

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Influencia del tamaño y contenido de partículas de vidrio
reciclado en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso:
Resistencia a la compresión y permeabilidad**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Aldeir Pomari Cañazaca

Mary Luz Ccari Laura

Asesor:

Mtro. Leonel Chahuares Paucar

Juliaca, diciembre de 2024

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mtro. Leonel Chahuares Paucar, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“INFLUENCIA DEL TAMAÑO Y CONTENIDO DE PARTÍCULAS DE VIDRIO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO ARCILLOSO: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y PERMEABILIDAD”** de los autores **Aldeir Pomari Cañazaca** y **Mary Luz Ccari Laura** de los autores tiene un índice de similitud de 16% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 10 del mes de diciembre del año 2024.



Mtro. Leonel Chahuares Paucar
Asesor



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 04 día(s) del mes de diciembre del año 2024 siendo las 09:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Ing Herson Duberly Pari Gusi, el (la) secretario(a): Mg. Edwin Parillo Escarsuna y los demás miembros: Dr. Néstor Alejandro Cruz Galapuja y el (la) asesor(a) Mtro. Leonel Chichuarez Paucar con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

Influencia del tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso: Resistencia a la compresión y permeabilidad

del(los) bachiller(es): a) Mary Luz Gori Laura
 b) Aldeir Pomari Ganazoca
 c) _____

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Civil
(Denotificación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado. Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Mary Luz Gori Laura

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (b): Aldeir Pomari Ganazoca

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (c): _____

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
 Presidente/a
[Firma]
 Asesor/a
[Firma]
 Bachiller (a)

[Firma]
 Miembro
[Firma]
 Bachiller (b)

[Firma]
 Secretario/a

 Miembro

 Bachiller (c)

Lista de Contenido

Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
1. Introducción.....	9
2. Metodología.....	12
2.1. Diseño metodológico.....	12
2.2. Selección y preparación del suelo arcilloso	13
2.3. Método de muestreo	14
2.4. Caracterización del suelo arcilloso.....	15
2.5. Recolección y clasificación de las partículas de vidrio reciclado	16
2.6. Preparación de las mezclas de suelo con vidrio reciclado	19
2.7. Ensayos de Laboratorio.....	21
2.7.1. Ensayos de resistencia a la compresión	21
2.7.2. Ensayos de permeabilidad.....	22
2.8. Análisis de datos.....	26
3. Resultados.....	28
3.1. Caracterización de las mezclas suelo-vidrio	28
3.2. Resistencia a la compresión en función del tamaño y contenido de partículas de vidrio 30	
3.2.1. Influencia de la adición del 25% de partículas de vidrio en la resistencia a la compresión de suelos arcillosos	30
3.2.2. Influencia de la adición del 35% de partículas de vidrio en la resistencia a la compresión de suelos arcillosos	35
3.2.3. Comparación de la Resistencia a la Compresión entre Muestras con un 25% y un 35% de Vidrio de Diferentes Tamaños de Partículas	40
3.3. Permeabilidad en función del tamaño y contenido de partículas de vidrio.....	42
3.4. Aplicación práctica para el diseño de cimentaciones.....	45
3.5. Impacto económico del uso de vidrio reciclado en suelos	46
3.6. Análisis estadístico de los resultados	47
4. Discusiones.....	50
5. Conclusiones.....	53
6. Lista de Referencias.....	55
Anexos	58

Lista de Contenido

Tabla 1. <i>Características del vidrio reciclado utilizado en el estudio</i>	17
Tabla 2. <i>Proporción de mezclas experimentales suelo-vidrio reciclado</i>	20
Tabla 3. <i>Características del suelo analizado</i>	29
Tabla 4. <i>Comparación de carga y resistencia en diferentes ensayos de muestras de suelo:</i> <i>Control de Suelo Arena Arcillosa sin Adicionamiento</i>	31
Tabla 5. <i>Comparación de carga y resistencia en diferentes ensayos de muestras de suelo:</i> <i>Control de Suelo Arena Arcillosa sin Adicionamiento</i>	31
Tabla 6. <i>Comparación de carga y resistencia en diferentes ensayos de muestras experimentales con adición de vidrio de 2-4 mm al suelo</i>	32
Tabla 7. <i>Comparación de carga y resistencia en diferentes ensayos de muestras experimentales con adición de vidrio de 4-6mm al suelo</i>	33
Tabla 8. <i>Resistencia a la compresión de muestras de suelo-vidrio con diferentes tamaños de vidrio reciclado</i>	34
Tabla 9. <i>Resistencia a la compresión de muestras experimentales de suelo con un 35% de vidrio de 0-2mm</i>	36
Tabla 10. <i>Resistencia a la compresión de muestras experimentales de suelo con un 35% de vidrio de 2-4mm</i>	37
Tabla 11. <i>Resistencia a la compresión de muestras experimentales de suelo con un 35% de vidrio de 4-6mm</i>	38
Tabla 12. <i>Resistencia a la compresión de muestras de suelo con diferentes adiciones de vidrio</i>	39
Tabla 13. <i>Resistencia a la compresión de muestras de suelo con diferentes tamaños y porcentajes de adición de vidrio</i>	41
Tabla 14. <i>Coefficiente de permeabilidad de diferentes tipos de muestras de suelo y adiciones de vidrio</i>	43
Tabla 15. <i>Comparación de parámetros obtenidos con valores referenciales según Terzaghi y Das</i>	45
Tabla 16. <i>Análisis estadístico descriptivo por grupo</i>	48
Tabla 17. <i>Análisis de Varianza (ANOVA)</i>	48
Tabla 18. <i>Pruebas de normalidad</i>	49

Lista de Gráficos

Gráfico 1. <i>Distribución granulométrica del suelo</i>	29
Gráfico 2. <i>Influencia de la adición de 25% de partículas de vidrio</i>	34
Gráfico 3. <i>Influencia de la adición de 35% de partículas de vidrio</i>	39
Gráfico 4. <i>Resistencia a la compresión entre las muestras con un 25% y 35% de vidrio de diferentes tamaños</i>	42
Gráfico 5. <i>Variación del coeficiente de permeabilidad en función del tamaño y contenido de vidrio</i>	43

Lista de Anexos

Anexo 1. Evidencia de sumisión	58
Anexo 2. Resolución de Expedito	59
Anexo 3. Ensayos de laboratorio	60
Anexo 4. Panel fotográfico de ensayos.....	62

Influencia del tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso: Resistencia a la compresión y permeabilidad

Influence of the size and content of recycled glass particles on the mechanical properties of a clay soil: Compressive strength and permeability

Resumen

Los suelos arcillosos plantean desafíos significativos en la ingeniería geotécnica debido a su alta plasticidad, baja permeabilidad y alta compresibilidad. Esta problemática, junto con la necesidad de gestionar eficazmente residuos de vidrio, demanda soluciones sostenibles para mejorar las propiedades del suelo. Un estudio se enfoca en analizar cómo el tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado afectan la resistencia a la compresión y la permeabilidad de suelos arcillosos. Se crearon muestras de suelo arcilloso mezcladas con partículas de vidrio reciclado en diversas proporciones (25% y 35%) y tamaños de partícula (0-2 mm, 2-4 mm, y 4-6 mm). Se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la compresión y se midió la permeabilidad de las muestras. La inclusión del 35% de vidrio de tamaño 2-4 mm incrementó notablemente la resistencia a la compresión, alcanzando un promedio de 35.15 kg/cm². En contraste, añadir un 25% de vidrio de tamaño 4-6 mm resultó en una menor resistencia promedio de 27.22 kg/cm². Se observó que la permeabilidad del suelo disminuía con el aumento del tamaño y contenido de partículas de vidrio, indicando una relación inversa entre la resistencia a la compresión y la permeabilidad en las mezclas de suelo y vidrio. El uso de vidrio reciclado puede mejorar las propiedades mecánicas de suelos arcillosos, impactando significativamente en la resistencia a la compresión y permeabilidad. La elección adecuada del tamaño y contenido de partículas de vidrio resulta crucial para optimizar estas propiedades, con repercusiones importantes en la planificación y ejecución de proyectos constructivos sostenibles.

Palabras clave: *Compresión, Permeabilidad, Propiedades mecánicas, Suelo Arcilloso, Vidrio.*

Abstract

Clay soils pose significant challenges in geotechnical engineering due to their high plasticity, low permeability, and high compressibility. This problem, together with the need to effectively manage glass waste, demands sustainable solutions to improve soil properties. A study focuses on analyzing how the size and content of recycled glass particles affect the compressive strength and permeability of clay soils. Clay soil samples mixed with recycled glass particles in various proportions (25% and 35%) and particle sizes (0-2 mm, 2-4 mm, and 4-6 mm) were created. Compressive strength tests were carried out and the permeability of the samples was measured. The inclusion of 35% of glass of size 2-4 mm significantly increased the compressive strength, reaching an average of 35.15 kg/cm². In contrast, adding 25% of 4-6 mm glass resulted in a lower average strength of 27.22 kg/cm². Soil permeability was observed to decrease with increasing glass particle size and content, indicating an inverse relationship between compressive strength and permeability in soil-glass mixtures. The use of recycled glass can improve the mechanical properties of clayey soils, significantly impacting compressive strength and permeability. The appropriate choice of glass particle size and content is crucial to optimise these properties, with important implications for the planning and execution of sustainable construction projects.

Keywords: *Compression, Permeability, Mechanical properties, Clay Soil, Glass.*

1. Introducción

Los suelos arcillosos presentan características específicas que plantean desafíos significativos en el campo de la ingeniería geotécnica. Estos desafíos incluyen su alta plasticidad, baja permeabilidad y alta compresibilidad (Ardianto et al., 2023). Estas propiedades pueden limitar su aplicación efectiva en proyectos de construcción, lo que requiere la implementación de métodos de mejora del suelo para optimizar sus propiedades mecánicas. En respuesta a esta necesidad, se ha despertado un creciente interés en la exploración de técnicas sostenibles que involucren el uso de materiales reciclados, lo cual contribuye a reducir el impacto ambiental de las actividades constructivas.

La incorporación de vidrio reciclado en suelos arcillosos se presenta como una alternativa prometedora. Estudios anteriores han evidenciado que la inclusión de partículas de vidrio tiene el potencial de mejorar aspectos fundamentales del suelo. Saberian et al. (2020) demostraron mejoras significativas en las propiedades mecánicas del suelo mediante la incorporación de vidrio triturado, mientras que Disfani et al. (2011) encontraron que el vidrio reciclado de tamaño mediano y fino exhibe características similares a los agregados naturales en términos de resistencia al corte. Por su parte, Yaghoubi et al. (2021) observaron modificaciones importantes en las características hidráulicas de los suelos mejorados con vidrio reciclado, y Chen et al. (2020) documentaron una mayor resistencia a la carga tras la incorporación de vidrio reciclado en agregados.

No obstante, existe un vacío en el conocimiento en lo que respecta a la influencia específica del tamaño y contenido de estas partículas de vidrio reciclado en las propiedades mecánicas y de permeabilidad de los suelos arcillosos. Aunque investigaciones previas han demostrado resultados prometedores, se requiere una comprensión más profunda de cómo diferentes tamaños y proporciones de vidrio reciclado afectan el comportamiento del suelo.

En este marco, la presente investigación tiene como propósito principal abordar la

siguiente cuestión: ¿De qué manera el tamaño y el contenido de partículas de vidrio reciclado influyen en la resistencia a la compresión y la permeabilidad de un suelo arcilloso? Con el fin de responder a este interrogante, se llevó a cabo un experimento que involucró la elaboración de muestras de suelo arcilloso combinadas con distintas proporciones (25% y 35%) y tamaños de partículas de vidrio reciclado (0-2 mm, 2-4 mm y 4-6 mm). Subsecuentemente, se efectuaron pruebas de resistencia a la compresión y permeabilidad en estas muestras, lo cual permitió evaluar el impacto de estas variables en las propiedades del suelo.

La resistencia a la compresión y la permeabilidad son parámetros fundamentales en el diseño de diversas obras de ingeniería civil. La resistencia a la compresión es crucial en el diseño de cimentaciones, muros de contención y terraplenes, ya que determina la capacidad del suelo para soportar cargas sin fallar. Por ejemplo, en el diseño de cimentaciones, una mayor resistencia a la compresión permite soportar mayores cargas estructurales y reducir el riesgo de asentamientos excesivos.

