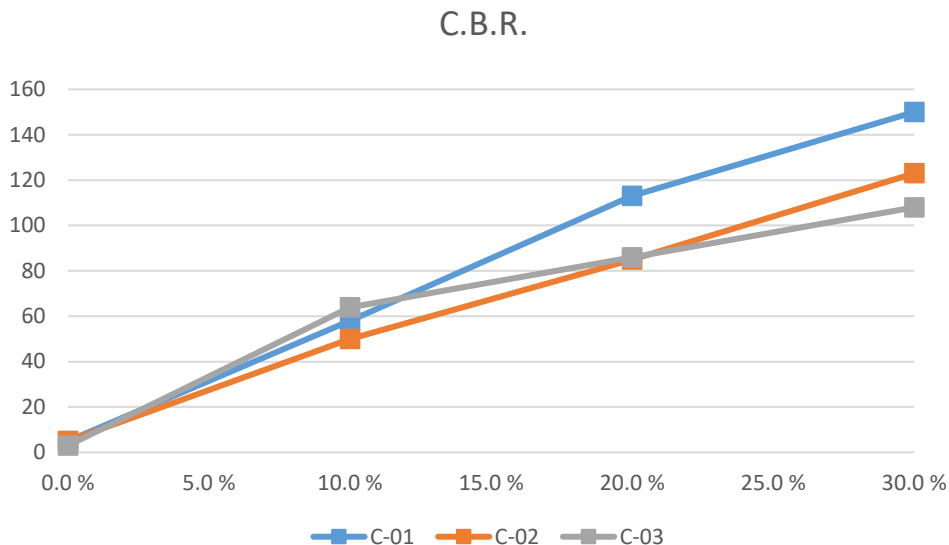


Gráfico 16: Variación del índice de C.B.R. según porcentaje de geo polímero.

El índice de C.B.R. al 95%, va variando según se aumenta el porcentaje de geo polímero de cerámica, este se incorporó al suelo natural en porcentajes de 10%, 20%, 30%; teniendo mejoras muy significativas, pues para la C-01 aumento de un valor inicial de 5%, a 58%, 113% y 150%, respectivamente al porcentaje de geo polímero. A continuación, se muestra el porcentaje de incremento para cada calicata.

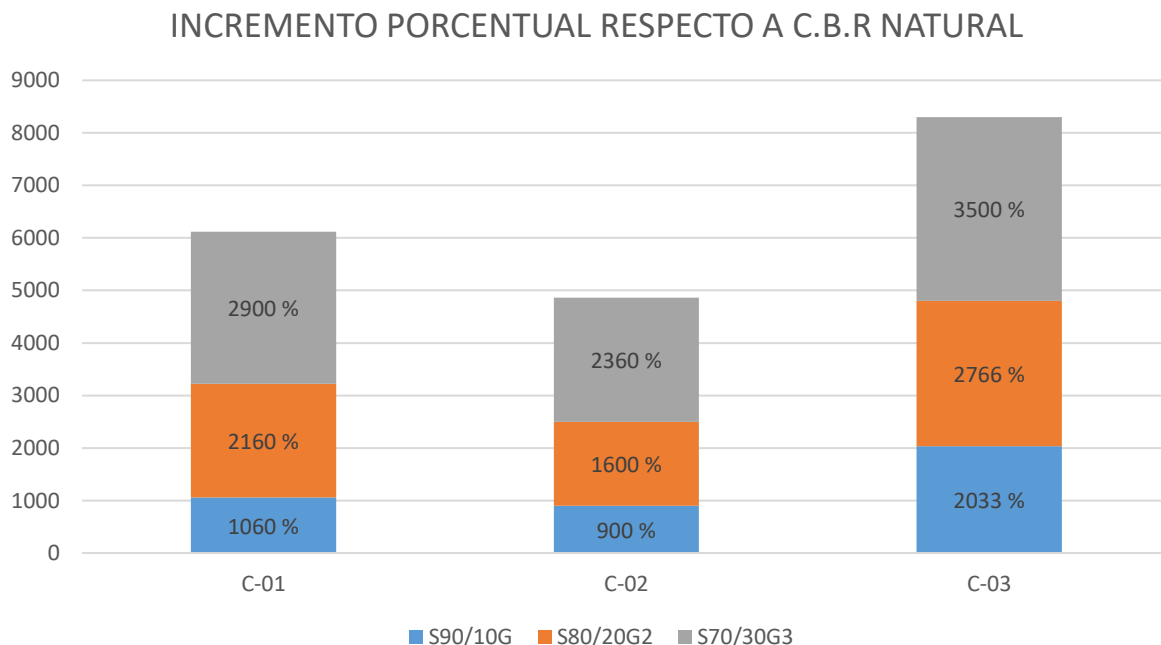


Gráfico 17: Incremento porcentual de índice de C.B.R. según porcentaje de geo polímero y calicata.

Expansión (%)			
95% DMS			
MUESTRA	C-01	C-02	C-03
SUELO NATURAL	0.73	0.77	0.53
S90/GP10 (10%)	0.33	0.30	0.38
S80/GP20 (20%)	0.27	0.28	0.33
S70/GP30 (30%)	0.22	0.25	0.27

Tabla 31: Resultados de expansión al 95% de la DMS suelo-geo polímero de cerámica.

En cuanto a la expansión este también se ve afectado pues, esta va disminuyendo de forma gradual mientras más se adicione el geo polímero, siendo beneficio en cuanto a la mejora del suelo. Dando mejores resultados en cuanto a la disminución de la expansión el porcentaje de 30% de geo polímero de cerámica en las tres calicatas, además que este es el que da mayores índices de C.B.R. siendo beneficioso para el uso como subrasante, además que por ese gran incremento en el índice de C.B.R. podría ser utilizado para otro tipo de estructuras de pavimentos u otras obras civiles.

#### V. *Comprobar los efectos de la geo polimerización en el tiempo en las propiedades de los suelos.*

##### 1. Resistencia a la compresión de muestras de suelo

Para la elaboración de las probetas de suelo se prepararon acorde a los datos obtenidos del ensayo de Proctor modificado, es decir a la humedad en la que este alcanza su máxima densidad seca, estas muestras fueron evaluadas a los 7, 14 y 28 días, como lo muestra la tabla 32, esto para poder comparar el valor de compresión del suelo sin la incorporación de geo polímero de cerámica.



Ilustración 33: Compactación de probetas suelo natural.



Ilustración 34: Ensayo de compresión de probetas suelo natural.

Días de curado	Resistencia promedio (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	C-01	C-02	C-03
7	41.36	33.47	34.73
14	53.91	50.23	61.29
21	61.72	56.82	74.65

Tabla 32: Resistencia a la compresión del suelo natural.

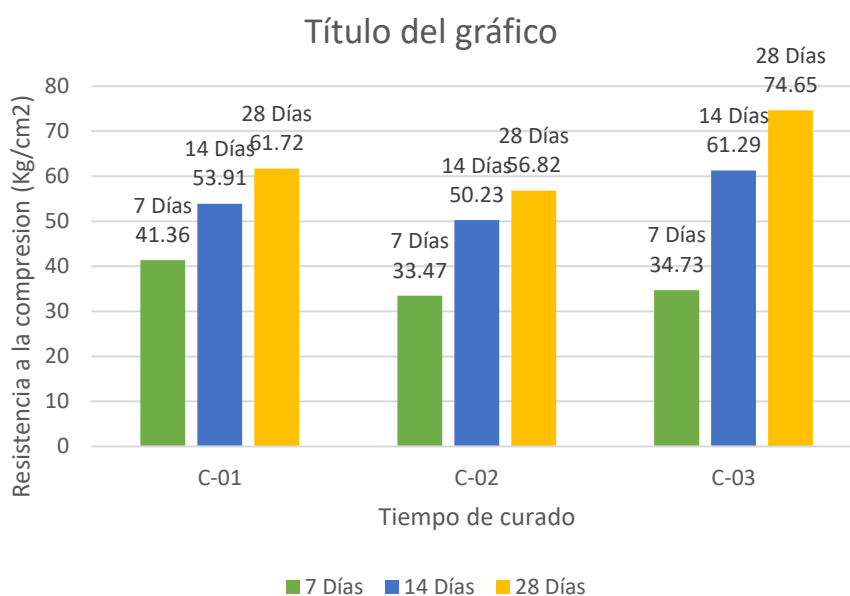


Gráfico 18: Resistencia de las muestras de suelo según el tiempo de curado.

Las muestras de suelo natural, ensayadas a compresión según el tiempo de curado tienen un crecimiento progresivo, pero aun así siguen obteniendo una resistencia menor, siendo lo esperado para las muestras sin tratamiento, para luego compararlas.

## 2. Ensayo de succión muestras de suelo natural.

A continuación, se detalla los resultados del ensayo de succión de las muestras naturales, para cada calicata, estas fueron ensayadas para un tiempo de curado de 28 días, para poder compararlo con las muestras de suelo-geo polímero. Este ensayo mide la altura que asciende el agua por capilaridad esto según el tiempo, se midió en un intervalo de 0.5 horas.



*Ilustración 35: Procedimiento ensayo de succión muestras de suelo natural.*

Se realizó el ensayo de succión en muestras de suelo natural, estas muestras tuvieron una rápida ascendencia de agua, esto por capilaridad; con el paso del tiempo empezaron a fracturarse debido al agua que disminuye la propiedad de cohesión entre las partículas de suelo, también se expandió en la parte inferior, debido al peso de la parte superior que aun se encontraba sin saturar, podría simularse el efecto del bulbo de presiones que sucede en el suelo. En la ilustración 36, se observa como a las 2 horas empezaron a agrietarse e hincharse en la parte inferior, hasta finalmente fallar.



*Ilustración 36: Fractura e hinchamiento de Muestra natural.*

MN					
C1		C2		C3	
TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)	TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)	TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)
0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.50	84	0.50	68	0.50	85
1.00	115	1.00	98	1.00	102
1.50	122	1.50	112	1.50	114
2.00	126	2.00	117	2.00	122
2.50	131	2.50	120	2.50	128
3.00	136	3.00	126	3.00	138
3.50	142	3.50	134	3.50	142
4.00	148	4.00	140	4.00	146
4.50	151	4.50	147	4.50	148

Tabla 33: Resultados ensayo de succión, muestras de suelo natural.

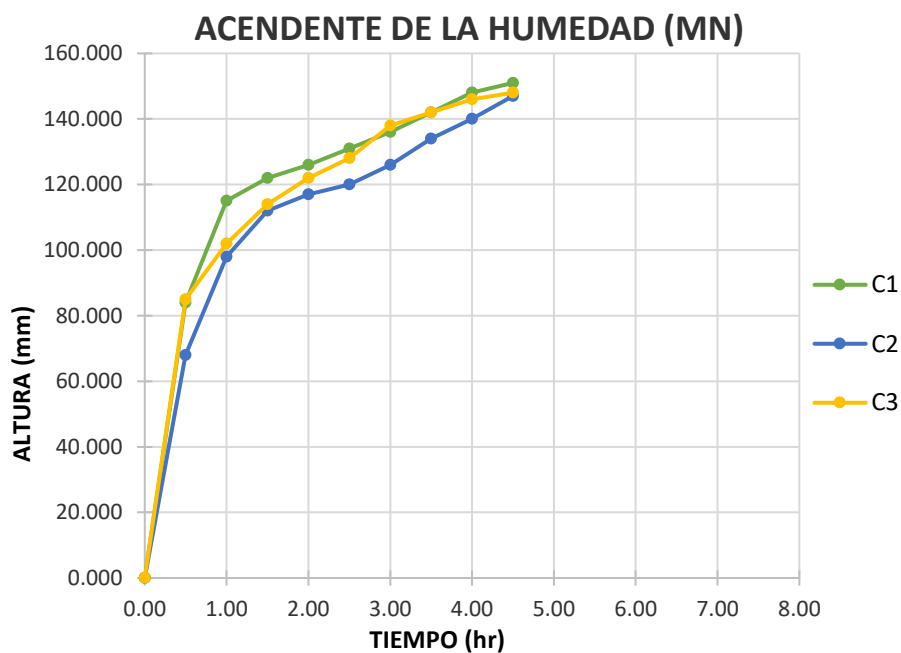


Gráfico 19: Altura de succión vs tiempo de muestras de suelo natural.