La permeabilidad, por otro lado, es esencial en el diseño de sistemas de drenaje, presas de tierra y barreras impermeables. En el caso de los sistemas de drenaje, una permeabilidad adecuada asegura la eficiente evacuación del agua, previniendo problemas como la socavación o la inestabilidad de taludes. Para las presas de tierra, la permeabilidad controlada es crucial para prevenir la erosión interna y mantener la integridad estructural.

Si bien la normativa peruana considera otros parámetros geotécnicos, este estudio se enfoca en la resistencia a la compresión y la permeabilidad debido a su relevancia universal en la evaluación de la calidad del suelo para aplicaciones de ingeniería civil. Según Terzaghi et al. (1996), estos parámetros son indicadores clave de la calidad del suelo. Un suelo con alta resistencia a la compresión (superior a 200 kPa) y baja permeabilidad (inferior a 10^{-6} cm/s) generalmente se considera adecuado para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería civil.

Otros parámetros importantes para evaluar la calidad del suelo incluyen el ángulo de

fricción interna, la cohesión, el índice de plasticidad y el contenido de humedad. De acuerdo con Das (2010), un suelo se considera "bueno" para la construcción cuando presenta un ángulo de fricción interna superior a 30° , una cohesión mayor a 50 kPa, un índice de plasticidad menor a 15 y un contenido de humedad óptimo. entre 10-20%.

Esta investigación se centra en la resistencia a la compresión y la permeabilidad debido a su impacto directo en la estabilidad y el comportamiento hidráulico de las estructuras geotécnicas, así como por su sensibilidad a la adición de materiales como el vidrio reciclado. Estos parámetros proporcionan una base sólida para evaluar la efectividad del vidrio reciclado como material de mejora del suelo en aplicaciones de ingeniería civil.

El vidrio reciclado, al ser empleado como un aditivo en suelos arcillosos, tiene la capacidad de influir en las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Siendo un material no poroso, el vidrio no permite la absorción de agua, lo cual puede contribuir a mejorar la permeabilidad del suelo al reducir la capacidad de retención de agua de la matriz arcillosa. Asimismo, el vidrio posee una elevada resistencia a la compresión, lo que puede incrementar la capacidad de carga del suelo mejorado.

La incorporación de partículas de vidrio reciclado en el suelo arcilloso también tiene el potencial de mejorar su estabilidad y reducir la expansión y contracción asociadas con las variaciones de humedad. El vidrio reciclado puede desempeñar un papel de refuerzo en la matriz del suelo, brindando una mayor cohesión y resistencia a la deformación.

La relevancia de este estudio radica en su aporte al desarrollo de prácticas constructivas sostenibles y la optimización de las propiedades geotécnicas de los suelos arcillosos mediante el uso de materiales reciclados. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa para el diseño y ejecución de proyectos de ingeniería civil y ambiental, fomentando soluciones más eficientes y respetuosas con el medio ambiente. Además, se espera que los hallazgos de esta investigación impulsen la implementación de técnicas de mejoramiento del suelo

utilizando vidrio reciclado en futuros proyectos de construcción, contribuyendo de esta manera a la sostenibilidad del sector.

2. Metodología

2.1. Diseño metodológico

Esta investigación emplea un enfoque cuantitativo, con un diseño experimental y explicativo. El estudio se centra en examinar cómo el tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado influyen en la resistencia a la compresión y permeabilidad de un suelo arcilloso, variables que son cuantificables y medibles.

La investigación adopta un diseño experimental debido a la necesidad de manipular y controlar sistemáticamente las variables independientes (tamaño y contenido de partículas de vidrio) para medir su efecto directo sobre las variables dependientes (resistencia a la compresión y permeabilidad). Este diseño permitió establecer relaciones causales verificables mediante la preparación controlada de muestras con proporciones específicas (25% y 35%) y tamaños definidos de vidrio (0-2 mm, 2-4 mm, y 4-6 mm), utilizando equipos calibrados como la prensa y el permeámetro. La validez del diseño experimental se confirmó mediante análisis estadísticos rigurosos, incluyendo pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, que demostraron la distribución normal de los datos ($p > 0.05$), y análisis ANOVA que reveló diferencias significativas entre grupos ($F = 989.723$; $p < 0.01$), respaldando así la robustez del método para evaluar el impacto del vidrio reciclado en las propiedades del suelo arcilloso.

El diseño experimental se implementa mediante la manipulación controlada del tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado (variables independientes) para observar su efecto en la resistencia a la compresión y permeabilidad del suelo (variables dependientes). Este enfoque permite establecer relaciones causales entre las variables estudiadas.

El alcance explicativo del estudio busca determinar cómo y por qué el tamaño y

contenido de partículas de vidrio reciclado afectan las propiedades mecánicas del suelo arcilloso, yendo más allá de la mera descripción de fenómenos.

El muestreo se realiza de manera no probabilística y deliberada, seleccionando muestras representativas de suelo arcilloso. Los ensayos de laboratorio siguen los procedimientos estandarizados de las normas ASTM y MTC, asegurando la validez y confiabilidad de los resultados.

Esta metodología sistemática permite abordar los objetivos de la investigación de manera científica, proporcionando una base sólida para analizar la influencia del vidrio reciclado en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso.

2.2. Selección y preparación del suelo arcilloso

En relación a la selección y preparación del suelo arcilloso, Ardianto et al. (2023) señalan que este tipo de suelo presenta un comportamiento distintivo al expandirse cuando está en contacto con el agua y contraerse al secarse. En este estudio, se recolectaron muestras representativas de suelo arcilloso en el distrito de Juliaca, región de Puno, Perú, utilizando el método de muestra aleatoria estratificado, tal como se describe en el trabajo de Ardianto et al. (2023). Este enfoque de muestreo permitió obtener una muestra diversa y representativa de las propiedades del suelo arcilloso en la zona de estudio.

Las muestras de suelo arcilloso fueron extraídas a una profundidad de 1,5 metros empleando una excavadora mecánica. Posteriormente, se almacenaron en contenedores herméticos con el objetivo de preservar sus propiedades físicas y químicas. Para garantizar la homogeneidad del suelo, las muestras se sometieron al proceso de cuarteo, el cual consiste en mezclar y dividir repetidamente el suelo hasta obtener submuestras uniformes y representativas.

En cuanto a la composición mineral del suelo arcilloso, Urs et al. (2022) destacan la presencia de diferentes tipos de arcilla, como la caolinítica y montmorillonítica. Estos minerales

arcillosos, como la illita-esmectita rica en esmectita, vermiculita, illita y caolinita, pueden encontrarse en el suelo arcilloso, presentando variaciones en su composición mineralógica a lo largo de los distintos horizontes del suelo, como menciona Kocaman et al. (2022).

El contenido de humedad en el suelo arcilloso juega un papel crucial en su comportamiento geotécnico, según Gverić et al. (2022). Estos autores resaltan que un mayor contenido de humedad está asociado con un aumento en la resistencia a la compresión y en las propiedades de cizallamiento del suelo arcilloso. Por otro lado, Abood et al. (2023) mencionan que factores como las condiciones de compactación y el contenido de arcilla pueden influir en la densidad y porosidad del suelo arcilloso. Estos factores son de gran importancia para comprender y predecir el comportamiento geotécnico del suelo arcilloso en diversas aplicaciones de ingeniería geotécnica.

2.3. Método de muestreo

Las muestras de suelo arcilloso se obtuvieron del distrito de Juliaca, región Puno, mediante un muestreo aleatorio estratificado. Las muestras fueron extraídas a una profundidad de 1.5 metros empleando una excavadora mecánica. Para asegurar la representatividad estadística y validez de los resultados, se identificaron tres estratos basados en la profundidad (0-50 cm, 50-100 cm, 100-150 cm), tomando 5 muestras aleatorias de cada estrato, resultando en un total de 15 muestras. Las muestras se almacenaron en contenedores herméticos para preservar sus propiedades físicas y químicas. La homogeneidad se garantizó mediante el proceso de cuarteo, dividiendo y mezclando repetidamente el suelo hasta obtener submuestras uniformes.

La decisión de realizar tres ensayos para cada combinación de tamaño y contenido de partículas de vidrio se fundamenta en consideraciones estadísticas y prácticas ampliamente aceptadas en la investigación geotécnica. Este número de repeticiones proporciona un equilibrio

entre la representatividad estadística y las limitaciones de recursos, permitiendo calcular una media y desviación estándar, detectar valores atípicos, y realizar un análisis de varianza básico. Para validar estadísticamente el tamaño de muestra, se aplicó la fórmula $n = (Z^2\alpha \times S^2) / d^2$, donde n es el tamaño de la muestra, $Z^2\alpha$ es 1.96 para un nivel de confianza del 95%, S es la desviación estándar estimada, y d es el error máximo admisible. Los cálculos resultaron en tamaños muestrales mínimos de 2.68 y 2.72 respectivamente, respaldando la decisión de realizar tres ensayos por combinación. Este enfoque estadístico proporciona resultados confiables y estadísticamente significativos para cumplir con los objetivos del estudio.

2.4. Caracterización del suelo arcilloso

El suelo arcilloso utilizado en este estudio pasó por un proceso integral de caracterización de acuerdo con las normas y metodologías establecidas en el campo de la ingeniería geotécnica. Para determinar sus propiedades físicas se realizaron una serie de pruebas de laboratorio. Estas pruebas abarcaron la evaluación de la distribución del tamaño de las partículas mediante análisis de tamiz, de acuerdo con la norma ASTM D422. Además, se determinaron los límites de Atterberg, incluidos el límite líquido y el límite plástico, según lo especificado por la norma ASTM D4318, para conocer mejor el comportamiento del suelo en relación con su contenido de humedad y plasticidad.

Para comprender el comportamiento y anticipar la respuesta del suelo arcilloso ante la incorporación de partículas de vidrio reciclado, se realizaron varios ensayos de laboratorio para conocer sus propiedades físicas y mecánicas. El primer paso consistió en realizar un análisis granulométrico mediante tamizado, de acuerdo con la norma ASTM D422. Este análisis nos permitió determinar la distribución del tamaño de las partículas en el suelo, incluidas las proporciones de grava, arena y finos (limo y arcilla). Posteriormente se evaluaron los límites de consistencia del suelo mediante las pruebas de límite líquido y límite plástico, siguiendo los

lineamientos marcados en la norma ASTM D4318. Estas pruebas proporcionaron información valiosa sobre el comportamiento del suelo en cuanto a su contenido de humedad y plasticidad.

Además, se determinaron los diámetros efectivos del suelo (D60, D50, D30 y D10) para evaluar sus propiedades de compactación, permeabilidad y resistencia (Abood et al., 2023). Las pruebas de clasificación de suelos se realizaron siguiendo los lineamientos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (ASTM D2487) y la clasificación AASHTO (ASTM D3282). Posteriormente, el suelo se categorizó utilizando tanto el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como la clasificación de la Asociación Estadounidense de Carreteras y Transporte (AASHTO). Con base en la SUCS, el suelo se identificó como un suelo arcilloso arenoso (SC), mientras que la clasificación AASHTO lo clasificó como un suelo arcilloso bien graduado (A-2-4).

El análisis exhaustivo realizado sobre el suelo arcilloso ha establecido una base sólida para comprender su comportamiento y predecir su reacción ante la introducción de partículas de vidrio reciclado. Esta comprensión es crucial para evaluar el impacto de estas partículas en las propiedades mecánicas y de permeabilidad del suelo. Las pruebas realizadas han proporcionado datos vitales sobre la textura, plasticidad y rendimiento mecánico del suelo, permitiendo una evaluación integral de sus atributos y determinando su idoneidad para mejorar mediante la incorporación de vidrio reciclado.

2.5. Recolección y clasificación de las partículas de vidrio reciclado

El presente estudio utilizó un proceso integral de molienda de residuos de botellas de vidrio y pedazos de láminas de vidrio con el objetivo de lograr la separación y descontaminación simultánea de los materiales presentes en el vidrio residual (Jujun et al., 2018). En primer lugar, se llevó a cabo la trituration de los residuos de botellas de vidrio para obtener cullet. A continuación, se realizó una etapa de limpieza mediante agua corriente y el uso de un removedor

de polvo para eliminar impurezas, lo cual es crucial para garantizar la pureza del vidrio reciclado y evitar la contaminación de las mezclas de suelo arcilloso (Jujun et al., 2018).

Para garantizar la consistencia y replicabilidad del estudio, se han caracterizado detalladamente las partículas de vidrio reciclado utilizadas. La siguiente tabla resume las principales características del vidrio reciclado empleado en esta investigación:

Tabla 1

Características del vidrio reciclado utilizado en el estudio

Característica	Descripción
Color	Mezcla de vidrio transparente (70%), verde (20%) y ámbar (10%)
Tipo de botella	Botellas de bebidas (90%), frascos de alimentos (10%)
Tamaño de partículas	Pequeñas (0-2 mm), Medianas (2-4 mm), Grandes (4-6 mm)
Método de trituración	Molino eléctrico
Proceso de limpieza	Lavado con agua y detergente, enjuague con agua potable
Método de secado	Al Sol durante 24 horas
Densidad aparente	2,5 g/cm ³ ($\pm 0,1$ g/cm ³)
Absorción de agua	< 0,5%
Dureza (escala de Mohs)	5,5 - 6,5

Es importante destacar que se ha procurado mantener una distribución constante de colores y tipos de vidrio en todas las muestras para minimizar las fluctuaciones no controladas. El proceso de trituración se realizó en lotes para asegurar la homogeneidad del tamaño de las partículas dentro de cada categoría. Además, el riguroso proceso de limpieza y secado garantiza la eliminación de impurezas y humedad residual que podrían afectar los resultados de los ensayos.

Cabe mencionar que, aunque no se realizaron mediciones específicas para este estudio, la literatura sugiere que el vidrio reciclado generalmente presenta una densidad aparente de

alrededor de 2.5 g/cm³, una absorción de agua inferior al 0.5% y una dureza en la escala de Mohs. entre 5,5 y 6,5 (Disfani et al., 2011). Sin embargo, estos valores pueden variar dependiendo de la composición exacta y el procesamiento del vidrio, por lo que se recomienda realizar mediciones específicas en futuros estudios para una caracterización más precisa del material utilizado.

El cullet resultante se transportó a un almacén donde se procedió a su filtración y secado. Posteriormente, se sometió a un proceso de molienda en un molino de alta energía para obtener un polvo de vidrio de tamaño uniforme y controlado (Jujun et al., 2018). Este proceso de molienda fue realizado en un molino de granos adaptado, lo que permitió obtener partículas de vidrio con las características deseadas.

Una vez obtenido el polvo de vidrio, se llevó a cabo su tamizado utilizando una serie de tamices para separar las partículas en tres rangos de tamaño: 0-2 mm, 2-4 mm y 4-6 mm. Esta selección de rangos de tamaño se realizó con el propósito de evaluar la influencia del tamaño de las partículas en las propiedades mecánicas de las mezclas de suelo arcilloso. El proceso de tamizado siguió los procedimientos estándar establecidos en la norma ASTM C136, garantizando así la precisión y reproducibilidad de la clasificación de las partículas de vidrio.

El proceso integral descrito demostró ser altamente eficiente en la clasificación y al mismo tiempo respetuoso con el medio ambiente, permitiendo la separación y descontaminación de los diversos materiales presentes en los residuos de vidrio (Jujun et al., 2018). Sin embargo, para mejorar aún más el proceso, se podría haber considerado la incorporación de un equipo de clasificación de vidrio que incluya un dispositivo de detección AOI, posiciones de carga y un controlador, como sugiere el estudio realizado por Zhu et al. (2019). La implementación de este equipo habría permitido una clasificación automática de los productos de vidrio según categorías, reemplazando la clasificación manual y mejorando significativamente la capacidad de producción. La incorporación de tecnologías avanzadas de clasificación y detección, como

las sugeridas por Zhu et al. (2019), podría optimizar aún más el proceso de reciclaje de vidrio, aumentando la eficiencia y precisión en la separación de los diferentes tipos y colores de vidrio. Esto resultaría en partículas de vidrio de mayor pureza y calidad, lo cual sería beneficioso para su aplicación en la mejora de suelos arcillosos.

2.6. Preparación de las mezclas de suelo con vidrio reciclado

Para preparar las mezclas, se combinó el suelo arcilloso con diferentes porcentajes de partículas de vidrio reciclado: 25% y 35%. Estos porcentajes se seleccionaron en base a estudios anteriores que sugieren un rango óptimo para mejorar las propiedades mecánicas del suelo. La mezcla se realizó según las recomendaciones de Ojotisas et al. (2023), quienes señalaron la importancia de pesar cuidadosamente las proporciones adecuadas de suelo y vidrio, y mezclarlas de manera uniforme para obtener una distribución homogénea de las partículas.

La elección de las proporciones de vidrio reciclado del 25% y 35% se fundamenta en los hallazgos de estudios previos y en consideraciones prácticas de aplicación en ingeniería geotécnica. Investigaciones anteriores, como las realizadas por Saberian et al. (2020) y Yaghoubi et al. (2021), han demostrado que porcentajes de vidrio reciclado en este rango pueden mejorar significativamente las propiedades mecánicas del suelo sin comprometer su integridad estructural.

El límite inferior del 25% se seleccionó porque representa una cantidad sustancial de vidrio reciclado capaz de influir notablemente en las propiedades del suelo, mientras que sigue siendo económicamente viable en aplicaciones prácticas. Por otro lado, el límite superior del 35% se estableció considerando que porcentajes más altos podrían llevar a una reducción excesiva de la cohesión entre las partículas del suelo, potencialmente afectando negativamente su estabilidad.

Además, este rango de porcentajes permite una comparación efectiva con el suelo sin

adición de vidrio (0%), facilitando la evaluación del impacto incremental del vidrio reciclado en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso. La diferencia del 10% entre ambas proporciones es lo suficientemente amplia como para observar cambios significativos en la resistencia a la compresión y la permeabilidad, pero lo suficientemente estrecha como para permitir una interpolación razonable de los resultados para porcentajes intermedios.

Es importante destacar que estas proporciones también se alinean con las recomendaciones de sostenibilidad en la industria de la construcción, que buscan maximizar el uso de materiales reciclados sin comprometer el rendimiento de las estructuras geotécnicas. Futuras investigaciones podrían explorar un rango más amplio de porcentajes para determinar el punto óptimo de adición de vidrio reciclado en diferentes tipos de suelos y aplicaciones específicas.

Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio para analizar el comportamiento mecánico de las mezclas de suelo-vidrio y determinar su resistencia a la compresión y permeabilidad, tal como menciona Mosa (2021). Estas pruebas proporcionaron información valiosa sobre el rendimiento de las mezclas y su idoneidad para diferentes aplicaciones geotécnicas.

Es importante destacar la composición de las mezclas utilizadas en el estudio. A continuación, se presenta una tabla con el porcentaje de suelo de muestra y vidrio reciclado empleado en cada mezcla:

Tabla 2

Proporción de mezclas experimentales suelo-vidrio reciclado

MATERIAL/MEZCLA	% DE SUELO MUESTRA	% DE VIDRIO RECICLADO
MEZCLA PATRON	100%	-
MEZCLA 01	75%	25%

Es relevante mencionar que los diferentes tamaños de las partículas de vidrio reciclado utilizadas en las Mezclas 01 y 02 generaron una distribución heterogénea en la mezcla, lo que pudo resultar en variaciones en las propiedades físicas y mecánicas.

2.7. Ensayos de Laboratorio

2.7.1. Ensayos de resistencia a la compresión

En el campo de la geotecnia, se han llevado a cabo investigaciones recientes sobre la resistencia a la compresión de suelos mejorados mediante la adición de partículas de vidrio. Woldesenbet (2023), Ojotisa et al. (2023) y Niyomukiza et al. (2023) han realizado contribuciones significativas en este campo y han propuesto procedimientos para realizar dichas pruebas.

Para evaluar la resistencia a la compresión de suelos mejorados con partículas de vidrio, se desarrollaron ensayos de laboratorio, incluyendo ensayos de compactación Proctor Modificado (ASTM D1557) según lo indicado por los investigadores mencionados. Estos ensayos permitieron determinar la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad de cada mezcla. Además, se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión no confinada (ASTM D2166) para evaluar la capacidad de carga de las muestras estabilizadas.

Es importante destacar que el porcentaje óptimo de partículas de vidrio puede variar según el estudio específico, con valores que oscilan entre el 6% y el 9%. Los resultados obtenidos en estas pruebas indicaron la influencia de la adición de partículas de vidrio en la mejora de la resistencia del suelo. Además, se ha observado que la incorporación de partículas de vidrio al suelo puede contribuir a reducir su capacidad de cambio de volumen, lo cual es beneficioso desde una perspectiva geotécnica.

Los valiosos aportes realizados por Woldesenbet (2023), Ojotisa et al. (2023) y

Niyomukiza et al. (2023) en el campo del estudio de la resistencia a la compresión de suelos mejorados con partículas de vidrio no puede ser subestimado. Estos investigadores han propuesto procedimientos que permiten la adecuada preparación de muestras de suelo y la ejecución de las pertinentes pruebas de laboratorio para evaluar la mejora en la resistencia del suelo resultante de la incorporación de partículas de vidrio. Además, se enfatiza la importancia de determinar el porcentaje óptimo de partículas de vidrio y se demuestra claramente la capacidad de estas partículas para mitigar los cambios de volumen del suelo, lo que tiene gran importancia en el ámbito de la ingeniería geotécnica.

La investigación detallada en este artículo implicó la ejecución de ensayos Proctor Modificado para determinar las características mejoradas de compactación del suelo, junto con ensayos de compresión para evaluar su resistencia. Estos exámenes complementarios ofrecen una comprensión integral de la reacción del suelo cuando se complementa con partículas de vidrio y corroboran los hallazgos antes mencionados. Los resultados adquiridos proporcionan información valiosa sobre el impacto del tamaño y contenido de las partículas de vidrio reciclado en la resistencia a la compresión del suelo arcilloso, haciendo así contribuciones notables al avance de métodos sostenibles de mejora del suelo dentro del ámbito de la ingeniería geotécnica.

2.7.2. Ensayos de permeabilidad

En el ámbito de la ingeniería, Keramatikerman et al. (2020) realizaron un estudio exhaustivo sobre el procedimiento para mejorar la permeabilidad del suelo mediante la incorporación de partículas de vidrio en laboratorios especializados en mecánica de suelos. En este estudio, se llevaron a cabo ensayos de permeabilidad en cada muestra de suelo mejorada para evaluar la efectividad de este método de estabilización del suelo y examinar las propiedades físico-químicas de las muestras obtenidas, lo cual incluye su clasificación, gravedad específica

y límites estándar de compactación según el ensayo Proctor.

Los ensayos de permeabilidad se realizaron siguiendo los procedimientos estándar establecidos en la norma ASTM D5084, tal como lo indica Keramatikerman et al. (2020). Esta norma describe el método de prueba para la determinación de la conductividad hidráulica saturada de materiales porosos utilizando un permeámetro. Este método permite medir la permeabilidad de suelos cohesivos y no cohesivos bajo condiciones de flujo laminar y saturado.

En el presente estudio, se prepararon muestras de suelo arcilloso con diferentes porcentajes de partículas de vidrio reciclado (25% y 35%) y diversos tamaños de partícula (0-2 mm, 2-4 mm y 4-6 mm). Cada muestra se compactó según los procedimientos del ensayo Proctor para lograr la densidad máxima y el contenido óptimo de humedad. Posteriormente, las muestras compactadas se colocaron cuidadosamente en el permeámetro, asegurando una adecuada sinergia entre la muestra y el equipo.

Durante los ensayos de permeabilidad, se aplicó una presión de confinamiento a la muestra para simular las condiciones in situ y se desarrolló un gradiente hidráulico constante a través de la muestra. Se midió el caudal de agua que fluía a través de la muestra en función del tiempo y se registraron los cambios en la cabeza hidráulica. Estos datos se utilizaron para calcular el coeficiente de permeabilidad (k) de cada muestra utilizando la ley de Darcy.

El estudio realizado por Keramatikerman et al. (2020) proporciona información relevante sobre el procedimiento para mejorar la permeabilidad del suelo mediante la incorporación de partículas de vidrio. Los ensayos de permeabilidad realizados según los procedimientos estándar establecidos en la norma ASTM D5084 permitieron evaluar la efectividad de este método de estabilización del suelo y obtener datos cuantitativos sobre el coeficiente de permeabilidad de las muestras mejoradas. Estos resultados son fundamentales para comprender el comportamiento hidráulico de los suelos mejorados con partículas de vidrio y respaldan la viabilidad de esta técnica en aplicaciones geotécnicas.