Al término del ensayo se observa que las muestras de suelo natural tienen una rápida ascendencia del agua en la primera hora, para luego ascender progresivamente pero aun así sigue siendo muy rápida, siendo lo esperado para muestras de suelo sin tratamiento. Estas muestras solo alcanzaron 4.5 horas de estabilidad para saturarse totalmente al término o fallar completamente.

### 3. Resistencia a la compresión suelo-geo polímero.

Las siguientes tablas nos muestran los valores que se obtuvieron en el ensayo de compresión en muestras de suelo con la adición de geo polímero de cerámica, en diferentes tiempos de curado. Además, de gráficos donde se detallan las resistencias máximas, se verifica que tienden a crecer según aumenta el tiempo de curado y también se les aumenta la cantidad de material precursor en la mezcla.



*Ilustración 37: Probetas suelo- geo polímero de cerámica.*



*Ilustración 38: Ensayo de compresión- geo polímero de cerámica.*



*Ilustración 39: Ensayo de compresión probetas Suelo-geo polímero de cerámica.*

Mezcla	C - 01		
	Tiempo de curado (Días)		
	Resistencia promedio (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	7	14	28
<b>SUELO NATURAL</b>	41.36	53.91	61.72
<b>S90/GP10 (10%)</b>	70.89	105.28	129.45
<b>S80/GP20 (20%)</b>	90.58	128.31	148.05
<b>S70/GP30 (30%)</b>	101.02	139.77	154.64

Tabla 34: Resultados ensayo de compresión en muestras de suelo-geo polímero para la C-01.

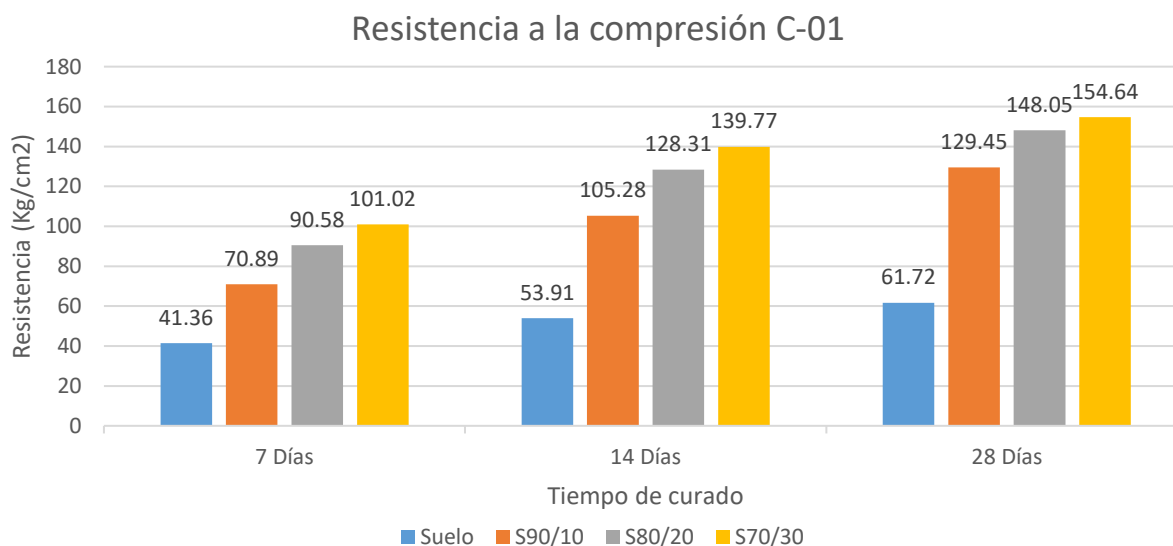


Gráfico 20: Esquema comparativo de resistencia a la compresión en muestras de suelo con la adición de geo polímero de cerámica C-01.

Se observa que las muestras de suelo natural tienen poca resistencia, la resistencia aumenta según aumente la cantidad de geo polímero, dando los mejores resultados en las muestras de suelo con 30% de geo polímero de cerámica, también aumentando según el tiempo de curación de las muestras. Para realizar el ensayo las muestras se colocaron al horno durando 18 horas esto para secarlas totalmente y la humedad no altere el ensayo. Con respecto a la muestra natural a los 28 días se observa un crecimiento del 109%, 139% y 150%; para los porcentajes de 10%, 20% y 30% de geo polímero de cerámica respectivamente.

Mezcla	C - 02		
	Tiempo de curado (Días)		
	Resistencia promedio (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	7	14	28
<b>SUELO NATURAL</b>	33.47	50.23	56.82
<b>S90/GP10 (10%)</b>	68.39	95.16	113.11
<b>S80/GP20 (20%)</b>	71.97	93.84	107.05
<b>S70/GP30 (30%)</b>	90.13	125.02	138.85

Tabla 35: Resultados ensayo de compresión en muestras de suelo-geo polímero para la C-02.

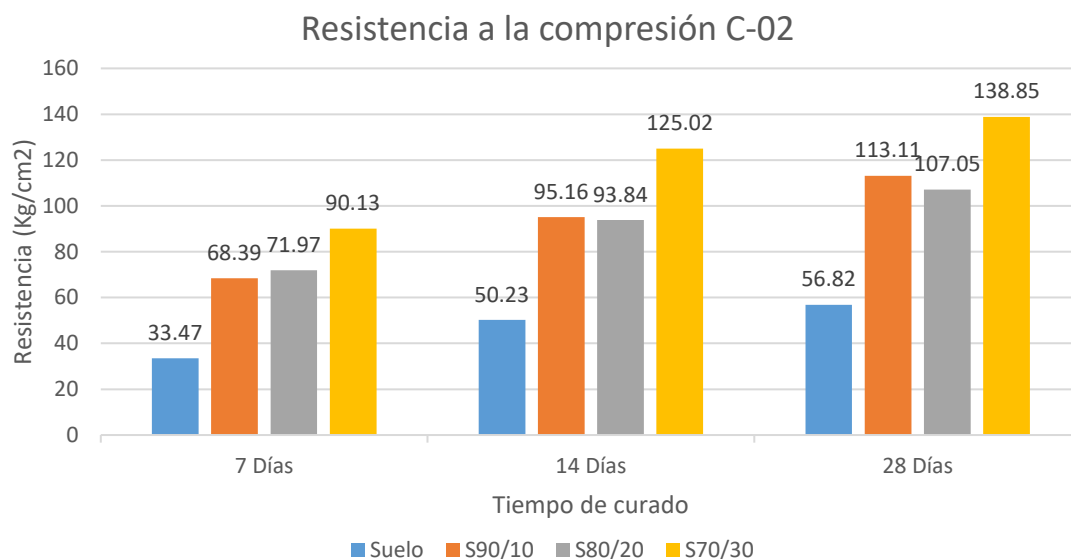


Gráfico 21: Esquema comparativo de resistencia a la compresión en muestras de suelo con la adición de geo polímero de cerámica C-02.

Para la C-02, tiene el mismo comportamiento al aumentar el tiempo de curado y porcentaje de geo polímero de cerámica se obtiene mayor resistencia. Se obtuvo menor resistencia en el porcentaje de 20% esto podría haber sido por el efecto de la humedad de las probetas, entre otros factores que pueden haber afectado las muestras y su resistencia a la compresión, pero en todos los resultados se mejora la resistencia a la compresión del suelo natural, dando como mejores valores el porcentaje de 30% de geo polímero. Con respecto a la muestra natural a los 28 días se observa un crecimiento del 99%, 88% y 144%; para los porcentajes de 10%, 20% y 30% de geo polímero de cerámica respectivamente.

Mezcla	C - 03		
	Tiempo de curado (Días)		
	Resistencia promedio (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	7	14	28
<b>SUELO NATURAL</b>	34.73	61.29	74.65
<b>S90/GP10 (10%)</b>	66.08	91.27	113.15
<b>S80/GP20 (20%)</b>	65.29	110.89	128.84
<b>S70/GP30 (30%)</b>	76.99	137.44	152.76

Tabla 36: Resultados ensayo de compresión en muestras de suelo-geo polímero para la C-03.

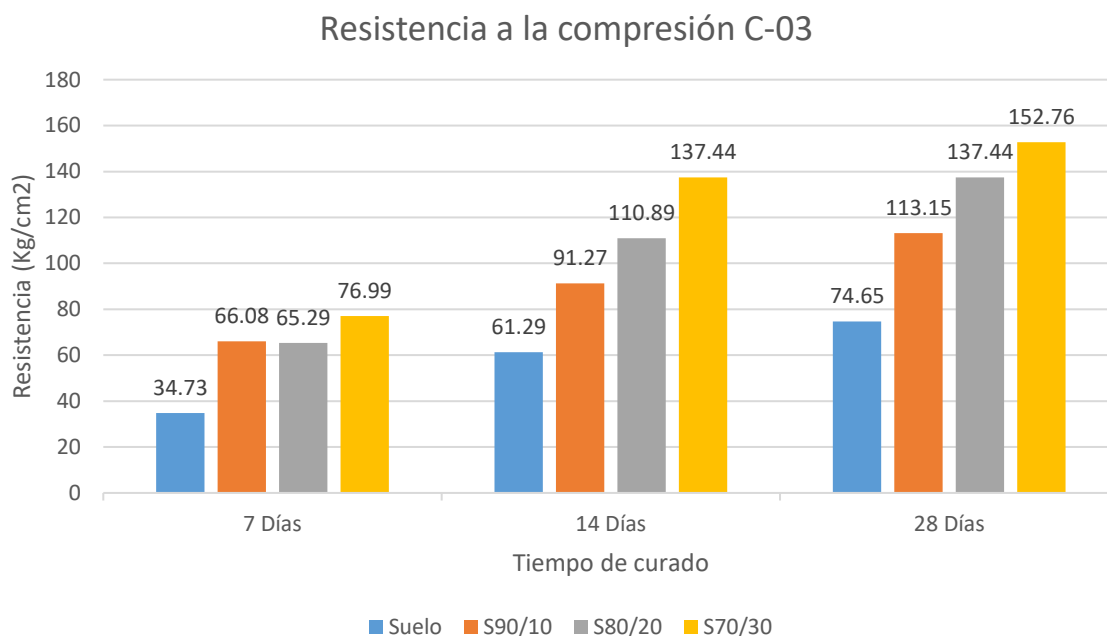


Gráfico 22: Esquema comparativo de resistencia a la compresión en muestras de suelo con la adición de geo polímero de cerámica C-03.

En la C-03 se observa el mismo comportamiento, que las otras dos calicatas, tiene un crecimiento progresivo según el tiempo de curación y porcentaje de geo polímero. Las muestras de 7 días de curado, nos muestran un incremento inicial de la resistencia que se va incrementando según el paso del tiempo, lo que nos demuestra que el proceso geopolimérico sigue surgiendo según el paso del tiempo, alcanzando porcentajes de incrementos comparado con las muestras naturales a los 28 días del 51% para el porcentaje de 10% de geo polímero, para el 20% se incrementa en un 84% y para el porcentaje de 30% obtiene un incremento del 104%.

#### 4. Ensayo de succión de muestras de suelo-geo polímero.

Los resultados para el ensayo de succión de las muestras de suelo-geo polímero de cerámica se detallan a continuación, estas fueron ensayadas para un tiempo de curado de 28 días. Se evaluó con el fin de comprobar si este material ayuda a la impermeabilización, pues el agua es el responsable de producir daños y alteraciones en el suelo.