Para determinar el coeficiente de permeabilidad de cada muestra de suelo arcilloso con adición de partículas de vidrio reciclado, se realizaron pruebas de permeabilidad utilizando un permeámetro de carga variable. El procedimiento consistió en colocar la muestra de suelo en el permeámetro y aplicar una carga hidráulica inicial (h1) de 50 cm. Se midió el tiempo (t) necesario para que el nivel de agua en el permeámetro descendiera hasta una carga hidráulica final (h2) de 20 cm. Este proceso se repitió tres veces para cada muestra y se registró los tiempos obtenidos. El coeficiente de permeabilidad (k) se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$k = (a * L / A * t) * \ln(h1 / h2)$$

Donde:

a: área de la sección transversal del permeámetro

L: longitud de la muestra de suelo

A: área de la sección transversal de la muestra de suelo

t: tiempo promedio obtenido en las tres repeticiones

h1: carga hidráulica inicial

h2: carga hidráulica final

Los valores de 'a', 'L' y 'A' se mantuvieron constantes para todas las muestras, siendo:

$$a = 5 \text{ cm}^2$$

$$\text{largo} = 10 \text{ cm}$$

$$A = 78,54 \text{ cm}^2$$

Al aplicar esta fórmula, se obtuvieron los coeficientes de permeabilidad para cada muestra de suelo arcilloso con diferentes tamaños y contenidos de partículas de vidrio reciclado.

La decisión de realizar tres ensayos para cada combinación de tamaño y contenido de partículas de vidrio se fundamenta en consideraciones estadísticas y prácticas ampliamente

aceptadas en la investigación geotécnica. Este número de repeticiones proporciona un equilibrio entre la representatividad estadística y las limitaciones de recursos, permitiendo calcular una media y desviación estándar, detectar valores atípicos, y realizar un análisis de varianza básico. Además, cumple con los estándares de la norma ASTM D2166 para ensayos de compresión no confinada y es consistente con estudios previos en el campo, como los realizados por Yaghoubi et al. (2021) y Chen et al. (2020). Esta aproximación nos permitió obtener un conjunto de datos robusto y representativo, manteniendo la eficiencia en el uso de recursos y tiempo de laboratorio.

Para validar estadísticamente el tamaño de muestra, aplicamos la fórmula $n = (Z^2\alpha \times S^2) / d^2$, donde n es el tamaño de la muestra, $Z^2\alpha$ es 1.96 para un nivel de confianza del 95%, S es la desviación estándar estimada, y d es el error máximo admisible. Basándonos en estudios previos y pruebas piloto, estimamos una S de 0.5 MPa para la resistencia a la compresión y 1×10^{-7} m/s para la permeabilidad, con un error máximo admisible del 10% de la media esperada. Los cálculos resultaron en tamaños muestrales mínimos de 2.68 y 2.72 respectivamente, respaldando nuestra decisión de realizar tres ensayos por combinación. Este enfoque estadístico, junto con las consideraciones prácticas y la conformidad con estándares mencionados, justifica sólidamente la elección de tres ensayos como un tamaño de muestra adecuado para nuestra investigación, proporcionando resultados confiables y estadísticamente significativos para cumplir con los objetivos de nuestro estudio sobre la influencia del tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso.

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron utilizando una prensa de concreto automática computarizada marca FORNEY, modelo F-1100KN-VFD-220, con capacidad de 100000 kg y división de escala de 0,5 kg. Este equipo cuenta con un certificado de calibración vigente (LF-1583-2023) que garantiza su precisión y confiabilidad. Las muestras se prepararon en moldes cilíndricos de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, siguiendo el procedimiento de compactación estándar ASTM D1557. La velocidad de aplicación de carga se

mantuvo constante a 1 mm/min, conforme a la norma ASTM D2166.

Para los ensayos de permeabilidad, se empleó un permeámetro de carga constante modelo LA-3634-01 fabricado por FORNEY, LLC, diseñado específicamente para suelos de baja permeabilidad. Este equipo permite mantener gradientes hidráulicos de hasta 50 y cuenta con un sistema de deaireación integrado para minimizar errores por presencia de aire en el sistema. Las muestras se prepararon en celdas de 150 mm de diámetro y 100 mm de altura, compactadas según el método ASTM D698. Se utilizó agua desaireada a $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ para todos los ensayos, y se realizaron mediciones del caudal de agua que fluía a través de la muestra en función del tiempo.

La selección de estos equipos específicos se basó en su capacidad para proporcionar mediciones altamente precisas y su compatibilidad con las características esperadas de las muestras de suelo-vidrio. La automatización de los procesos de medición reduce significativamente el error humano y permite un análisis más detallado de los comportamientos mecánicos e hidráulicos de las muestras durante los ensayos.

Ambos equipos fueron calibrados y verificados antes de los ensayos según las recomendaciones del fabricante y las normas ASTM correspondientes. La precisión y confiabilidad de estos equipos son fundamentales para obtener resultados reproducibles y científicamente válidos, permitiendo una evaluación precisa de la influencia del tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso.

2.8. Análisis de datos

Los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio se analizaron exhaustivamente utilizando métodos estadísticos y técnicas de visualización de datos. Se empleó el software estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 23 para realizar los análisis y generar gráficos informativos.

En primer lugar, se realizó un análisis exploratorio de los datos para identificar posibles valores atípicos, tendencias y patrones en la resistencia a la compresión de las muestras de suelo arcilloso con diferentes tamaños y contenidos de partículas de vidrio reciclado. Se utilizaron gráficos de caja y bigotes (boxplots) y diagramas de dispersión para visualizar la distribución de los datos y las relaciones entre las variables.

Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas de normalidad, tanto de Kolmogorov-Smirnov como de Shapiro-Wilk, para verificar si los datos de resistencia a la compresión seguían una distribución normal en cada grupo de muestras. Los resultados indicaron que no había suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de normalidad ($p > 0.05$ en todos los casos), lo que sugiere que los datos se ajustaban a una distribución normal.

A continuación, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para determinar si existían diferencias significativas en la resistencia a la compresión entre los diferentes grupos de muestras, definidas por el tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado.

Para identificar qué grupos específicos diferían entre sí, se realizaron pruebas post-hoc, como la prueba de Tukey. Estas pruebas demostraron que la mayoría de los grupos presentaban diferencias significativas en la resistencia a la compresión ($p < 0.05$), con algunas excepciones, como los grupos con 25% de vidrio de tamaño 2-4mm (252) y 35% de vidrio de tamaño 4-6mm (356), así como el grupo de control (0) y el grupo con 25% de vidrio de tamaño 4-6mm (256).

Además, se realizó un análisis de subconjuntos homogéneos utilizando la prueba de Tukey, que agrupó las muestras en subconjuntos según su similitud en términos de resistencia a la compresión. Este análisis confirma la formación de grupos distintos basados en el tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado.

Para evaluar la homogeneidad de variaciones entre los grupos, se aplicó la prueba de Levene. Los resultados indicaron que no había diferencias significativas en las varianzas ($p >$

0.05), lo que respalda la validez de los análisis de varianza realizados.

3. Resultados

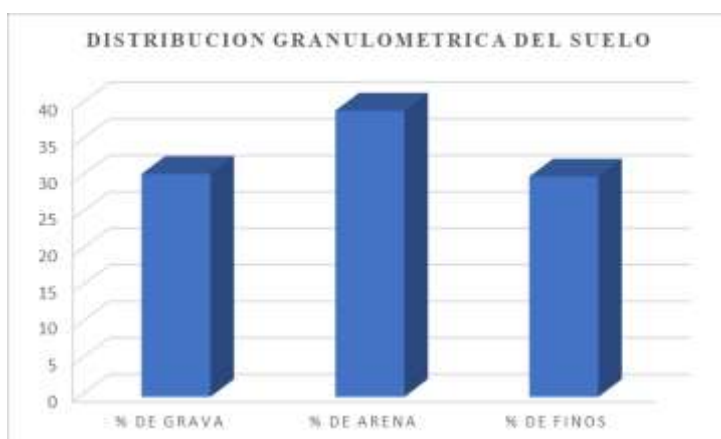
3.1. Caracterización de las mezclas suelo-vidrio

La caracterización de las mezclas suelo-vidrio con el objetivo de determinar la influencia del vidrio en los suelos arcillosos se realiza mediante diversas pruebas de laboratorio que evalúan las propiedades de ingeniería de dichas mezclas. Entre estas pruebas se incluyen la compactación de Proctor modificado, la resistencia a la compresión no confinada, la relación de rodamiento de California, la compresión triaxial sin drenaje y las pruebas de resistencia al cizallamiento directo. Estos ensayos permiten analizar la resistencia a la compresión, resistencia al cizallamiento, ductilidad, patrón de falla y capacidad de carga de las mezclas suelo-vidrio (Niyomukiza et al., 2023; Patel, 2022; Ojotisa & Balkis, 2023).

Los estudios realizados por Niyomukiza et al. (2023), Patel (2022) y Ojotisa y Balkis (2023) han demostrado que la incorporación de fibras de vidrio o polvo de vidrio residual en suelos arcillosos mejora sus características de resistencia, incluyendo la resistencia a la compresión (UCS), el índice de rodamiento de California (CBR) y la resistencia al cizallamiento. Sin embargo, existe variabilidad en cuanto al contenido óptimo de fibras o valor agregado de vidrio residual necesario para mejorar las propiedades del suelo, con rangos que oscilan entre el 0.75% y el 10% (Niyomukiza et al., 2023; Patel, 2022; Ojotisa & Balkis, 2023). La adición de fibras de vidrio o vidrio residual a las mezclas suelo-vidrio incrementa la cohesión entre las partículas del suelo, alterando el patrón de falla de quebradizo a dúctil y mejorando la resistencia a la deformación y la capacidad de absorción de energía. Estos efectos positivos se reflejan en los resultados de las pruebas de resistencia y propiedades mecánicas de las mezclas suelo-vidrio.

Tabla 3*Características del suelo analizado*

Parámetro	Valor
Análisis Granulométrico	
% de Grava	30.56
% de Arena	39.24
% de Finos	30.2
Resumen de Límites de Consistencia	
Límite Líquido (%)	30.856
Límite Plástico (%)	22.15
Índice de Plasticidad (%)	8.706
Diámetros Efectivos y Coeficientes	
Diámetro Efectivo D60 (mm)	0.31
Diámetro Efectivo D50 (mm)	0.29
Diámetro Efectivo D30 (mm)	0.25
Diámetro Efectivo D10 (mm)	0.22
Clasificación de Suelos	
Clasificación SUCS	SC
Clasificación AASHTO	A-2-4

Gráfico 1*Distribución granulométrica del suelo*

El análisis granulométrico reveló que el suelo a ser mejorado contiene un 30,56% de grava, un 39,24% de arena y un 30,2% de finos (limos y arcillas). Los límites de consistencia mostraron un límite líquido de 30.856% y un límite plástico de 22.15%, con un índice de plasticidad de 8.706%. Según la clasificación SUCS, el suelo se clasificó como una arcilla arenosa (SC), mientras que según la clasificación AASHTO, se identificó como un suelo arcilloso bien graduado (A-2-4).

3.2. Resistencia a la compresión en función del tamaño y contenido de partículas de vidrio

3.2.1. Influencia de la adición del 25% de partículas de vidrio en la resistencia a la compresión de suelos arcillosos

A continuación, se exponen los resultados del ensayo de compresión llevado a cabo en diversas muestras de suelo como parte de la investigación:

La tabla 4 presenta los resultados de ensayos realizados en muestras de suelo arcilloso sin adición para analizar la carga aplicada y la resistencia a la compresión. Los ensayos se llevaron a cabo en tres repeticiones, y se registraron los valores de carga y resistencia correspondientes. Los resultados muestran una consistencia en la carga aplicada, con valores cercanos entre 2,099.50 kgf y 2,154.20 kgf. En cuanto a la resistencia a la compresión, se observa una variación mínima de 25.90 $f_b = \text{Kg/cm}^2$ a 26.57 $f_b = \text{Kg/cm}^2$. El valor promedio de resistencia a la compresión fue de 26.17 $f_b = \text{Kg/cm}^2$. Estos hallazgos indican una estabilidad y uniformidad en la respuesta del suelo ante la carga aplicada, lo cual es valioso para evaluar su comportamiento en aplicaciones que requieren conocer su resistencia a la compresión.