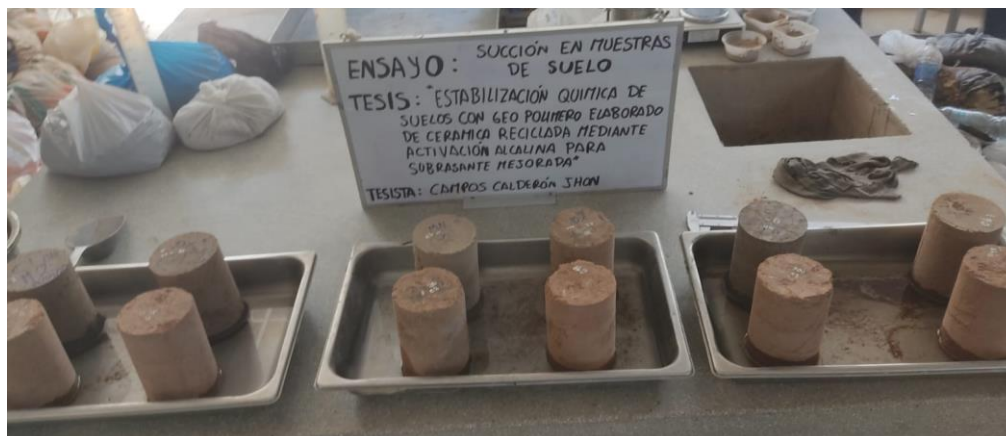


Ilustración 40: Procedimiento ensayo de succión muestras de Suelo-Geo polímero.

C-01							
MN		10%		20%		30%	
TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)	TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)	TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)	TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)
0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.50	84	0.50	40	0.50	37	0.50	35
1.00	115	1.00	76	1.00	62	1.00	56
1.50	122	1.50	94	1.50	82	1.50	74
2.00	126	2.00	106	2.00	95	2.00	86
2.50	131	2.50	112	2.50	105	2.50	98
3.00	136	3.00	120	3.00	115	3.00	109
3.50	142	3.50	125	3.50	121	3.50	115
4.00	148	4.00	132	4.00	127	4.00	122
4.50	151	4.50	137	4.50	134	4.50	128
5.00	0	5.00	141	5.00	137	5.00	132
5.50	0	5.50	145	5.50	139	5.50	134
6.00	0	6.00	149	6.00	142	6.00	136
6.50	0	6.50	0	6.50	146	6.50	139
7.00	0	7.00	0	7.00	149	7.00	143
7.50	0	7.50	0	7.50	0	7.50	147
8.00	0	8.00	0	8.00	0	8.00	150

Tabla 37: Resultados ensayo succión, muestras de Suelo-Geo polímero C-01.

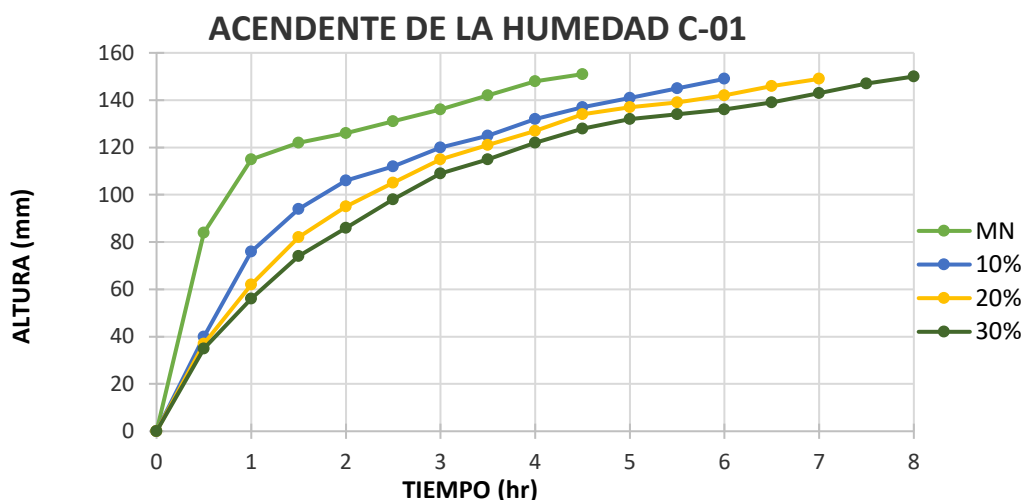


Gráfico 23: Altura de succión vs tiempo de muestras Suelo-Geo polímero C-01.

La muestra natural de la C-01, tuvo una rápida ascendencia de la humedad en la primera hora a comparación de las otras dos calicatas, esto puede deberse al tipo de suelo, al combinarlo con el 10 % de geo polímero disminuye en la primera hora en 33.9%, con 20% este disminuye en 46% y para la tercera adición de 30% de geo polímero disminuye significativamente en 51% a comparación de la muestra natural.

C-02							
MN		10%		20%		30%	
TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)	TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)	TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)	TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)
0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.50	68	0.50	47	0.50	44	0.50	37
1.00	98	1.00	75	1.00	67	1.00	62
1.50	112	1.50	97	1.50	82	1.50	75
2.00	117	2.00	107	2.00	98	2.00	89
2.50	120	2.50	112	2.50	101	2.50	95
3.00	126	3.00	120	3.00	109	3.00	99
3.50	134	3.50	126	3.50	117	3.50	108
4.00	140	4.00	132	4.00	123	4.00	115
4.50	147	4.50	137	4.50	127	4.50	121
5.00	0	5.00	142	5.00	132	5.00	127
5.50	0	5.50	146	5.50	137	5.50	132
6.00	0	6.00	149	6.00	142	6.00	138
6.50	0	6.50	0	6.50	146	6.50	142
7.00	0	7.00	0	7.00	148	7.00	145
7.50	0	7.50	0	7.50	0	7.50	147
8.00	0	8.00	0	8.00	0	8.00	149

Tabla 38: Resultados ensayo succión, muestras de Suelo-Geo polímero C-02.

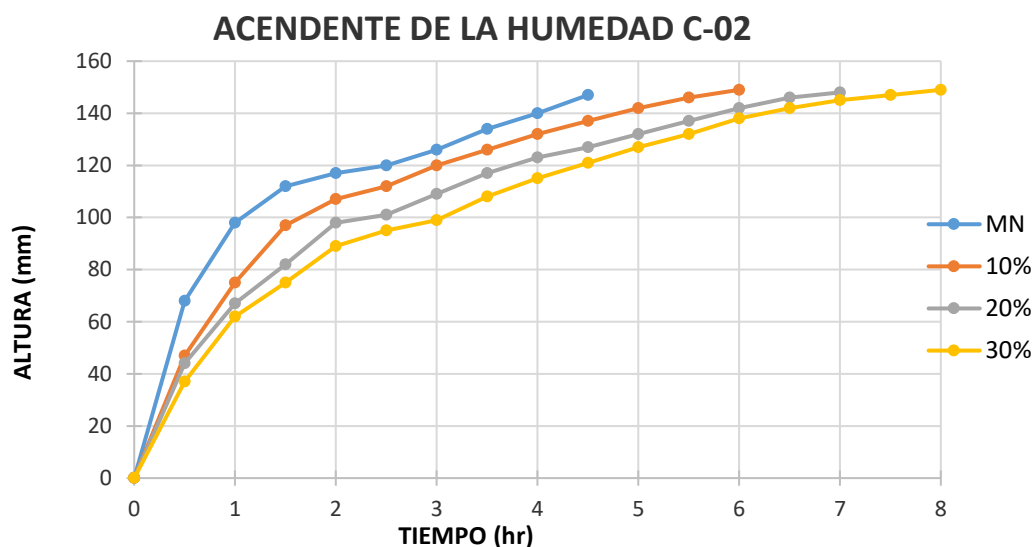
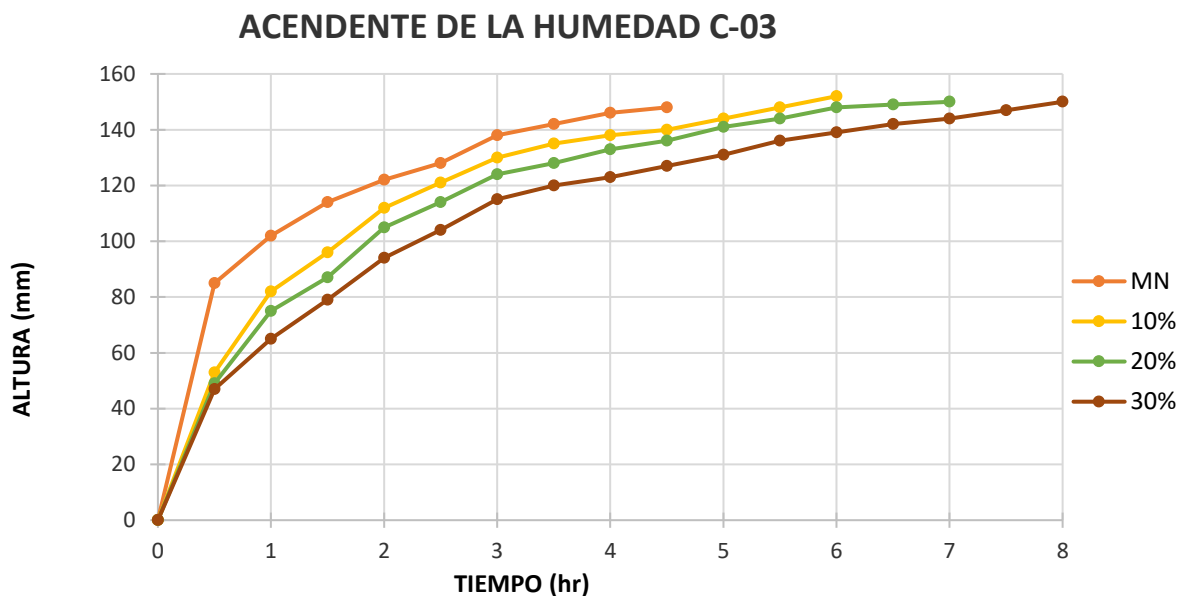


Gráfico 24: Altura de succión vs tiempo de muestras Suelo-Geo polímero C-02.

La muestra natural de la C-02, en la primera hora tuvo una ascendencia rápida de humedad, pero fue inferior a la C-01, como se observa en el gráfico al aumentar la cantidad de geo polímero este retrasa el ascenso del agua, reduciéndolo para la primera hora de evaluación en 23% para el 10% de geo polímero, 31.6% para el 20 % de geo polímero y 36.7% para el 30% de geo polímero, llegando a saturar toda la probeta en aproximadamente 8 horas.

C-03							
MN		10%		20%		30%	
TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)	TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)	TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)	TIEMPO (hr)	ALTURA (mm)
0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.50	85	0.50	53	0.50	49	0.50	47
1.00	102	1.00	82	1.00	75	1.00	65
1.50	114	1.50	96	1.50	87	1.50	79
2.00	122	2.00	112	2.00	105	2.00	94
2.50	128	2.50	121	2.50	114	2.50	104
3.00	138	3.00	130	3.00	124	3.00	115
3.50	142	3.50	135	3.50	128	3.50	120
4.00	146	4.00	138	4.00	133	4.00	123
4.50	148	4.50	140	4.50	136	4.50	127
5.00	0	5.00	144	5.00	141	5.00	131
5.50	0	5.50	148	5.50	144	5.50	136
6.00	0	6.00	152	6.00	148	6.00	139
6.50	0	6.50	0	6.50	149	6.50	142
7.00	0	7.00	0	7.00	150	7.00	144
7.50	0	7.50	0	7.50	0	7.50	147
8.00	0	8.00	0	8.00	0	8.00	150

Tabla 39: Resultados ensayo succión, muestras de Suelo-Geo polímero C-03



*Gráfico 25: Altura de succión vs tiempo de muestras Suelo-Geo polímero C-03.*

Para la C-03, se observa que al aumentar la cantidad de material retrasa el ascenso del agua por capilaridad de las muestras de suelo, a comparación de las muestras de suelo natural, que tienen una rápida absorción del agua y en la mitad del tiempo llegan a fallar. Además, que estas muestras no fallaron en ningún momento lo que pueden aplicarse en otro tipo de estructuras.



*Ilustración 41: Comparativo ensayo de succión en muestras de suelo natural y suelo-geo polímero de cerámica.*

## ***VI. Determinar el efecto de la estabilización química con geo polímero de cerámica reciclada mediante una evaluación de impacto ambiental***

### ***Evaluación de impacto ambiental de la estabilización química de subrasantes***

#### ***Mejoramiento de subrasante con adición de materiales***

Esto consiste en la disgregación del material de la subrasante, sometiéndose a cierta manipulación o tratamiento de modo que se pueda aprovechar o aumentar sus características, siendo este mucho más firme y estable, siendo capaz de soportar los efectos que produce el tránsito de vehículos y condiciones climáticas en las que se encuentre.

En esta investigación se utiliza un método químico para la estabilización de suelos, debido a esto se debe realizar un estudio de impacto ambiental, a continuación, se detallan las partes más importantes de esto.

#### ***Identificación de impactos ambientales en el proceso constructivo***

En esta etapa se identificará y evaluará los impactos ambientales que afectarían al medio ambiente del área de influencia del lugar donde se realizara la “estabilización química con geo polímero de cerámica mediante activación alcalina”.

A continuación, se presenta el listado de las actividades que se realizan durante la fase constructiva de la estabilización química de suelos, donde podrían generarse impactos ambientales:

- **Limitación de la zona de trabajo:** Se debe limitar de acuerdo con la disponibilidad de equipos de compactación, pues cada tramo debe terminarse antes de que la mezcla comience a ganar resistencia.
- **Pulverización del suelo:** Se procede a realizar el corte de material hasta la profundidad de la capa a estabilizar, aquí se pasará varias veces el escarificador o discos de arado.
- **Adición del material precursor:** Este material se esparcirá sobre el suelo de la subrasante, este será la cantidad necesaria en todo el ancho de la capa.

- **Mezcla de solución alcalina:** Esta etapa debe realizarse inmediatamente después de esparcir el material precursor en todo el ancho de la vía, mezclando la solución alcalina hasta obtener una mezcla homogénea.
- **Compactación:** Este se debe realizar hasta obtener un acabado uniforme, partiendo de los bordes hacia el centro, esto en todo el espesor proyectado.
- **Terminación:** Terminada la compactación se procede a perfilar la superficie.
- **Curado:** Parte final del proceso de estabilización, consiste en tener la superficie húmeda por un ligero roció.

Al haber establecido el procedimiento de aplicación, procederemos a realizar la matriz de Leopold, que es un sistema de información y de identificación, consta de dos entradas en columnas son las acciones del hombre que podrían alterar el medio ambiente y en filas son las características del medio o factores ambientales que pueden ser alteradas. [35]

### *Identificación de factores ambientales*

Estos son los componentes ambientales que pueden ser afectados en este caso durante todo el proceso de la estabilización química. Fueron divididos en tres medios donde posiblemente pueda existir un impacto ambiental, estos fueron el medio físico, biológico y social, todos estos con sus respectivos factores ambientales.

FACTORES AMBIENTALES	<i>MEDIO FISICO</i>		
	<b>AIRE</b>	<b>AGUA</b>	<b>SUELO</b>
	EMISIÓN DE GASES	CALIDAD DE AGUA	CONTAMINACION
	PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN	SUPERFICIAL	EROSIÓN
	NIVEL DE RUIDO	SUBTERRÁNEA	CALIDAD DE SUELO
	<i>MEDIO BIOLÓGICO</i>		
	<b>FLORA</b>	<b>FAUNA</b>	<b>CALIDAD VISUAL</b>
	PLANTAS ORNAMENTALES	INSECTOS	PAISAJE URBANO
	ÁRBOLES	ANIMALES	
	ARBUSTOS		
	<i>MEDIO SOCIAL</i>		
	<b>FACTOR SOCIOECONÓMICO</b>	<b>FACTOR HUMANO</b>	<b>FACTOR CULTURAL</b>
	EMPLEO	COMODIDAD Y CONFORT	CALIDAD DE VIDA
	MOVILIDAD VEHICULAR	MOVILIDAD PEATONAL	SALUD Y SEGURIDAD
	COMERCIO		
	UTILIZACIÓN MOMENTÁNEA DE VÍAS		

*Tabla 40: Identificación de factores ambientales*

Una vez realizada la matriz de Leopold, podemos analizar e identificar que la mezcla de la solución alcalina en la fase constructiva es el máximo impacto negativo con un valor promedio de -516; en segundo lugar, se encuentra la pulverización del suelo mayormente debido al uso de maquinaria, con un valor promedio de -299.

MAGNITUD Expresa el grado de alteración potencial de la calidad ambiental del factor considerado, hace referencia a la dimensión, trascendencia y medida del afecto en sí mismo.	ACCIONES							SUMA		
	FASE CONSTRUCCIÓN							MAGNITUD (+/-)	PROMEDIO NEGATIVO	
	LIMITACIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO	PULVERIZACIÓN DEL SUELO	ADICIÓN DEL MATERIAL PRECURSOR	MEZCLA DE SOLUCIÓN ALCALINA	COMPACTACIÓN	TERMINACIÓN	CURADO			
<b>AIRE</b>										
EMISIÓN DE GASES	-4	-5	3	-2	3	3	3	1	41	29
PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN	-1	-7	-7	-3	-4	-3	-3	-28	24	-111
NIVEL DE RUIDO	-3	-4	-4	-2	-3	-1	-1	-18	26	-78
<b>AGUA</b>										
CALIDAD DE AGUA				-10			-3	-13	13	-109
SUPERFICIAL			-2	-10				-12	12	-104
SUBTERRÁNEA				-10			-3	-13	13	-109
<b>SUELO</b>										
CONTAMINACION	-1	-8	-3	-2	4	1		-9	22	-66
EROSIÓN	-1	-7	2	2		1	-2	-5	22	-24
CALIDAD DE SUELO		-1	5	6	3		5	18	36	166
<b>FLORA</b>										
PLANTAS ORNAMENTALES	-1	-4	3	-7			2	-7	20	-39
ÁRBOLES	-1	-4	3	-7			2	-7	20	-39
ARBUSTOS	-1	-4	3	-7			2	-7	20	-39
<b>FAUNA</b>										
INSECTOS		-3		-5	-2		-1	-11	13	-46
ANIMALES		-3		-5	-2		-1	-11	13	-46
<b>CALIDAD VISUAL</b>										
PAISAJE URBANO		-2	-2		4	2	1	3	13	7
<b>FACTOR HUMANO</b>										
COMODIDAD Y CONFORT		-3	-1	-3	-2		4	-5	15	-3
MOVILIDAD PEATONAL	-2	-3		-2	-2			-9	13	-30
<b>FACTOR SOCIOECONÓMICO</b>										
EMPLEO	3	3	3	3	3	3	3	21	28	84
MOVILIDAD VEHICULAR		-3	-3	-2	3	2	5	2	18	28
COMERCIO			-2		-1			-3	5	-8
UTILIZACIÓN MOMENTÁNEA DE VÍAS		-4	-2	-2	4	4	4	4	18	20
<b>FACTOR CULTURAL</b>										
CALIDAD DE VIDA			-3	-5	3			-5	10	-20
SALUD Y SEGURIDAD		-3	-3	-5	3			-8	12	-26
Magnitud	-12	-65	-10	-78	14	12	17			-563
Importancia	19	72	71	117	62	28	58			
PROMEDIO	-16	-299	37	-516	57	45	129	-563		

Tabla 41: Matriz de Leopold.

Por otro lado, también se realizó una matriz de colores, con el fin de identificar que impactos tiene cada acción en la fase constructiva para cada factor ambiental, identificando que generalmente se tiene un impacto negativo en el aire, flora y fauna. Pero se tiene impactos positivos en mejorar la calidad del suelo, generación de empleo y mejorar la movilidad vehicular.

<b>LEYENDA</b>		<b>ACCIONES</b>							
		<b>FASE CONSTRUCCIÓN</b>							
		LIMITACIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO	PULVERIZACIÓN DEL SUELO	ADICIÓN DEL MATERIAL PRECURSOR	MEZCLA DE SOLUCIÓN ALCALINA	COMPACTACIÓN	TERMINACIÓN	CURADO	
<b>FACTORES AMBIENTALES</b>	<b>AIRE</b>								
		EMISIÓN DE GASES	Red	Red	Red	White	Red	Red	Red
		PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN	White	Red	Red	White	Red	White	Red
		NIVEL DE RUIDO	White	Red	White	White	Red	White	White
	<b>AGUA</b>								
		CALIDAD DE AGUA	White	White	Red	Red	White	White	Red
		SUPERFICIAL	White	White	Red	Red	White	White	Red
		SUBTERRÁNEA	White	White	White	Red	White	White	White
	<b>SUELO</b>								
		CONTAMINACIÓN	White	White	White	Red	White	White	White
		EROSIÓN	White	Red	White	White	Red	White	White
		CALIDAD DE SUELO	White	White	Green	Green	Green	Green	Green
	<b>FLORA</b>								
		PLANTAS ORNAMENTALES	White	Red	Red	Red	White	White	Green
		ÁRBOLES	White	Red	Red	Red	White	White	Green
		ARBUSTOS	White	Red	Red	Red	White	White	Green
	<b>FAUNA</b>								
		INSECTOS	White	Red	Red	Red	White	White	White
		ANIMALES	White	Red	Red	Red	White	White	White
	<b>CALIDAD VISUAL</b>								
		PAISAJE URBANO	White	Red	Green	Green	Green	Green	Green
	<b>FACTOR HUMANO</b>								
		COMODIDAD Y CONFORT	White	Red	Red	Red	Green	Green	White
		MOVILIDAD PEATONAL	Red	Red	Red	Red	Green	Green	White
	<b>FACTOR SOCIOECONÓMICO</b>								
		EMPLEO	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
		MOVILIDAD VEHICULAR	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green
		COMERCIO	White	White	Red	White	Red	White	White
		UTILIZACIÓN MOMENTÁNEA DE VÍAS	White	White	Red	Red	Green	Green	Green
	<b>FACTOR CULTURAL</b>								
	CALIDAD DE VIDA	White	White	Red	Red	Green	White	White	
	SALUD Y SEGURIDAD	White	Red	Red	Red	Green	White	White	

Tabla 42: Matriz de magnitud-colores.

**VII. *Evaluar técnica y económicamente la estabilización química con geo polímero elaborado de cerámica, comparándolo con método de estabilización tradicional.***

**Comparación técnica y económica con método de estabilización tradicional**

*Comparación técnica*

Para la elaboración de un geo polímero es necesario que las partículas del material precursor sean lo más pequeñas posibles, esto para que al momento de ser combinado con el activador alcalino pueda generar el efecto conocido como geo polimerización, en esta investigación se utilizó el material pasante por la malla N ° 140 y N ° 30 podría encontrarse con problemas que las partículas de este material entre en suspensión por el viento, afectando al personal que lo manipule, así como pérdidas de material.

A continuación presentaremos una pequeña comparación técnica, entre el método propuesto de estabilización de suelos con geo polímero elaborado de cerámica mediante activación alcalina, con los materiales recomendados por el Manual de carreteras: suelos y pavimentos (2014) que nos menciona que para estabilizar los suelos de tipo arcillosos los materiales recomendados son la cal viva y el cemento Portland; estos materiales son en polvo con partículas muy pequeñas, similares al material precursor para elaborar el geo polímero, que en esta investigación es la cerámica triturada.

La finura de un material es un parámetro que se expresa en términos de superficie específica. Si suponemos que las partículas de este material son esféricas, podríamos establecer una relación entre su superficie específica y su peso específico.