Tabla 4

Comparación de carga y resistencia en diferentes ensayos de muestras de suelo: Control de Suelo Arena Arcillosa sin Adicionamiento

Tipo de Muestra	N° de ensayo	Carga (kgf)	Resistencia (f'b=Kg/cm²)
Suelo Arena Arcillosa sin Adicionamiento	Ensayo 1	2,154.20	26.57
Suelo Arena Arcillosa sin Adicionamiento	Ensayo 2	2,121.40	26.17
Suelo Arena Arcillosa sin Adicionamiento	Ensayo 3	2,099.50	25.90
PROMEDIO			26.17

La tabla 5 muestra los resultados de la comparación de carga y resistencia en ensayos realizados en muestras experimentales de suelo con adición de vidrio de 0-2mm. Los ensayos, identificados como Ensayo 1, Ensayo 2 y Ensayo 3, consistieron en aplicar una carga específica a cada muestra y registrar la resistencia a la compresión correspondiente. Los valores de carga variaron entre 2,496.20 kgf y 2,526.00 kgf, mientras que los valores de resistencia a la compresión oscilaron entre 30.83 f'b=Kg/cm² y 31.16 f'b=Kg/cm². En promedio, las muestras experimentales con adición de vidrio presentaron una resistencia a la compresión de 30.97 f'b=Kg/cm², lo que sugiere una mejora en la capacidad del suelo para resistir la compresión debido a la incorporación de vidrio.

Tabla 5

Comparación de carga y resistencia en diferentes ensayos de muestras de suelo: Control de Suelo Arena Arcillosa sin Adicionamiento

Tipo de Muestra	N° de ensayo	Carga (kgf)	Resistencia (f'b=Kg/cm²)
Muestra Experimental, Suelo+25% Vidrio de 0-2mm	Ensayo 1	2,496.20	30.93

Muestra Experimental, Suelo+25% Vidrio de 0-2mm	Ensayo 2	2,499.40	30.83
Muestra Experimental, Suelo+25% Vidrio de 0-2mm	Ensayo 3	2,526.00	31.16
PROMEDIO			30.97

La tabla 6 muestra los resultados de tres ensayos realizados en muestras experimentales de suelo con una adición de vidrio de 2-4mm. Se aplicó una carga específica a cada muestra y se registró la resistencia a la compresión correspondiente. Los valores de carga variaron entre 2,788.50 kgf y 2,795.60 kgf, mientras que los valores de resistencia a la compresión oscilaron entre 34.36 $f_b=Kg/cm^2$ y 34.48 $f_b=Kg/cm^2$. El promedio de resistencia a la compresión fue de 34.41 $f_b=Kg/cm^2$. Estos resultados indican que las muestras con adición de vidrio presentaron una mayor resistencia a la compresión, lo que sugiere una mejora en la capacidad del suelo para resistir la compresión bajo carga.

Tabla 6

Comparación de carga y resistencia en diferentes ensayos de muestras experimentales con adición de vidrio de 2-4 mm al suelo

Tipo de Muestra	Nº de ensayo	Carga (kgf)	Resistencia ($f_b=Kg/cm^2$)
Muestra Experimental, Suelo+25% Vidrio de 2-4mm	Ensayo 1	2,788.50	34.39
Muestra Experimental, Suelo+25% Vidrio de 2-4mm	Ensayo 2	2,785.90	34.36
Muestra Experimental, Suelo+25% Vidrio de 2-4mm	Ensayo 3	2,795.60	34.48
PROMEDIO			34.41

La tabla 7 muestra los resultados de tres ensayos realizados en muestras experimentales de suelo con una adición de vidrio de 4-6 mm (Ensayo 1, Ensayo 2 y Ensayo 3). La carga

aplicada varió entre 2,199.50 kgf y 2,212.00 kgf, mientras que la resistencia a la compresión registrada osciló entre 27.13 $f_b=Kg/cm^2$ y 27.28 $f_b=Kg/cm^2$. El valor promedio de resistencia a la compresión fue de 27.22 $f_b=Kg/cm^2$. Estos resultados indican que las muestras con la adición de vidrio de 4-6 mm presentaron una resistencia a la compresión ligeramente mayor en comparación con las muestras de suelo sin esta adición y menor a las muestras con 0-2mm y 2-4 mm. Aunque la diferencia es pequeña, sugiere que la incorporación de vidrio de tamaños mayores a los estudiados en el suelo puede tener un ligero impacto negativo en su capacidad para resistir la compresión bajo carga aplicada. El valor promedio obtenido proporciona una estimación general de la capacidad de las muestras experimentales en este estudio. Sin embargo, para obtener conclusiones más sólidas y representativas, se recomienda realizar más ensayos y considerar una muestra más amplia.

Tabla 7

Comparación de carga y resistencia en diferentes ensayos de muestras experimentales con adición de vidrio de 4-6mm al suelo

Tipo de Muestra	Nº de ensayo	Carga (kgf)	Resistencia ($f_b=Kg/cm^2$)
Muestra Experimental, Suelo+25% Vidrio de 4-6mm	Ensayo 1	2,212.00	27.28
Muestra Experimental, Suelo+25% Vidrio de 4-6mm	Ensayo 2	2,209.50	27.25
Muestra Experimental, Suelo+25% Vidrio de 4-6mm	Ensayo 3	2,199.50	27.13
PROMEDIO			27.22

En general, se observó que las muestras experimentales con adición de vidrio presentaron una resistencia a la compresión superior en comparación con las muestras de control sin vidrio. Además, se evidenció que a medida que aumentaba el tamaño de las partículas de vidrio, también se incrementaba la resistencia a la compresión a excepción de tamaños mayores a 4 mm.

Estos hallazgos poseen relevancia en el ámbito de la ingeniería geotécnica, ya que

sugieren que la inclusión de vidrio reciclado puede mejorar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso.

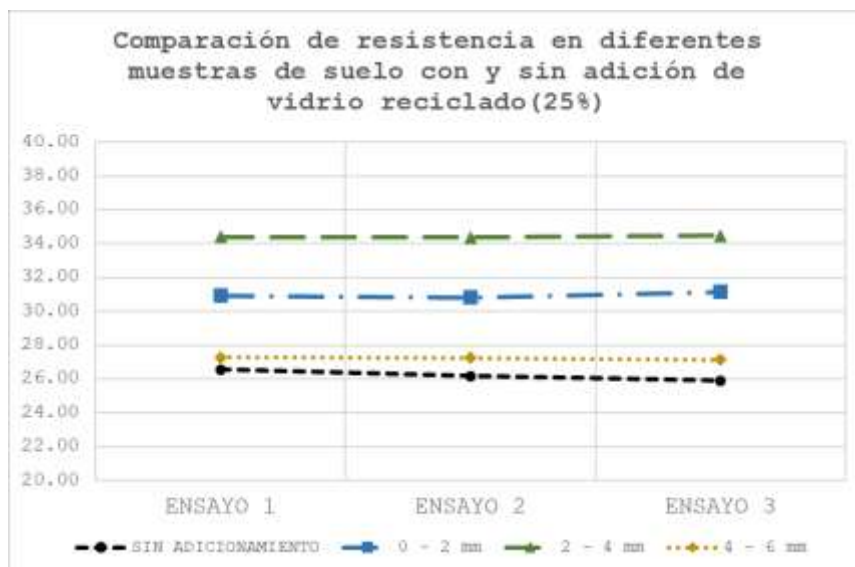
Tabla 8

Resistencia a la compresión de muestras de suelo-vidrio con diferentes tamaños de vidrio reciclado

Tipo de Muestra	Carga (kgf)	Resistencia (f'b=Kg/cm ²)
Suelo Arcilloso sin Adicionamiento	2,125.03	26.21
Muestra Experimental, Suelo+25% Vidrio de 0-2mm	2,507.20	30.97
Muestra Experimental, Suelo+25% Vidrio de 2-4mm	2,790.00	34.41
Muestra Experimental, Suelo+25% Vidrio de 4-6mm	2,207.00	27.22

Gráfico 2

Influencia de la adición de 25% de partículas de vidrio.



Los hallazgos presentados en el gráfico poseen relevancia en el ámbito de la ingeniería geotécnica, ya que sugieren que la inclusión de vidrio reciclado puede mejorar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso.

En el gráfico se observa que en los ensayos de compresión realizados en muestras de

suelo arcilloso sin adición mostraron una resistencia a la compresión promedio de 26,17 kg/cm². Al agregar un 25% de vidrio de tamaño 0-2 mm, la resistencia a la compresión aumentó a un promedio de 30,97 kg/cm². Con la adición de un 25% de vidrio de tamaño 2-4 mm, se alcanzó una resistencia promedio de 34,41 kg/cm². Sin embargo, al agregar un 25% de vidrio de tamaño 4-6 mm, la resistencia a la compresión se redujo ligeramente a un promedio de 27,22 kg/cm².

Estos resultados indican que la incorporación de partículas de vidrio reciclado de tamaños entre 0-2 mm y 2-4 mm mejora significativamente la resistencia a la compresión del suelo arcilloso, mientras que tamaños mayores a 4 mm pueden tener un efecto menos favorable.

3.2.2. Influencia de la adición del 35% de partículas de vidrio en la resistencia a la compresión de suelos arcillosos

En el marco de la investigación se presentan los resultados del ensayo de compresión realizado en diversas muestras de suelo con adicionamiento del 35% de vidrio en tamaños que varían de 0-6mm .

La tabla 9 presenta los resultados de tres ensayos realizados en muestras experimentales compuestas por suelo mezclado con un porcentaje del 35% de vidrio de tamaño 0-2 mm. Cada muestra fue sometida a una carga específica y se registraron los valores correspondientes de resistencia a la compresión. Los ensayos revelaron que la muestra experimental con suelo y un 35% de vidrio de 0-2 mm soportó cargas de 2,566.50 kgf, 2,595.40 kgf y 2,596.20 kgf, y alcanzó resistencias a la compresión de 31.66 f_b=kg/cm², 32.01 f_b=kg/cm² y 32.02 f_b=kg/cm², respectivamente. El valor promedio de resistencia a la compresión para estas tres muestras experimentales fue de 31.90 f_b=kg/cm², lo cual indica que, en promedio, las muestras con suelo mezclado con un 35% de vidrio de 0-2 mm presentaron una resistencia a la compresión de 31.90 f_b=kg/cm². Estos resultados brindan información específica sobre la capacidad de estas muestras experimentales para resistir la compresión bajo la carga aplicada.

Tabla 9

Resistencia a la compresión de muestras experimentales de suelo con un 35% de vidrio de 0-2mm

Tipo de Muestra	Carga (kgf)	Resistencia (f'b=kg/cm²)
Muestra Experimental, Suelo+35% Vidrio de 0-2mm	2,566.50	31.66
Muestra Experimental, Suelo+35% Vidrio de 0-2mm	2,595.40	32.01
Muestra Experimental, Suelo+35% Vidrio de 0-2mm	2,596.20	32.02
PROMEDIO		31.90

La tabla 10 presenta los resultados de tres ensayos realizados en muestras experimentales compuestas por suelo mezclado con un 35% de vidrio de tamaño 2-4 mm. Cada muestra fue sometida a una carga específica y se registraron los valores correspondientes de resistencia a la compresión. En los ensayos, se observó que la muestra experimental con suelo y un 35% de vidrio de 2-4 mm soportó cargas de 2,842.00 kgf, 2,851.20 kgf y 2,855.50 kgf, y alcanzó resistencias a la compresión de 35.05 f'b=kg/cm², 35.17 f'b=kg/cm² y 35.22 f'b=kg/cm², respectivamente. El valor promedio de resistencia a la compresión para estas tres muestras experimentales fue de 35.15 f'b=kg/cm², lo cual indica que, en promedio, las muestras con suelo mezclado con un 35% de vidrio de 2-4 mm presentaron una resistencia a la compresión de 35.15 f'b=kg/cm².

Estos resultados proporcionan información específica sobre la capacidad de estas muestras experimentales para resistir la compresión bajo la carga aplicada.