Para esto utilizaremos las siguientes formulas:

$$\text{Superficie específica: } S_s = \frac{A}{m} = \frac{\text{Area}}{\text{Masa}}$$

$$\text{Peso específico: } \gamma = \frac{m}{V} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}$$

$$\text{Área de una esfera: } A = 4 \times \pi \times r^2$$

$$\text{Volumen de una esfera: } V = \frac{4}{3} \times \pi \times r^3$$

$$a_s = \frac{1}{S_s \times \gamma} = \frac{V}{A} = \frac{\frac{4}{3} \times \pi \times r^3}{4 \times \pi \times r^2} = \frac{r}{3} = \frac{D}{6}$$

Despejando de las anteriores formulas podríamos encontrar el diámetro aproximado de su partícula, además ya deberíamos contar con el peso específico y la superficie específica de ambos materiales.

$$D = \frac{6}{S_s \times \gamma}$$

Para el cemento Portland su peso específico varía entre 2.80 y 3.15 g/cm<sup>3</sup>, y su superficie específica mínima esta entre 160 y 280 m<sup>2</sup>/kg [36], a continuación, se muestra un cuadro donde se compara los tamaños de las partículas del cemento, cal viva y cerámica triturada.

Cal viva	Cemento Portland	Cerámica triturada
75 μm < D < 150 μm	3 μm < D < 15 μm	75 μm < D < 600 μm
$D_{PROMEDIO} = 100 \mu\text{m}$	$D_{PROMEDIO} = 15 \mu\text{m}$	

*Tabla 43: Comparativa entre partículas según su diámetro.*

El tamaño de partícula del material precursor no sería un inconveniente para la manipulación en obra, pues este material su diámetro de partícula varía entre μm, siendo similar al tamaño promedio de la cal viva, estando entre un rango de 75 μm – 600 μm; por otro lado, en el grafico 26, el tamaño de partícula del cemento portland es mucho menor que los propuestos para el material precursor con el que se elaborará el geo polímero. Por esto se deben tener las medidas de seguridad adecuadas, para que la manipulación de la cerámica triturada no sea un problema.

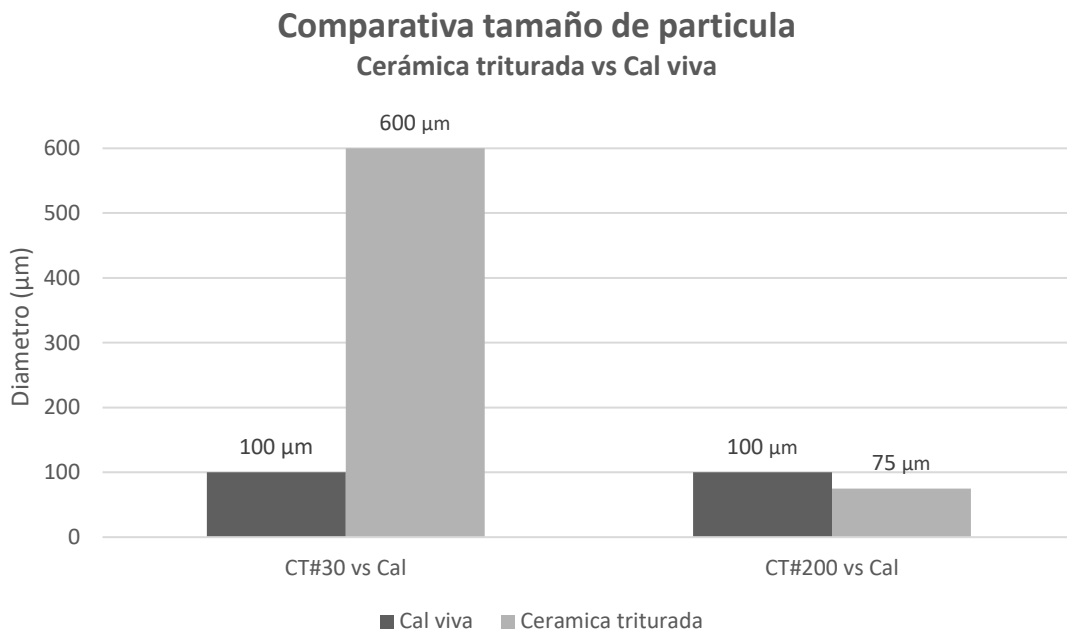


Gráfico 26: Comparación de tamaño de partícula entre cal viva y cerámica triturada.

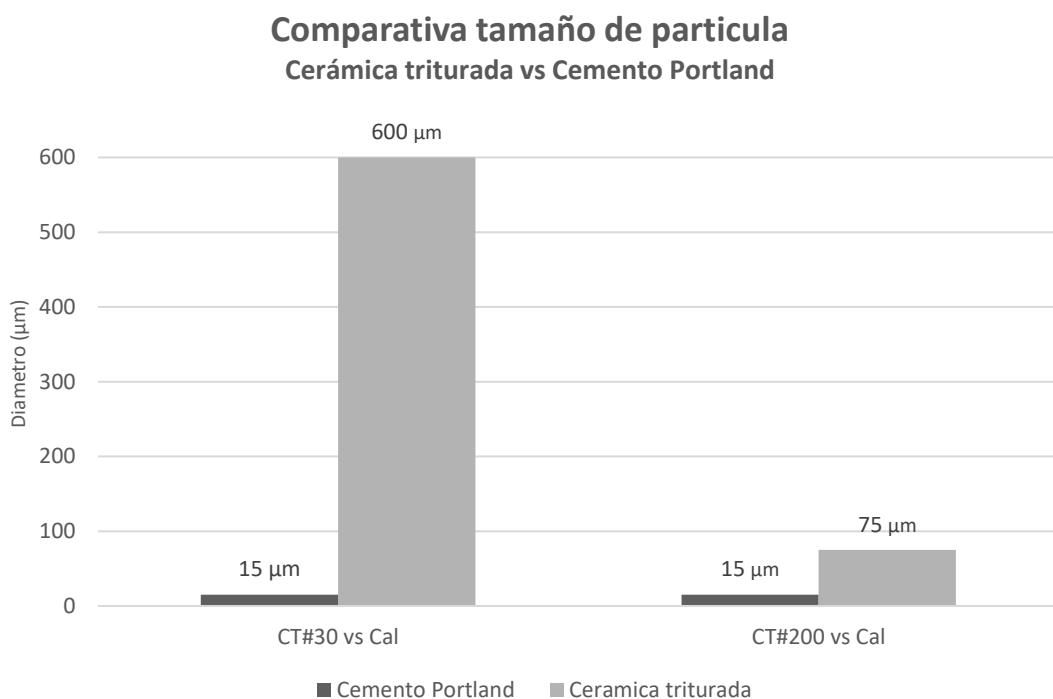


Gráfico 27: Comparación de tamaño de partícula entre cemento Portland y cerámica triturada.

Por otro lado, la solución alcalina la que sería en parte el responsable de producir el efecto geo polimérico, en esta investigación se utiliza la soda caustica como activador alcalino, en una molaridad de 12M, para la elaboración de la solución con esta molaridad se debe tener en cuenta su masa molar que es de 39.997 g/mol; este es un producto químico soluble en agua, cuenta con una densidad de 2.13 g/cm<sup>3</sup>, en cuanto a su pH esta ronda alrededor de 12, demostrando una alta alcalinidad, donde puede producir efectos perjudiciales si no se tiene un buen manejo en obra. Una vez preparada la solución alcalina en obra, se debe tener las medidas de seguridad pertinentes para su aplicación, pues estas pueden ser corrosivas y tienen propiedades detergentes y desinfectantes.

<b>Propiedades</b>	<b>Solución alcalina 12M</b>	<b>Agua natural</b>
<b>Masa molar</b>	39.997 g/mol	18.015 g/mol
<b>Densidad</b>	2.13 g/cm <sup>3</sup>	0.998 g/cm <sup>3</sup>
<b>pH</b>	12	7

*Tabla 44: Comparación de propiedades solución alcalina vs agua natural.*

#### *Comparación económica*

La estabilización de subrasantes arcillosas con geo polímero elaborado de cerámica mediante activación alcalina depende de la planta en la que se triture el material precursor en este caso la cerámica, y el lugar de donde se recicle este residuo, por otro lado, una empresa que proporcione el activador alcalino (Hidróxido de sodio o soda caustica). En este corto estudio económico se considera una generación de cerámica molida en menor escala, considerándose el alquiler de máquina de los ángeles o molinos eléctricos; no se considera el precio de la cerámica pues este material se reciclaría, con el objetivo de darle otro uso.

Para la producción del geo polímero, es necesario la adecuación de los materiales precursores en este caso la cerámica necesita ser triturada, por otro lado, la compra del activador alcalino (hidróxido de sodio o soda caustica) necesita ser adquirido al por mayor. Al ser un método de estabilización nuevo encontrándose aun en investigación y según los porcentajes definidos en la investigación resultaría ser más costoso, aunque sería una opción para reducir la contaminación que genera este tipo de residuos, pues no se les da ningún tipo de disposición final o uso.

Se realizó el análisis de precios unitarios para cada porcentaje de estabilización, cabe recalcar que no se consideró los valores de mano de obra, transporte y costo de los equipos para la realización de la estabilización pues esto puede variar según el tipo de obra. Solo se tuvo en cuenta el costo de los materiales y su procesamiento, las cantidades de los materiales provienen del diseño de mezcla antes planteado, teniendo las siguientes consideraciones:

- Soda caustica: Se considero el precio por kg que se encuentra en el mercado a la fecha de la investigación.
- Cerámica: Se tuvo en cuenta el precio de la trituración por kg, pues es un material que sería reciclado.
- Agua: Se considero el precio promedio por m3 establecido por SEDAPAL. [40]

COSTO DE FABRICACIÓN DE GEOPOLÍMERO ELABORADO DE CERAMICA RECICLADA MEDIANTE ACTIVACIÓN ALCALINA				
10% geopolimero - e=15cm				
Materiales			Und: m3	
Descripción	Und	Cantidad	P.U.	Total
Hidroxido de sodio/soda caustica	kg	0.192	S/.13.0	S/.2.50
Agua	m3	0.0004	S/.2.36	S/.0.00
Cerámica	kg	100	S/.1.00	S/.100.00
			<b>Total</b>	<b>S/.102.50</b>
20% geopolimero - e=15cm				
Materiales			Und: m3	
Descripción	Und	Cantidad	P.U.	Total
Hidroxido de sodio/soda caustica	kg	38.4	S/.13.0	S/.499
Agua	m3	0.08	S/.2.4	S/.0.19
Cerámica	kg	200	S/.1.0	S/.200.00
			<b>Total</b>	<b>S/.699.39</b>
30% geopolimero - e=15cm				
Materiales			Und: m3	
Descripción	Und	Cantidad	P.U.	Total
Hidroxido de sodio/soda caustica	kg	57.6	S/.13.0	S/.749
Agua	m3	0.12	S/.2.4	S/.0.28
Cerámica	kg	300	S/.1.0	S/.300
			<b>Total</b>	<b>S/.1,049.08</b>

Tabla 45: Análisis de precios unitarios por porcentaje de adición.

También se calculó el costo por kg para la elaboración de este material estabilizante, teniéndose en cuenta solo los precios de los materiales necesarios.

Geo polimero por Kg				
Materiales			Und:	kG
Descripción	Und	Cantidad	P.U.	Total
Hidroxido de sodio/soda caustica	kg	0.192	S/.13.0	S/.2.50
Agua	m3	0.0004	S/.2.36	S/.0.001
Cerámica	kg	1	S/.1.00	S/.1.00
			Total	<b>S/.3.50</b>

Tabla 46: Costo por kg de geopolímero de cerámica reciclada.

Se realizo el presupuesto para 1000 kg de muestra de suelo, variando según el peso específico de cada suelo que se quiera estabilizar teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

$$A = 1.00 \text{ m}^2 \quad L: \text{área de estabilización [m}^2\text{]}$$

$$h = 0.15 \text{ m} \quad h: \text{profundidad de estabilización [m]}$$

$$V = 0.15 \text{ m}^3 \quad V: \text{volumen total de suelo a estabilizar [m}^3\text{]}$$

PORCENTAJES DE AGENTES ESTABILIZANTES		
% de Cal* =	3.00%	* Dosificaciones recomendadas por el Manual de Carreteras: Suelos y Pavimentos 2014. ** Dosificaciones de geo polímero de cerámica mediante activación alcalina propuestas en esta investigación.
% de Cemento* =	10.00%	
% de Geo polímero de cerámica** =	10.00%	
	20.00%	
	30.00%	

Tabla 47: Porcentajes de agentes estabilizantes de acuerdo con las recomendaciones del Manual de Carreteras: Suelos y Pavimentos 2014.