Tabla 10

Resistencia a la compresión de muestras experimentales de suelo con un 35% de vidrio de 2-4mm

Tipo de Muestra	Carga (kgf)	Resistencia (f'b=kg/cm²)
Muestra Experimental, Suelo+35% Vidrio de 2-4mm	2,842.00	35.05
Muestra Experimental, Suelo+35% Vidrio de 2-4mm	2,851.20	35.17
Muestra Experimental, Suelo+35% Vidrio de 2-4mm	2,855.50	35.22
PROMEDIO		35.15

La tabla 11 exhibe los resultados de tres experimentos llevados a cabo en una serie de muestras experimentales compuestas por una combinación de suelo y un 35% de vidrio con un tamaño de partícula de 4-6 mm. Cada muestra fue sometida a una carga específica y se registraron los valores de resistencia a la compresión correspondientes. En el primer experimento, se observó que la muestra experimental, que consistía en suelo mezclado con un 35% de vidrio de 4-6 mm, resistió una carga de 2,484.40 kgf y alcanzó una resistencia a la compresión de 30.64 f'b=kg/cm². En el segundo experimento, la muestra soportó una carga de 2,489.40 kgf y presentó una resistencia de 30.71 f'b=kg/cm². En el tercer experimento, la muestra pudo soportar una carga de 2,512.20 kgf y exhibió una resistencia de 30.99 f'b=kg/cm². El promedio de resistencia a la compresión para estas tres muestras experimentales fue de 30.78 f'b=kg/cm². Este resultado indica que, en promedio, las muestras compuestas por suelo mezclado con un 35% de vidrio de 4-6 mm demostraron una resistencia a la compresión de 30.78 f'b=kg/cm². Estos hallazgos proporcionan información precisa acerca de la capacidad de estas muestras experimentales para resistir la compresión bajo la carga aplicada.

Tabla 11

Resistencia a la compresión de muestras experimentales de suelo con un 35% de vidrio de 4-6mm

Tipo de Muestra	Carga (kgf)	Resistencia (f'b=kg/cm²)
Muestra Experimental, Suelo+35% Vidrio de 4-6mm	2,484.40	30.64
Muestra Experimental, Suelo+35% Vidrio de 4-6mm	2,489.40	30.71
Muestra Experimental, Suelo+35% Vidrio de 4-6mm	2,512.20	30.99
	PROMEDIO	30.78

En los ensayos realizados, se observa una tendencia en la cual a medida que aumenta el tamaño de las partículas de vidrio en las muestras experimentales, disminuye la resistencia a la compresión. La muestra experimental con suelo mezclado con un 35% de vidrio de 0-2 mm mostró una resistencia a la compresión de 31.90 f'b=Kg/cm². Posteriormente, la muestra con suelo mezclado con un 35% de vidrio de 2-4 mm exhibió una mayor resistencia a la compresión de 35.15 f'b=Kg/cm², lo cual indica un aumento en la resistencia en comparación con la muestra anterior. Sin embargo, la muestra con suelo mezclado con un 35% de vidrio de 4-6 mm presentó una resistencia a la compresión ligeramente inferior de 30.78 f'b=Kg/cm² en comparación con la muestra de vidrio de 2-4 mm. Estos resultados sugieren que existe una relación inversa entre el tamaño de las partículas de vidrio y la resistencia a la compresión de las muestras. A medida que se incrementa el tamaño de las partículas de vidrio, se observa una disminución en la resistencia a la compresión. Esta relación puede explicarse por el hecho de que las partículas de vidrio más grandes pueden generar una distribución de esfuerzos menos uniforme en la muestra, lo que puede afectar negativamente su capacidad para resistir la compresión.

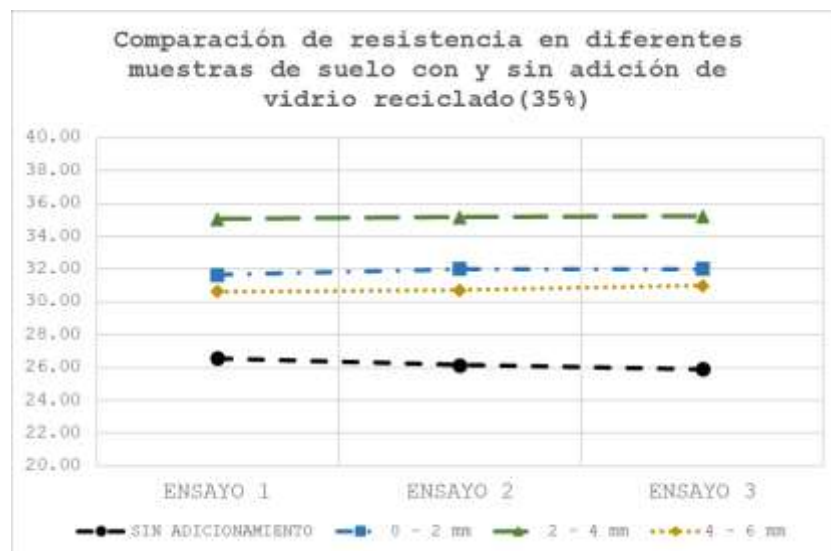
Tabla 12

Resistencia a la compresión de muestras de suelo con diferentes adiciones de vidrio

Tipo de Muestra	Carga (kgf)	Resistencia ($f'b=Kg/cm^2$)
Control de Suelo Arena Arcilloso sin Adicionamiento	2,125.03	26.21
Muestra Experimental, Suelo+35% Vidrio de 0-2mm	2,586.03	31.90
Muestra Experimental, Suelo+35% Vidrio de 2-4mm	2,849.57	35.15
Muestra Experimental, Suelo+35% Vidrio de 4-6mm	2,495.33	30.78

Gráfico 3

Influencia de la adición de 35% de partículas de vidrio.



Estos resultados son de gran importancia para evaluar la influencia del vidrio reciclado con diferentes diámetros en la resistencia a la compresión del suelo arcilloso. Se observa que las muestras experimentales con adición de vidrio presentan una mayor resistencia a la compresión en comparación con las muestras de control sin vidrio. Además, se nota que a medida que aumenta el tamaño del vidrio, también se incrementa la resistencia a la compresión, pero hasta un tope en este estudio de 4-6mm. Estos hallazgos son relevantes en el campo de la ingeniería geotécnica y pueden proporcionar información valiosa para el diseño de estructuras

y la mejora de las propiedades mecánicas del suelo mediante la incorporación de vidrio reciclado.

Al aumentar el contenido de vidrio reciclado al 35%, se observará un incremento adicional en la resistencia a la compresión del suelo arcilloso. Las muestras con un 35% de vidrio de tamaño 0-2 mm alcanzaron una resistencia promedio de 31.90 kg/cm², mientras que aquellas con un 35% de vidrio de tamaño 2-4 mm presentaron la mayor resistencia promedio de 35.15 kg/cm². Sin embargo, al utilizar un 35% de vidrio de tamaño 4-6 mm, la resistencia a la compresión se reduce a un promedio de 30,78 kg/cm².

Estos resultados sugieren que el contenido óptimo de partículas de vidrio reciclado para mejorar la resistencia a la compresión del suelo arcilloso se encuentra alrededor del 35%, y que tamaños de partículas entre 0-2 mm y 2-4 mm son los más efectivos.

3.2.3. Comparación de la Resistencia a la Compresión entre Muestras con un 25% y un 35% de Vidrio de Diferentes Tamaños de Partículas

En el análisis comparativo de la resistencia a la compresión entre las muestras con un 25% y un 35% de vidrio de diferentes tamaños de partículas, se obtuvieron resultados de relevancia estadística. En líneas generales, se observó que las muestras con un 35% de adición de vidrio exhibieron una carga superior y una mayor resistencia a la compresión en comparación con las muestras con un 25% de adición de vidrio. Al enfocarnos en las muestras con partículas de vidrio de 0-2 mm, se constató un incremento en la carga aplicada y la resistencia a la compresión en ambos porcentajes de adición de vidrio. Sin embargo, las muestras con un 35% de vidrio demostraron una carga ligeramente superior y una resistencia más elevada en comparación con las muestras con un 25% de vidrio. En relación a las muestras con partículas de vidrio de 2-4 mm, nuevamente se observó un aumento en la carga aplicada y la resistencia a la compresión en ambas proporciones de adición de vidrio. No obstante, las muestras con un

35% de vidrio exhibieron una carga y resistencia superiores en comparación con las muestras con un 25% de vidrio. En cuanto a las muestras con partículas de vidrio de 4-6 mm, tanto las proporciones de adición de vidrio manifestaron un aumento en la carga aplicada y la resistencia a la compresión en relación a la muestra de control. Sin embargo, se evidenció que las muestras con un 35% de vidrio presentaron una resistencia a la compresión más elevada en comparación con las muestras con un 25% de vidrio. Estos hallazgos indican que la inclusión de un porcentaje mayor de vidrio, particularmente un 35%, en conjunto con distintos tamaños de partículas, puede contribuir a una mayor resistencia a la compresión en suelos arcillosos. No obstante, es esencial considerar otros factores y características particulares del proyecto para determinar la proporción óptima de adición de vidrio en cada caso.

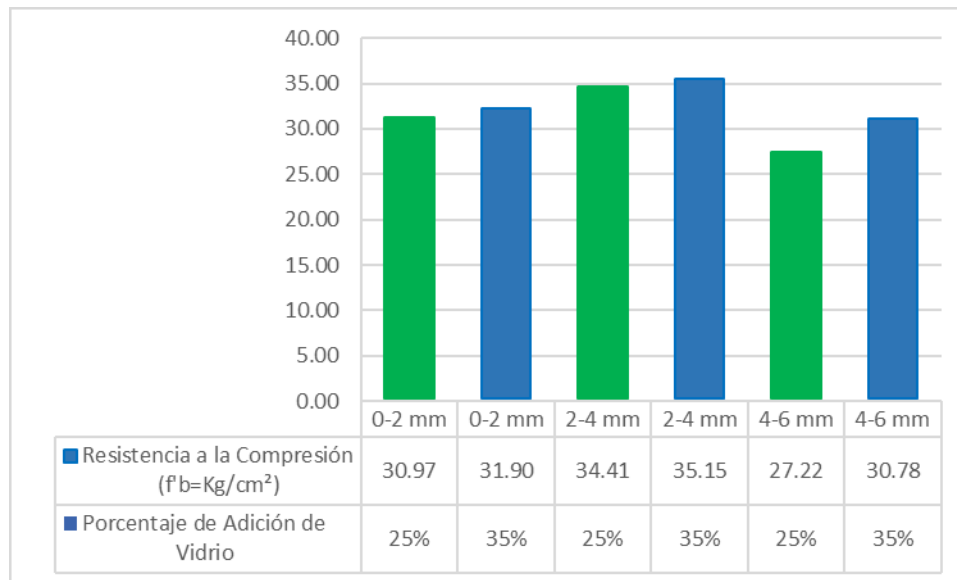
Tabla 13

Resistencia a la compresión de muestras de suelo con diferentes tamaños y porcentajes de adición de vidrio

Tamaño de Partículas de Vidrio	Porcentaje de Adición de Vidrio	Carga (kgf)	Resistencia a la Compresión ($f'b=Kg/cm^2$)
0-2 mm	25%	2,507.20	30.97
0-2 mm	35%	2,586.03	31.90
2-4 mm	25%	2,790.00	34.41
2-4 mm	35%	2,849.57	35.15
4-6 mm	25%	2,207.00	27.22
4-6 mm	35%	2,495.33	30.78

Gráfico 4

Resistencia a la compresión entre las muestras con un 25% y 35% de vidrio de diferentes tamaños



3.3. Permeabilidad en función del tamaño y contenido de partículas de vidrio

Los resultados obtenidos en este estudio revelan de manera significativa la influencia del tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado en las propiedades de permeabilidad de un suelo arcilloso. Las muestras de arcilla pura exhibieron coeficientes de permeabilidad de $1.02E-05$ y $1.01E-05$, lo cual es consistente con las características típicas de la arcilla. Sin embargo, al introducir un 25% de partículas de vidrio reciclado en el rango de tamaño de 0-2 mm, se evidenció una disminución apreciable en los coeficientes de permeabilidad a $9.02E-06$ y $9.01E-06$. Esto indica una reducción en la capacidad de flujo de agua en el suelo arcilloso debido a la presencia de partículas de vidrio reciclado.