Descripción	Dosificación	Volumen	Cantidad	P.U.	Parcial
Cal viva*	3.00%	0.15 m3	0.0045 m3	S/.2,321.0	S/.10.44
Cemento Portland*	10.00%		0.0150 m3	S/.1,581.0	S/.23.72
Geo polímero de cerámica**	10.00%		0.0150 m3	S/.349.7	S/.5.25
	20.00%		0.0300 m3	S/.699.4	S/.20.98
	30.00%		0.0450 m3	S/.1,049.1	S/.47.21
* Precio de compra del agente estabilizante envasado al por menor. ** Costo por m3 de geo polímero según análisis de costos unitarios.					

Tabla 48: Evaluación de costos de estabilización con cal, cemento y geo polímero elaborado de cerámica. Elaboración propia.

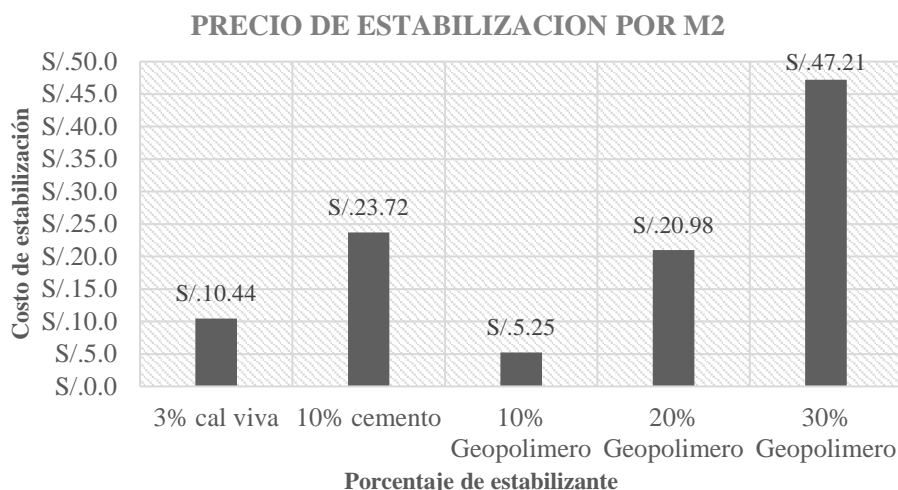


Gráfico 28: Precios de la estabilización por m2.

El siguiente gráfico indica el porcentaje de variación de estabilizar con el método propuesto respecto a los porcentajes recomendados de cal viva y el cemento portland.

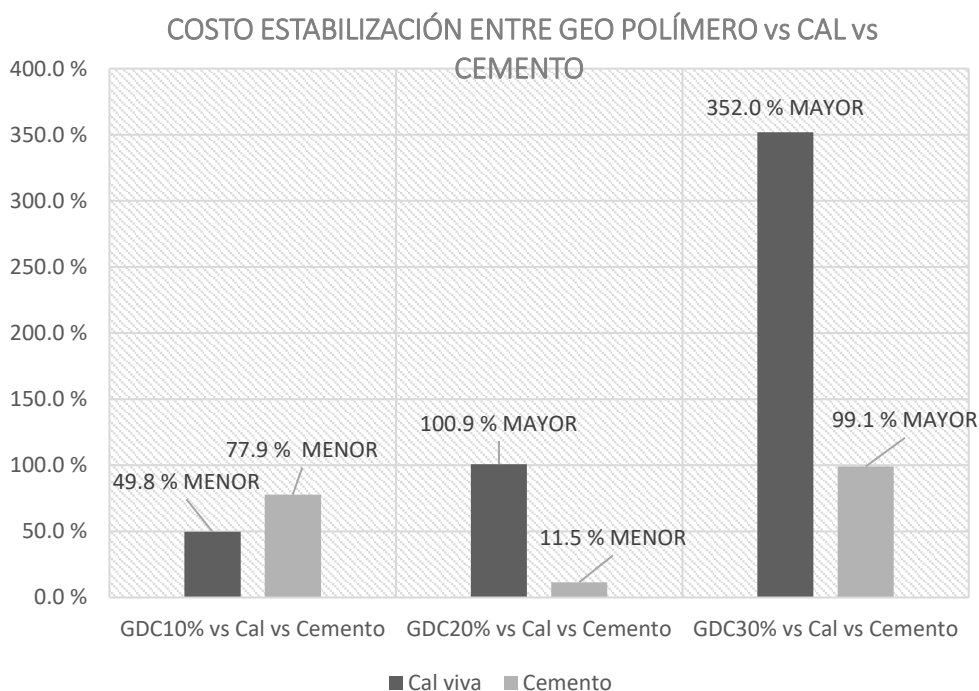


Gráfico 29: Comparación económica entre la estabilización con geo polímero de cerámica vs cal vs cemento.

Se observa que estabilizar con 10% de geo polímero es 49.8%, 77.9% menor respecto a la cal y cemento Portland respectivamente. Para el 20% de geo polímero se encontró que es 100.9% mayor el costo de estabilizar, a diferencia de que es menor en un 11.5% a comparación de estabilizar con cemento y para el 30% de geo polímero se encontró que el costo de la estabilización es 352% mayor con respecto al costo de estabilizar con cal viva y 99.1% mayor con respecto al precio de la estabilización con cemento portland.

### Discusión de resultados

Esta investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento de suelos arcillosos adicionándole un geo polímero elaborado de cerámica reciclada y activación alcalina de soda caustica. Para esto se realizaron ensayos físico-mecánicos, con muestras de suelo patrón y al suelo adicionado con tres porcentajes de este material. Con el fin de encontrar cual es el porcentaje optimo que estabilice el suelo, evaluando la resistencia del suelo, máxima densidad seca y CBR.

#### *Caracterización y fabricación del geo polímero*

Para la elaboración del geo polímero o un cemento activado alcalinamente, se usó dos materiales, uno sólido conocido como material precursor, en este caso la cerámica reciclada, y un activador alcalino, que sería el activador alcalino, en este caso solución de soda caustica.

En cuanto a la caracterización de la **cerámica reciclada**, una vez realizado el procedimiento previo de triturado y tamizado se obtiene un material con textura parecida a la harina, se realizó el **ensayo de gravedad especifica de los sólidos** donde se obtuvo un valor de  $2.701 \text{ g/cm}^3$ , estando entre el rango normal de una arcilla, el cual es de  $2.6\text{-}2.8 \text{ g/cm}^3$ .

También se analizó la **estructura química** a través del ensayo de **difracción y fluorescencia de rayos x**, donde se encontró que el material más predominante es el Dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), con un 43.97% y el Trióxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), con un 17.82%, siendo estos dos componentes químicos los responsables del proceso de geo polimerización al combinarse con una solución alcalina. También se analizó la **pérdida de masa**, a través del ensayo de **análisis térmico diferencial**, encontrándose dos zonas donde se hace más intensa la pérdida de masa en un rango de  $390$  y  $500^\circ\text{C}$  y la segunda en menor intensidad entre  $600$  y  $700^\circ\text{C}$ , luego la pérdida es gradual. Al finalizar el ensayo pierde aproximadamente 17% de la masa inicial.

Por otro lado, la **solución alcalina de soda caustica** usándose en una concentración de 12M, es un producto químico sólido en hojuelas que al mezclarse con agua eleva su temperatura desde la temperatura ambiente, en este análisis se realizó tres repeticiones iniciando en  $22.0^\circ\text{C}$ ,  $28.3^\circ\text{C}$  Y  $26.6^\circ\text{C}$ ; por otro lado, alcanzo valores máximos de  $92.5^\circ\text{C}$ ,  $86.6^\circ\text{C}$  Y  $86.5$ , respectivamente para cada repetición, toda esta reacción exotérmica se produjo en 1.10 minutos, para luego descender progresivamente. Tambien se evaluó el pH a través del **pH-metro** obteniéndose un resultado de 12, denotando un pH de una solución alcalina.

Se fabricaron muestras cubicas de 5x5x5cm con el fin de comprobar la activación alcalina y proceso de geo polimerización de la cerámica, evaluándose al **ensayo de compresión** en un tiempo de curado al aire libre de 7, 14, 28 días, obteniéndose valores promedio de 1.28 kN, 2.36 kN y 3.37 kN respectivamente, observándose un aumento progresivo en la resistencia a la compresión, por consecuente se comprueba que la cerámica se puede activar alcalinamente, pero este material por sí solo aun es muy frágil.

Esto concuerda con los resultados de la investigación de Bonilla, González y López [12], donde menciona que los residuos de ladrillo de arcilla, con una composición parecida a la cerámica ambos de origen arcilloso son adecuados para la creación de un geo polímero concordando con el aumento de resistencia a la compresión, pero se obtuvieron valores mayores, esto puede explicarse por la granulometría que tenía el material precursor, además que se utiliza una mezcla de activantes alcalinos que pueden producir un mejor proceso geo polimérico.

### *Caracterización mecánica suelo-geo polímero*

#### *Ensayo de límites de Atterberg*

En este ensayo se pudo observar que hubo mejoras en cuanto a las características del suelo, pues en todos los casos de estudio se redujo el Límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP). Se detalla a continuación los resultados que se tuvieron:

#### *Límite líquido*

Para todos los casos se inicia con un LL mayor a 30%, característico de los suelos con propiedades cohesivas. notándose que al aumentar el porcentaje de geo polímero reduce el LL de los suelos, de una manera progresiva y proporcional al porcentaje de adición, para el porcentaje de 10% de geo polímero solo lo reduce en 2-4%, para el porcentaje de 20% y 30% de geo polímero lo reduce en un rango de 7-10%, siendo una característica diferenciadora de las estabilizaciones con cal que aumentan el LL y el cemento que solo lo hacen variar ligeramente, menciona el manual de carreteras. [18]

### *Limite plástico*

Las muestras de suelo natural cuentan con un LP de entre 25 - 30%, por otro lado, el suelo con geo polímero con el porcentaje de 10% lo aumenta en 6% para la C-01, y cuando el porcentaje de este material se aumenta reduce el LP de los suelos hasta valores similares al de la muestra natural. Por otro lado, con la C-02 y C-3, aumenta el LP ligeramente en 1% para 10% de geo polímero, cuando se aumenta el porcentaje de este material se reduce hasta valores inferiores al de las muestras de suelo natural. En síntesis, se puede deducir que LP varía según el tipo de suelo y el porcentaje de adición, pues para la C-01 (CL), 10% de geo polímero aumenta el valor del LP y según se aumenta el porcentaje de adición retorna a casi el LP inicial, en cambio para las C-02 (ML) y C-03 (ML), aumenta el ligeramente el valor de LP, según se aumenta el porcentaje de geo polímero se reduce el LP.

### *Índice de plasticidad*

El suelo natural tiene IP altos, en un rango de 9 - 16%, considerándose como un suelo de plasticidad media. Para todos los porcentajes de geo polímero se logró reducir el IP, este parámetro se reduce drásticamente para las muestras con 20% de geo polímero en un rango de 4 - 6% y para las muestras con 10% y 30% de geo polímero los valores son similares estando en un rango de 6 - 8%, siendo estos valores característicos de suelos con baja plasticidad, denotando una mejoría a la calidad del suelo; pues al reducir el IP se reducen las propiedades cohesivas y expansivas, así como los cambios volumétricos excesivos y su alta deformabilidad, propiedades características de suelos con IP elevado.

### *Proctor modificado*

En este ensayo se obtienen los resultados de la Máxima Densidad Seca (MDS) y Optimo Contenido de Humedad (OCH). Se observan mejoras en ambas características, pues estos no se modifican varían demasiado y en otros aumentan mejorando las propiedades de las muestras naturales. A continuación, se detallan los resultados para cada parámetro:

Se aprecia que el geo polímero de cerámica modifica la Máxima Densidad Seca del suelo natural aumentando según incrementa el porcentaje de adición, por otro lado, también se disminuye el óptimo contenido de humedad, las gráficas colocándose a la parte izquierda de la curva de muestra natural, deduciéndose que este material produce efectos beneficiosos al provocar que las partículas de los suelos finos agrupándolas y reduciendo los vacíos mediante un efecto químico, este efecto se llama floculación.

Este fenómeno concuerda con los estudios realizados por Soto [11], donde en sus resultados de Proctor se observa que la DMS aumenta y el OCH disminuye, comparándolo con sus resultados de Proctor de suelo-geo polímero de arcilla calcinada, que tiene propiedades semejantes a las de la cerámica. Menciona que la finura del material precursor (cerámica) permite que en el proceso geo polimérico los iones de sodio entren con más facilidad en las cavidades de la mezcla y así reduce los vacíos presentes.

### *Relación de soporte de California (C.B.R.)*

#### *Expansión*

Analizando los resultados, se puede observar mejoras en la expansión del terreno natural, para la C-01 para 95% de C.B.R. tiene un 0.73 % de expansión, esto debiéndose al tipo de suelo ya que las arcillas o los suelos que contengan grandes porcentajes de material pasante por la malla 200, son los responsables del porcentaje de expansión, al evaluar la expansión para 10%, 20% y 30% de geo polímero esta mejora a 0.33%, 0.27% y 0.22%, respectivamente. Dando el mismo resultado para las otras dos calicatas. Esto puede deberse a la cantidad de material silicio presente en el material precursor y con la adición de la solución alcalina producen el efecto geo polimérico esto generando la reducción de la expansión presente en el suelo natural.

Estos resultados concuerdan con **Soto [11]**, quien en su investigación encontró indica que al aumentar el material precursor se reduce la expansión de su suelo natural, siendo la arcilla calcinada el de mejores resultados en cuanto a la expansión comparado con otros materiales precursores. Menciona que los silicatos de aluminio presentes en estos materiales son los responsables del efecto geo polimérico.

#### *Índice de C.B.R.*

En este ensayo se obtienen los resultados de la Máxima Densidad Seca y Optimo Contenido de Humedad. Se observa que el porcentaje de 30% de geo polímero de cerámica, obtiene el mejor índice de C.B.R. aumentando hasta 3500% con respecto a la muestra natural. Dando como resultado que brinda un mayor índice de C.B.R y un menor grado de expansión en comparación con las otras adiciones siendo el más beneficioso para el uso como subrasante.

Concordando con el estudio de Soto [11], quien en su investigación también encuentra mejores valores de C.B.R. y menora grado de expansión con el de arcilla calcinada, compara otros materiales precursores como el mortero reciclado e ignimbrita, pero estos obtienen

resultados inferiores a los de la arcilla calcinada, demostrando lo expuesto en esta investigación pues la cerámica tiene una composición similar, por otro lado recomienda mejorar el suelo con este geo polímero a base de arcilla calcinada para uso como subrasante.

### *Resistencia a la compresión uniaxial de muestras de suelo*

Analizando los resultados en cuanto a la compresión en muestras de suelo-geo polímero, se observa un incremento según el porcentaje de geo polímero de cerámica y el tiempo de curación, algunos resultados pudieron verse afectados por el proceso de secado al horno de las muestras. Esto concuerda con el ensayo inicial donde se realizó probetas cúbicas y se comprobó que el proceso geo polimérico, sigue su proceso durante el tiempo. Además, que este proceso se ve afectado por diversos factores como la temperatura, la cantidad de material precursor o la concentración de la solución alcalina.

Concordando con los estudios realizados por Bonilla, González y López [12], quienes también encuentran el mismo comportamiento en sus probetas de mortero geo polimérico, con la diferencia que se utiliza una granulometría más fina en comparación a la presente investigación, que el material precursor se tamiza por el tamiz #30, esto para asemejarse a la granulometría de un agregado fino.

La resistencia del suelo-geo polímero de cerámica aumento conforme avanza el tiempo y la cantidad de material geo polimérico, en un porcentaje promedio para las tres calicatas a los 28 días de 86% para el porcentaje de 10% de geo polímero, en cuanto al porcentaje de 20% de geo polímero se obtuvo un incremento del 104% y para el porcentaje de 30% de geo polímero se incrementó en un 133%.

### *Ensayo de succión*

Se le realizó el ensayo con el fin de ver la ascendencia de agua por capilaridad en el transcurso del tiempo, para las muestras de suelo natural se observó una rápida absorción del agua esto en la primera hora, para luego ascender progresivamente hasta saturarse totalmente o fallar esto transcurrido en 4.5 horas. A diferencia de las muestras de suelo-geo polímero de cerámica que mientras se aumenta el porcentaje de mezcla, ira reduciendo la altura de ascendencia de agua, saturándose totalmente en aproximadamente 8 horas, demostrando que este material ayuda a la impermeabilización o retrasa el proceso de absorción del agua. Al término del ensayo las muestras de suelo-geo polímero de cerámica, no se agrietaron o

denotaron algún signo de falla, a diferencia de las muestras naturales que rápidamente fallaron, esto sería por la cantidad de arcillas que están presentes, y el agua reduce la fuerza de cohesión en sus moléculas.

### Conclusiones

- Se realizó la evaluación físico-mecánica de los suelos adicionados con geo polímero de cerámica reciclada, los suelos naturales mostraron un estado malo a regular, siendo no aptos para el uso como subrasante. Luego de los ensayos se comprobó que mejoran sus propiedades pudiéndose utilizarse como una subrasante de mejores condiciones, hasta elevando sus propiedades a índices de CBR muy altos, parecidos a los de materiales tradicionales para la estabilización de suelos.
- Se caracterizó las propiedades de los suelos, de diferentes puntos de estudio, encontrándose suelos según clasificación SUCS del tipo CL y ML, siendo estos suelos finos, comprobándose por gravedad específica de los sólidos que están en el rango de 2.6-2.8% de los suelos arcillosos y limos. También se encontró que estos suelos naturales presentaban una capacidad de soporte no apta para suelo de subrasante ( $CBR < 6\%$ ), por otro lado, su densidad fue baja. En cuanto a sus índices de plasticidad se encontró que son suelos de 9-17% de índice de plasticidad, donde una calicata tiene índice de plasticidad alto, siendo perjudicial para el uso de subrasante. Comparado con los suelos con geo polímero de cerámica, los resultados aumentaron y mejoraron sus propiedades tanto físicas como mecánicas, creciendo los valores de mejora según se aumenta la cantidad de adición. Concluyéndose que todos los porcentajes de adición son recomendables para la mejora de los suelos, siendo el de mejores resultados la adición de 30%, pues obtiene un índice de CBR promedio de 149% al 95% de la MDS, muy alto comparado con el suelo natural.
- Se propuso un procedimiento para la recolección de la cerámica, dándole un tratamiento previo al material, con lo que se realizó en un botadero de la ciudad, donde se encontró grandes cantidades de este desecho de la construcción. Luego se procedió a darle un lavado, secado y posterior chancado manual, esto con el fin de reducir la cerámica para su trituración en la máquina de los ángeles. Terminado este proceso, se procede a tamizar el material resultante por la #30, esto con el fin de obtener

un material con una granulometría parecida a la de un agregado fino, terminado el proceso se procedió a empacar para su posterior uso en los ensayos de laboratorio.

- Se identificó la estructura o composición química de la cerámica reciclada, mediante el ensayo de fluorescencia y difracción de rayos X, para la realización de este ensayo se pasó por el tamiz #200, se encontró que los minerales predominantes son el Dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), en un 43.97% y el Trióxido de calcio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en un 17.82%, quienes serían los materiales responsables o de mayor participación en el proceso geopolimérico. Por otro lado, se hizo el análisis térmico diferencial, donde se encontró que la entre en las regiones de 390-500 °C y 600-700 °C, es donde se hace más intensa la pérdida de material, al término del ensayo pierde 17% de masa aproximadamente.
- Se analizaron los resultados de los ensayos de los suelos estabilizados con geopolímero elaborado de cerámica, realizando gráficos estadísticos, donde se visualiza el porcentaje de mejoría de acuerdo con los ensayos de laboratorio. En cuanto a los límites de plasticidad, tiene el comportamiento de reducir el IP. Para el ensayo de Proctor aumenta la MDS y reduce el OCH, moviendo la gráfica hacia la izquierda de la gráfica de suelo natural. Por otro lado, se tuvo un aumento del índice de CBR hasta en un 3500%, con respecto al índice de CBR natural, en cuanto a la expansión también se ve mejoría pues la reduce progresivamente según se aumenta la cantidad de geopolímero. Se realizó el ensayo de succión por capilaridad de las muestras de suelo natural y geopolimérico, donde se identificó que las muestras naturales tenían una rápida absorción y aumentaba la inestabilidad del suelo, viéndose una mejora significativa en cuanto a la reducción de absorción por capilaridad mientras se aumenta la cantidad de geopolímero, teniendo una absorción total de hasta 8 horas, la estabilidad de estas muestras no se vio afectada pues el agua no fue un factor que afecte a este, pudiendo utilizarse para otro tipo de mejoramiento como el de la estabilidad de taludes. Concluyendo que el geopolímero de cerámica reciclada mejor las propiedades de los suelos pudiéndose utilizar como subrasante mejorada y entre otros posibles usos que se le dé.
- Se comprobó los efectos que tiene el geopolímero en las muestras de suelo con el paso del tiempo, esto se hizo con el ensayo de compresión en muestras de suelo. Las muestras de suelo natural muestran una resistencia mínima, que va aumentando según el paso del tiempo, pero sigue siendo muy baja. Por otro lado, se concluyendo que mientras

aumenta el porcentaje de geo polímero de cerámica y el tiempo de curado de las muestras aumenta la resistencia. A resistencias iniciales aumenta notablemente su resistencia, y a medida que pasa el tiempo este se duplica a los 28 días, obteniéndose la mayor resistencia para las muestras con 30% de geo polímero de cerámica reciclada, sin embargo, los otros dos porcentajes siguen siendo óptimos para mejorar la resistencia, siendo el factor económico el decisivo.

- Se determinó mediante una evaluación de impacto ambiental los impactos ambientales durante el proceso constructivo, donde se identificó los siguientes procesos: limitación de la zona de trabajo, pulverización del suelo, adición de material precursor, mezcla de solución alcalina, mezcla de solución alcalina, compactación, terminación o perfilado y por último el curado. También se hizo la identificación de los factores ambientales, dividiéndose en tres medio físico, medio biológico y medio social. Mediante la matriz de Leopold se hizo el análisis de la estabilización de suelos con geo polímero de cerámica, donde se encontró que la mezcla de la solución alcalina es el de máximo impacto negativo con un valor promedio de -516 en la matriz de Leopold, esto debido a que es una solución que puede producir irritación a la piel y su utilización se tiene que hacer con la protección necesaria, en segundo lugar se encuentra la pulverización del suelo, esto en su mayoría por la utilización de maquinaria, obteniendo un valor negativo de -299.
- Se evaluó de manera técnica con métodos tradicionales como son el cemento portland y la cal viva, encontrando que el material precursor para la elaboración del geo polímero, siendo la cerámica, tiene una granulometría mayor que estos materiales, estando en un diámetro de partículas de  $75 \mu\text{m} < D < 600 \mu\text{m}$ , siendo mayor a los diámetros de los materiales tradicionales para la estabilización de suelo. Esto sería una mejora técnica pues reduciría el tiempo y uso de energía para la trituración del material estabilizante. En cuanto a la evaluación económica se concluye que el porcentaje de 10% de geo polímero resulta más económico a comparación de los métodos tradicionales, teniendo un costo de S/5.25 por m<sup>2</sup>. Para el porcentaje de 20% de geo polímero se tendría un costo de S/20.98 por m<sup>2</sup>, siendo mayor respecto al costo de la cal viva, sin embargo, resulta menor al costo del cemento portland. Finalmente, para el porcentaje de 30% de geo polímero con un costo de S/47.21 por m<sup>2</sup>, resulta elevado el costo respecto a los dos métodos tradicionales.