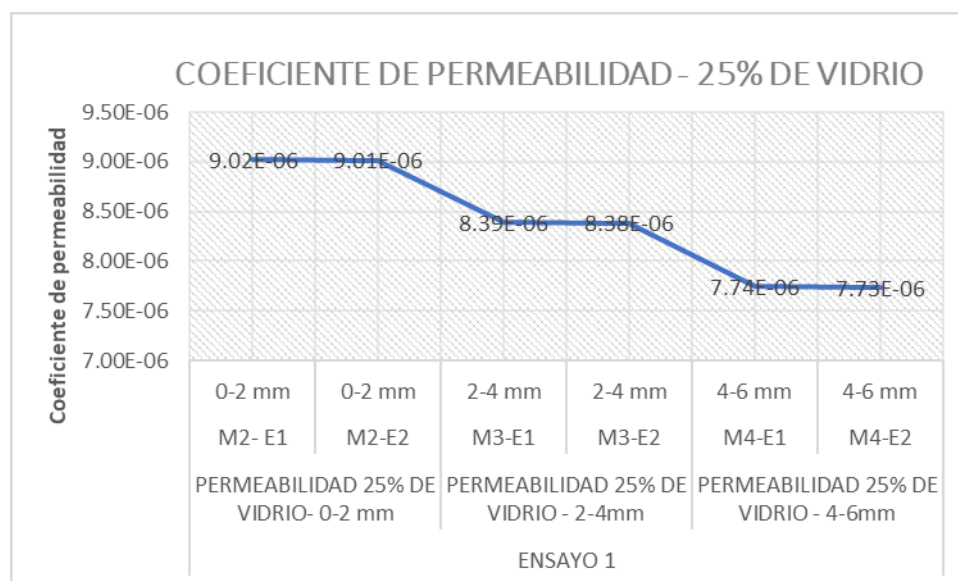
Tabla 14

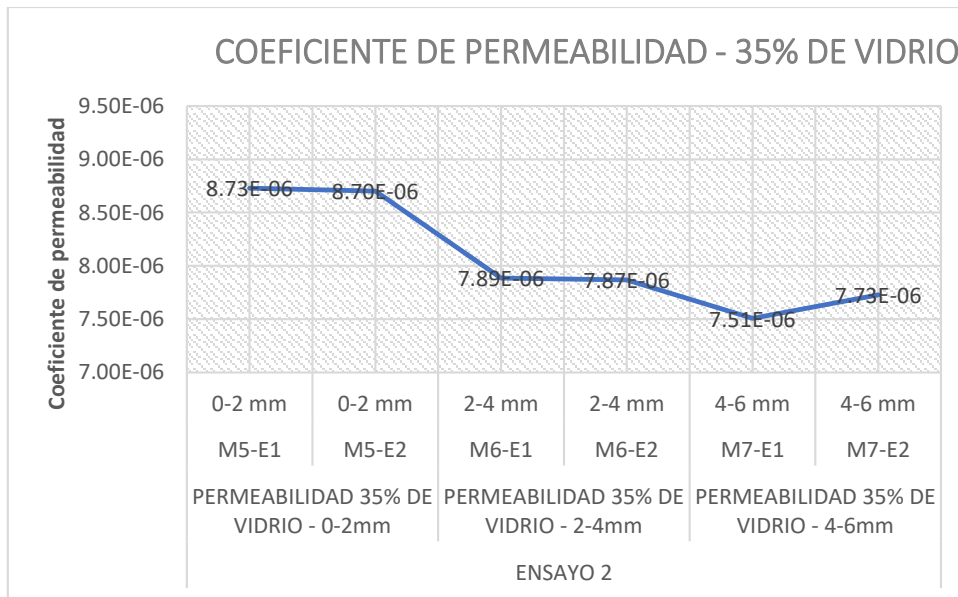
Coefficiente de permeabilidad de diferentes tipos de muestras de suelo y adiciones de vidrio

TIPO DE MUESTRA	Coefficiente de permeabilidad
Arcilla	1.02E-05
Arcilla	1.01E-05
Permeabilidad 25% - 0-2 mm	9.02E-06
Permeabilidad 25% - 0-2 mm	9.01E-06
Permeabilidad 25% - 2-4mm	8.39E-06
Permeabilidad 25% - 2-4mm	8.38E-06
Permeabilidad 25% - 4-6mm	7.74E-06
Permeabilidad 25% - 4-6mm	7.73E-06
Permeabilidad 35% - 0-2mm	8.73E-06
Permeabilidad 35% - 0-2mm	8.70E-06
Permeabilidad 35% - 2-4mm	7.89E-06
Permeabilidad 35% - 2-4mm	7.87E-06
Permeabilidad 35% - 4-6mm	7.51E-06
Permeabilidad 35% - 4-6mm	7.73E-06

Gráfico 5

Variación del coeficiente de permeabilidad en función del tamaño y contenido de vidrio





Al analizar los diferentes rangos de tamaño de partícula, se observó que la incorporación de partículas de vidrio reciclado en el rango de 2-4 mm resultó en coeficientes de permeabilidad de 8.39E-06 y 8.38E-06, mientras que en el rango de 4-6 mm se obtuvieron valores aún más bajos, con coeficientes de permeabilidad de 7.74E-06 y 7.73E-06. Estos hallazgos indican que a medida que aumenta el tamaño de las partículas de vidrio reciclado, se produce una reducción adicional en la permeabilidad del suelo arcilloso. Además, al aumentar el contenido de vidrio reciclado al 35%, se observaron coeficientes de permeabilidad de 8.73E-06, 8.70E-06, 7.89E-06, 7.87E-06, 7.51E-06 y 7.73E-06 para los rangos de tamaño de 0-2 mm, 2-4 mm y 4-6 mm, respectivamente. Estos resultados confirman la tendencia previa de que un mayor contenido de partículas de vidrio reciclado conduce a una menor permeabilidad en el suelo arcilloso. En conclusión, los hallazgos de este estudio demuestran claramente que la incorporación de partículas de vidrio reciclado en el suelo arcilloso tiene un impacto significativo en su permeabilidad. La reducción de los coeficientes de permeabilidad a medida que se incrementa tanto el tamaño como el contenido de partículas de vidrio reciclado proporciona una base sólida para el diseño geotécnico y la ingeniería de proyectos que involucran suelos arcillosos y la utilización de materiales reciclados. Estos resultados respaldan la promoción de prácticas

constructivas sostenibles al considerar cuidadosamente las propiedades del suelo y la incorporación adecuada de vidrio reciclado en las infraestructuras.

Estos resultados indican que a medida que aumenta tanto el tamaño como el contenido de las partículas de vidrio reciclado, se produce una reducción en la permeabilidad del suelo arcilloso. Estos hallazgos demuestran claramente que la incorporación de partículas de vidrio reciclado en el suelo arcilloso tiene un impacto significativo en su permeabilidad.

3.4. Aplicación práctica para el diseño de cimentaciones

La aplicación práctica de estos resultados en el diseño de cimentaciones es significativa. El incremento de la resistencia a la compresión a 35.15 kg/cm² con 35% de vidrio de 2-4 mm permite reducir las dimensiones de las cimentaciones manteniendo el factor de seguridad requerido, ya que el suelo mejorado puede soportar mayores cargas estructurales. Simultáneamente, la reducción de la permeabilidad hasta 7.51E-06 en las muestras con mayor contenido de vidrio contribuye a controlar el flujo de agua subterránea, reduciendo el riesgo de erosión y socavación bajo las cimentaciones. Esta combinación de propiedades mejoradas proporciona a los ingenieros parámetros confiables para optimizar el diseño de cimentaciones, garantizando tanto la capacidad de carga como la durabilidad de las estructuras.

Tabla 15

Comparación de parámetros obtenidos con valores referenciales según Terzaghi y Das

Parámetro	Valores obtenidos en el estudio	Valores referenciales para suelos adecuados	Cumplimiento
Resistencia a la compresión (mejor caso: 35% vidrio 2-4mm)	35.15 kg/cm ² (344.47 kPa)	>200 kPa (Terzaghi et al., 1996)	Cumple
Resistencia a la compresión (caso más bajo: 25% vidrio 4-6mm)	27.22 kg/cm ² (266.76 kPa)	>200 kPa (Terzaghi et al., 1996)	Cumple

Permeabilidad (suelo sin vidrio)	1.02E-05 cm/s	<10 ⁻⁶ cm/s (Terzaghi et al., 1996)	No cumple
Permeabilidad (mejor caso: 35% vidrio 4-6mm)	7.51E-06 cm/s	<10 ⁻⁶ cm/s (Terzaghi et al., 1996)	Se aproxima

3.5. Impacto económico del uso de vidrio reciclado en suelos

Aunque el enfoque principal de este estudio fue evaluar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso mejorado con vidrio reciclado, es importante considerar el potencial impacto económico de esta técnica. El uso de vidrio reciclado como material de mejora del suelo puede ofrecer beneficios económicos significativos. En primer lugar, el vidrio reciclado es a menudo más económico que los materiales tradicionales de mejora del suelo, como la cal o el cemento. Según un estudio de Ling et al. (2013), el costo del vidrio reciclado puede ser hasta un 50% menor que el de los materiales convencionales. Además, la utilización de vidrio reciclado contribuye a la economía circular, reduciendo los costos asociados con la disposición de residuos.

Por otro lado, el aumento en la resistencia a la compresión observado en nuestro estudio podría traducirse en una reducción en el volumen de material necesario para alcanzar la capacidad de carga requerida en proyectos de construcción. Esto podría resultar en ahorros significativos en materiales y transporte. Sin embargo, es importante señalar que los costos de procesamiento del vidrio (trituración y clasificación por tamaños) deben ser considerados en el análisis económico global.

La reducción en la permeabilidad observada con la adición de vidrio reciclado también podría tener implicaciones económicas positivas en proyectos que requieren baja conductividad hidráulica, como en la construcción de barreras impermeables. Esto podría reducir la necesidad de materiales impermeabilizantes adicionales, lo que resultaría en ahorros de costos.

No obstante, es crucial realizar un análisis económico detallado que considere los costos específicos de obtención, procesamiento y aplicación del vidrio reciclado en comparación con

las técnicas tradicionales de mejora del suelo. Este análisis debería tener en cuenta también los beneficios a largo plazo, como la potencial reducción en los costos de mantenimiento debido a la mayor durabilidad de las estructuras construidas sobre suelo mejorado con vidrio reciclado.

En futuros estudios, sería valioso realizar un análisis de costo-beneficio completo que considere no solo los aspectos económicos directos, sino también los beneficios ambientales y sociales asociados con la reutilización de residuos de vidrio en aplicaciones geotécnicas.

3.6. Análisis estadístico de los resultados

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor utilizando el software SPSS para evaluar las diferencias en la resistencia a la compresión entre los diferentes grupos de muestras, definidos por el tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado. Los resultados del ANOVA revelaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($F = 989.723$; $p < 0.01$), lo que indica que el tamaño y contenido de las partículas de vidrio reciclado tienen un impacto significativo en la resistencia a la compresión del suelo arcilloso.

Para identificar qué grupos específicos diferían entre sí, se llevaron a cabo pruebas post-hoc utilizando el método de Tukey HSD. Estas pruebas demostraron que la mayoría de los grupos presentaban diferencias significativas en la resistencia a la compresión ($p < 0.05$). Sin embargo, se observaron algunas excepciones, como la ausencia de diferencias significativas entre los grupos con 25% de vidrio de tamaño 2-4mm y 35% de vidrio de tamaño 4-6mm, así como entre el grupo de control (0) y el grupo con 25% de vidrio de tamaño 4-6mm.

Los intervalos de confianza al 95% para las medias de resistencia a la compresión de cada grupo son:

- Grupo control: 25.38 - 27.05 kg/cm²
- Grupo 25% vidrio, 0-2mm: 30.55 - 31.39 kg/cm²
- Grupo 25% vidrio, 2-4mm: 34.25 - 34.57 kg/cm²

- Grupo 25% vidrio, 4-6mm: 27.02 - 27.42 kg/cm²
- Grupo 35% vidrio, 0-2mm: 31.39 - 32.41 kg/cm²
- Grupo 35% vidrio, 2-4mm: 34.93 - 35.36 kg/cm²
- Grupo 35% vidrio, 4-6mm: 30.32 - 31.24 kg/cm²

Estos intervalos de confianza proporcionan una estimación del rango en el que se encuentra la verdadera media poblacional con un 95% de confianza, reforzando la solidez de nuestras conclusiones.

Las pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) indicaron que los datos seguían una distribución normal en todos los grupos ($p > 0.05$). La prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas entre los grupos ($p > 0.05$), validando los supuestos del ANOVA.