## Recomendaciones

- Evaluar diferentes tipos de suelo, realizando su caracterización recolectando información que puede ser utilizada por otros investigadores, además que se así se puede estudiar el comportamiento de este material geo polimérico, en la mejora de estos suelos siendo de suma importancia para la población en general y aportes significativos a la ingeniería.
- Elaborar estudios de la utilización de nuevos materiales precursores, con el objetivo de aumentar el uso de materiales de desecho como materiales alternativos y ecológicos utilizados en la industria de la construcción como agentes de mejora en el suelo y posiblemente otro tipo de aplicaciones.
- Seguir con los estudios en otro tipo de aplicaciones como otras capas del pavimento donde se requiera mejorar su capacidad de soporte, así también como el uso en taludes o realizar otro tipo de ensayos que ayuden a complementar este estudio.
- Evaluar otro tamaño de finura del material precursor y otras concentraciones de soluciones alcalinas, pues son factores que influyentes en el proceso de geo polimérico, así como la temperatura a la que este expuesto el material.
- Tener cuidado con la manipulación inadecuada de la solución estabilizante pues tiene propiedades químicas que pueden ser irritantes para la piel u otro órgano que se puede ver afectado durante su manipulación, recomendando utilizar todo el equipo de seguridad completo, que salvaguarde la salud de las personas que realicen los ensayos.
- Seguir estudiando la permeabilidad o comportamiento con el agua de este material, pues es un factor importante que altera la estructura de los suelos y/o estructuras civiles, con el fin de buscar más aplicaciones.
- Evaluar el comportamiento de este tipo de estabilización mediante un tramo de prueba, comparándolo con los resultados encontrados en la presente investigación aportando nuevos conocimientos que pueden ser de ayuda para la comunidad científica.

## Referencias

[1] Higuera carlos Gomez jenny, Pardo Oscar. “Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio”. Revista facultad de ingeniería, 21. 2012.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4222676>

[2] Bensaifi, E., Bouteldja, F., Nouaouria, M. S., & Breul, P. (2019). Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl. *Transportation Geotechnics*, 20, 100244. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100244>

[3] Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista ingeniería de construcción*, 32(2), 05–12. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732017000200001>

[4] “Marisa Carrascoso Arranz - CSIC - Cementos eco-eficientes con residuos cerámicos”. R+D CSIC - Inicio. Accedido el 21 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://rdcsic.dicat.csic.es/tecnologia-de-materiales-2/99-ofertas-tecnologicas/232-cementos-eco-eficientes-con-residuos-ceramicos>

[5] Municipalidad de Lima. Gerencia de Servicios a la Ciudad y Gestión Ambiental Subgerencia de Servicios a la Ciudad. Estudio de caracterización de residuos sólidos municipales en el cercado de lima. [En línea]. Disponible: <https://smia.munlima.gob.pe/uploads/documento/70ac2582a8218dd9.pdf>

[6] N. Ulloa, M. Jiménez, B. Serrano y C. Serrano, “GEOPOLÍMEROS BASADOS EN ZEOLITAS NATURALES COMO UNA ALTERNATIVA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN”, *Rev. Ing. Construcción*, 2022. Accedido el 21 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.7764/ric.00011.21>

[7] Pourakbar, S., & Huat, B. K. (2016). A review of alternatives traditional cementitious binders for engineering improvement of soils. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1–11. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1207042>

[8] P. R. Vora y U. V. Dave, “Parametric Studies on Compressive Strength of Geopolymer Concrete”, *Procedia Eng.*, vol. 51, pp. 210–219, 2013. Accedido el 21 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.030>

[9] Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., & Pinto, A. T. (2012). Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation. *Construction and Building Materials*, 29, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.049>

[10] Hamidi, R. M., Man, Z., & Azizli, K. A. (2016). Concentration of NaOH and the Effect on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer. *Procedia Engineering*, 148, 189–193. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.568>

[11] P. Soto, “Estabilización de suelos mediante activación alcalina de residuos de ignimbrita, arcilla calcinada y mortero reciclado para su uso como subrasante mejorada”. Tesis de bachiller. Arequipa. 2019.

[12] Bonilla, Gonzales y López, Desarrollo de la resistencia a la compresión de un geo polímero obtenido a partir de residuos de ladrillo de arcilla, Tesis pregrado, Universidad la gran Colombia facultad de ingeniería civil, Bogotá, 2017.

[13] E. Juárez y A. Rico. *Mecánica de Suelos: Fundamentos de la Mecánica de suelos. México*. Limusa Noriega editores. 2005.

[14] Jaramillo, Daniel. *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad nacional de Colombia. Medellín. 2002.

[15] Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto. “Conociendo los suelos de Moquegua. Moquegua: Predes. Centro de Estudios y Prevención de Desastres”.2004.

[16] Duque, Gonzalo y Escobar, Carlos. *Geomecánica*. Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 2016.

[17] M. D. Braja. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cuarta ed., México: Cengage learning. 2015.

[18] Manual de carreteras: suelos geología, geotecnia y pavimentos. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Lima. 2014.

[19] Norma CE.020: Suelos y taludes. Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. Sencico, Lima. 2010.

[20] Duque, Gonzalo y Escobar, Enrique. *Mecánica de suelos*. Manizales. Universidad Nacional de Colombia. 2002.

[21] Yaghoubi, M., Arulrajah, A., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Bo, M. W., & Darmawan, S. (2018). Effects of industrial by-product based geopolymers on the strength

development of a soft soil. *Soils and Foundations*, 58(3), 716–728. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.03.005>

[22] Liew, Y.-M., Heah, C.-Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in Materials Science*, 83, 595–629. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>

[23] Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>

[24] Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals Engineering*, 20(14), 1261–1277. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.07.011>

[25] Toniolo, N., & Boccaccini, A. R. (2017). Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review. *Ceramics International*, 43(17), 14545–14551. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.221>

[26] Ye, N., Yang, J., Ke, X., Zhu, J., Li, Y., Xiang, C., Wang, H., Li, L., & Xiao, B. (2014). Synthesis and Characterization of Geopolymer from Bayer Red Mud with Thermal Pretreatment. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(5), 1652–1660. <https://doi.org/10.1111/jace.12840>

[27] Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(98)00243-9)

[28] S. Minaya y A. Ordóñez. Diseño moderno de pavimentos asfálticos, Lima. Universidad nacional de ingeniería. 2006.

[29] *Tipos de pavimento. Conócelos — Ingeniería y Construcción Colombia.* (s.f.). Ingeniería y Construcción Colombia. <https://www.ingenieriayconstruccioncolombia.com/tipos-de-pavimento/>.

[30] Bahamondes, R., Echaveguren, T., & Vargas-Tejeda, S. (2013). Análisis de métodos de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón. *Revista de la construcción*, 12(3), 17–26. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2013000300002>

[31] *Norma CE.010: Pavimentos Urbanos*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Sencico. 2010. Lima, Perú.

[32] Davidovits, J. “Geopolymer Chemistry and Applications”. Lulu Press, Inc. 2008

[33] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, «Manual de Ensayos de laboratorio,» Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Lima, 2016.

[34] “Qué es el pH y qué importancia tiene en el detailing - Instituto Detailing”. Instituto Detailing. Accedido el 21 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://institutodetailing.com/blog/que-es-el-ph-y-que-importancia-tiene-en-el-detailing/>

[35] “Vista de Recursos para las CTMA: La matriz de Leopold, un instrumento para analizar noticias de prensa de temática ambiental”. RACO – RACO. Accedido el 21 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/88684/132833>

[36] Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento, «Norma técnica E.050 Suelos y cimentaciones,» ICG - Instituto de Construcción y Gerencia, Lima, 2018.

[37] T. W. Lambe y R. V. Whitman, «Mecánica de suelos,» de Mecánica de suelos, México, Noriega editores, 2004, pp. 41-52.

[38] M. I. Sánchez de Rojas, F. Frías, J. Rivera, M. J. Escorihuela y F. P. Marín, “Investigación sobre la actividad puzolánica de materiales de desecho procedentes de arcilla cocida”, *Mater. Construcción*, vol. 51, n.º 261, pp. 45–52, marzo de 2001. Accedido el 23 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3989/mc.2001.v51.i261.379>

[39] “En el Perú solo se recicla el 1.9% del total de residuos sólidos reaprovechables”. Ministerio del Ambiente. Accedido el 25 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/en-el-peru-solo-se-recicla-el-1-9-del-total-de-residuos-solidos-reaprovechables/>

[40] SUNASS, “Tarifas de agua potable de SEDAPAL”. Accedido el 11 de junio de 2024.  
[En línea]. Disponible:  
[https://www.sunass.gob.pe/doc/normas%20legales/2017/re21\\_2017cd\\_qres2.pdf](https://www.sunass.gob.pe/doc/normas%20legales/2017/re21_2017cd_qres2.pdf).

## Anexos



*Proceso de recolección de cerámica.*



*Trituración y limpieza de cerámica reciclada.*



*Trituración en máquina de los ángeles.*



*Material tamizado por tamiz #30.*



*Materiales para elaboración de geo polímero.*



*Probetas geo polímero de cerámica.*



*Probeta cubica, cristalización superficial.*



*Ensayo de compresión en prensa a probetas cubicas de geo polímero.*



*Elaboración de calicatas y muestreo de suelo.*



*Muestreo de suelo para ensayos preliminares.*



*Ensayo de granulometría por tamizado.*



*Ensayo de límites de Atterberg.*



*Ensayo de límites de Atterberg.*



*Ensayo de Proctor.*



*Molde compactado ensayo de Proctor.*



*Medición de expansión ensayo de C.B.R.*



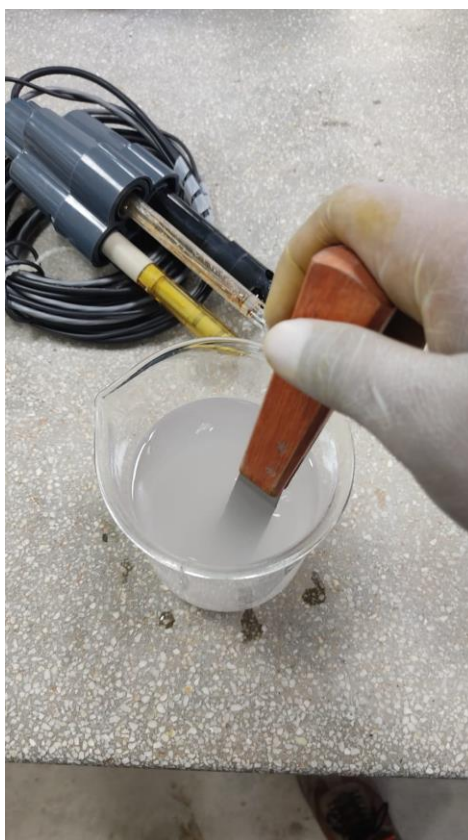
*Penetración ensayo de C.B.R.*



*Moldes C.B.R. en agua.*



*Evaluación de pH solución soda caustica.*



*Elaboracion de solucion alcalina de soda caustica.*



*Ensayo de proctor, suelo- geopolimero de ceramica.*



*Mezcla muestra de suelo con geo polímero de ceramica.*



*Medicion de molde.*



*Compactacion de probetas para ensayo de compresion en muestras de suelo.*



*Muestras de suelo-geo polímero de cerámica.*



*Ensayo de compresion en muestras de suelo.*



*Ensayo de succión muestras de suelo-geo polimero.*



*Comparacion de muestras natural con muestras de suelo-geo polimero.*



*Ensayo de succion en muestras de suelo.*

[https://drive.google.com/drive/folders/1pf\\_3G3hC0XEVMeh310ecE9UMubtEm07Z?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1pf_3G3hC0XEVMeh310ecE9UMubtEm07Z?usp=drive_link)

*Reporte ensayos de laboratorio*