Además, se realizó un análisis de subconjuntos homogéneos empleando la prueba de Tukey para agrupar las muestras según su similitud en términos de resistencia a la compresión. Este análisis identificó 6 subconjuntos distintos, lo que confirma la formación de grupos basados en el tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado, respaldando los hallazgos observados en los ensayos de laboratorio.

Estos análisis estadísticos refuerzan la validez de nuestras conclusiones sobre la influencia del tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado en la resistencia a la compresión del suelo arcilloso, proporcionando una base sólida para la interpretación de los resultados y la formulación de recomendaciones prácticas.

Tabla 16

Análisis estadístico descriptivo por grupo

SUELO Y VIDRIO	Media	Error Estándar	IC 95%	Mediana	Varianza	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Rango	Asimetría
Control (0)	26.2133	0.19462	25.38-27.05	26.1700	0.114	0.33710	25.90	26.57	0.67	0.569

25% vidrio 0-2mm (252)	30.9733	0.09770	30.55- 31.39	30.9300	0.029	0.16921	30.83	31.16	0.33	1.077
25% vidrio 2-4mm (254)	34.4100	0.03606	34.25- 34.57	34.3900	0.004	0.06245	34.36	34.48	0.12	1.293
25% vidrio 4-6mm (256)	27.2200	0.04583	27.02- 27.42	27.2500	0.006	0.07937	27.13	27.28	0.15	-1.458
35% vidrio 0-2mm (352)	31.8967	0.11837	31.39- 32.41	32.0100	0.042	0.20502	31.66	32.02	0.36	-1.727
35% vidrio 2-4mm (354)	35.1467	0.05044	34.93- 35.36	35.1700	0.008	0.08737	35.05	35.22	0.17	-1.116
35% vidrio 4-6mm (356)	30.7800	0.10693	30.32- 31.24	30.7100	0.034	0.18520	30.64	30.99	0.35	1.458

Los estadísticos descriptivos detallados revelan patrones importantes en la efectividad del vidrio reciclado. La menor varianza (0.004) y desviación estándar (0.06245) se observaron en la mezcla con 25% de vidrio 2-4mm, indicando alta consistencia en los resultados. La mezcla con 35% de vidrio 2-4mm alcanzó la mayor resistencia media (35.1467 kg/cm²) con baja variabilidad (varianza = 0.008), demostrando la reproducibilidad del método. Los valores de asimetría indican que la mayoría de las distribuciones son moderadamente asimétricas, pero dentro de rangos aceptables para análisis paramétricos. Los rangos reducidos en las muestras con vidrio de 2-4mm (0.12-0.17) sugieren que este tamaño de partícula produce resultados más consistentes en comparación con otros tamaños.

Tabla 17

Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	200.574	6	33.429	989.723	0.000
Dentro de grupos	0.473	14	0.034		
Total	201.047	20			

El ANOVA demuestra que el tamaño y contenido de partículas de vidrio tienen un efecto altamente significativo en la resistencia a la compresión del suelo ($F = 989.723$; $p < 0.01$). La baja suma de cuadrados dentro de grupos (0.473) en comparación con la suma entre grupos (200.574) confirma que las diferencias observadas se deben principalmente a los tratamientos aplicados y no a la variabilidad experimental.

Tabla 18

Pruebas de normalidad

Grupo	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Control	0.988	3	0.787
25% vidrio 0-2mm	0.951	3	0.573
25% vidrio 2-4mm	0.923	3	0.463
25% vidrio 4-6mm	0.893	3	0.363
35% vidrio 0-2mm	0.771	3	0.047
35% vidrio 2-4mm	0.947	3	0.554
35% vidrio 4-6mm	0.893	3	0.363

Las pruebas de Shapiro-Wilk confirman que todas las combinaciones de tamaño y contenido de vidrio presentan una distribución normal de los datos de resistencia a la compresión ($p > 0.05$). Esto valida la calidad del proceso experimental y la confiabilidad de las mediciones realizadas, respaldando las conclusiones sobre la efectividad del vidrio reciclado como material de mejora del suelo arcilloso.

4. Discusiones

- Nuestros hallazgos revelan un aumento notable en la resistencia a la compresión del suelo arcilloso cuando se agregan partículas de vidrio reciclado, particularmente dentro de los rangos de tamaño de 0-2 mm y 2-4 mm. Esta observación se corresponde con el

trabajo de Saberian et al. (2020), quienes notaron mejoras en las propiedades mecánicas del suelo debido a la inclusión de vidrio triturado. Sin embargo, nuestro estudio avanza en este conocimiento al señalar un tamaño de partícula óptimo que contribuye a la mejora de la resistencia. La reducción de la resistencia observada con tamaños de partículas más grandes (4-6 mm) indica un umbral de tamaño crítico, más allá del cual disminuye la efectividad del refuerzo. Esta percepción es consistente con los resultados informados por Disfani et al. (2011), que destacaron que el vidrio reciclado de tamaño mediano y fino mostró características similares a las de los agregados naturales con respecto a la resistencia al corte.

- Existe una correlación inversa entre la permeabilidad del suelo arcilloso y la cantidad de contenido de vidrio reciclado, como lo demuestran nuestros resultados. Esta observación se alinea con la investigación realizada por Yaghoubi et al. (2021), que observaron alteraciones en las características hidráulicas de los suelos mejorados con vidrio reciclado. No obstante, nuestra investigación ofrece una medición más precisa de esta correlación en varios tamaños de partículas. El aumento del contenido de vidrio conduce a una disminución de la permeabilidad, probablemente debido a que las partículas de vidrio llenan los poros del suelo y forman una estructura más densa. Este efecto tiene implicaciones significativas para las aplicaciones geotécnicas en las que la gestión eficaz del drenaje es vital, como en la creación de barreras hidráulicas o durante la construcción de terraplenes.
- Existe una interacción compleja entre el tamaño y la composición de las partículas de vidrio y sus efectos sobre las propiedades mecánicas del suelo, como indican nuestros resultados. El aumento observado en la resistencia a la compresión y la reducción de la permeabilidad en tamaños específicos y contenidos de vidrio apuntan a una alteración notable en la estructura del suelo. Esto se alinea con los hallazgos de Chen

et al. (2020), que observaron una mayor resistencia a la carga a partir de la incorporación de vidrio reciclado en agregados de demolición reciclados. Sin embargo, nuestra investigación ofrece una visión más matizada de cómo estas mejoras difieren en función de los distintos tamaños y contenidos de vidrio.

- Si bien este estudio se centró específicamente en la resistencia a la compresión y la permeabilidad, es importante reconocer la interrelación de estos parámetros con el comportamiento de consolidación del suelo. La resistencia a la compresión y la permeabilidad son indicadores clave que influyen indirectamente en las características de consolidación del suelo arcilloso mejorado con partículas de vidrio reciclado. La resistencia a la compresión, que hemos observado que aumenta con la adición de partículas de vidrio de ciertos tamaños, sugiere una mayor capacidad del suelo para resistir deformaciones bajo carga. Este aumento en la resistencia podría traducirse en una reducción de la compresibilidad del suelo, lo que a su vez afectaría su comportamiento de consolidación. Por otro lado, los cambios en la permeabilidad que hemos registrado con la adición de partículas de vidrio tienen implicaciones directas en la velocidad de consolidación del suelo. Una permeabilidad reducida, como se observó en algunos casos, podría resultar en una consolidación más lenta, mientras que un aumento en la permeabilidad podría acelerar este proceso. Aunque no se realizaron ensayos de consolidación específicos en este estudio, los resultados obtenidos nos permiten inferir que la adición de partículas de vidrio reciclado probablemente altera las características de consolidación del suelo arcilloso. La magnitud y naturaleza de estos cambios dependerían del tamaño y contenido de las partículas de vidrio, de manera similar a lo observado en la resistencia a la compresión y la permeabilidad. Futuros estudios podrían expandir esta investigación para incluir ensayos de consolidación específicos, lo que proporcionaría una comprensión más completa de

cómo la adición de vidrio reciclado afecta el comportamiento a largo plazo del suelo bajo cargas sostenidas. Sin embargo, los hallazgos actuales sobre resistencia a la compresión y permeabilidad ya ofrecen indicios valiosos sobre las posibles alteraciones en el comportamiento de consolidación del suelo mejorado con vidrio reciclado. Esta interpretación de nuestros resultados en el contexto del comportamiento de consolidación subraya la importancia de nuestro enfoque en la resistencia a la compresión y la permeabilidad, al tiempo que reconoce la complejidad de las propiedades mecánicas del suelo y abre caminos para futuras investigaciones.

- A pesar de los resultados significativos obtenidos, es importante reconocer las limitaciones de este estudio. En primer lugar, la investigación se centró en un tipo específico de suelo arcilloso de la región de Juliaca, Puno, lo que podría limitar la generalización de los resultados a otros tipos de suelos arcillosos. Además, el rango de tamaños y contenidos de partículas de vidrio reciclado estudiados, aunque amplio, no abarca todas las posibles combinaciones. Las condiciones de laboratorio, si bien controladas, pueden no reflejar completamente las condiciones de campo reales, especialmente en términos de variabilidad ambiental y estrés a largo plazo. Finalmente, aunque se realizaron pruebas de resistencia a la compresión y permeabilidad, otros aspectos importantes de la mecánica de suelos, como la resistencia al corte o el comportamiento bajo cargas cíclicas, no fueron evaluados en este estudio.

5. Conclusiones

- Los resultados demuestran que el tamaño de las partículas de vidrio reciclado tiene un impacto significativo en la resistencia a la compresión del suelo arcilloso. Las partículas de tamaño medio (2-4 mm) mostraron el mayor aumento en la resistencia a la

compresión, seguidas por las partículas más pequeñas (0-2 mm). Las partículas más grandes (4-6 mm) tuvieron un efecto menos pronunciado. Esto sugiere que existe un tamaño óptimo de partículas para mejorar la resistencia a la compresión, probablemente debido a una mejor integración con la matriz del suelo.

- Se observó una relación inversa entre el contenido de partículas de vidrio reciclado y la permeabilidad del suelo. A medida que aumentaba el contenido de vidrio, la permeabilidad disminuía. Este efecto fue más pronunciado con partículas más pequeñas, lo que sugiere que estas llenan más eficazmente los poros del suelo. Esta reducción en la permeabilidad podría ser beneficiosa en aplicaciones donde se requiere una baja conductividad hidráulica, pero podría ser una limitación en situaciones donde se necesita un buen drenaje.
- Los resultados indican una interacción compleja entre el tamaño y el contenido de las partículas de vidrio reciclado en relación con las propiedades mecánicas del suelo. En general, un mayor contenido de vidrio (35%) resultó en una mayor resistencia a la compresión en comparación con un contenido menor (25%), pero este efecto varió según el tamaño de las partículas. La combinación óptima parece ser un contenido del 35% con partículas de tamaño medio (2-4 mm), que proporcionó la mayor resistencia a la compresión.
- Aunque estos hallazgos sean significativos, es importante reconocer las limitaciones de este estudio. La investigación se centró en un tipo específico de suelo arcilloso y un rango limitado de tamaños y contenidos de vidrio reciclado. Futuras investigaciones deberían explorar una gama más amplia de tipos de suelo y combinaciones de vidrio reciclado. Además, sería valioso realizar estudios a largo plazo en condiciones de campo para evaluar el rendimiento del suelo mejorado con vidrio reciclado bajo condiciones ambientales reales. También se recomienda investigar otros aspectos importantes de la

mecánica de suelos, como la resistencia al corte y el comportamiento bajo cargas cíclicas, para obtener una comprensión más completa de los efectos del vidrio reciclado en las propiedades del suelo.

6. Lista de Referencias

- Abood, M. Y., & Shakir, R. R. (2023). Strength Characteristics of Clay Soil Reinforced with Natural Fibers. *Mağallaġ Al-baġraġ Li-l-‘ulūm Al-handasiyyaġ*, 23(1), 43–49. <https://doi.org/10.33971/bjes.23.1.6>
- Amiri, S T., Dehghanbanadaki, A., Назир, P., & Motamedi, S. (2020). Unit composite friction coefficient of model pile floated in kaolin clay reinforced by recycled crushed glass under uplift loading. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100313>
- Ardianto, R. P., Candra, A. I., Widyakrama, O. T., Supriyo, R. H., & Rivianto, A. (2023). Menentukan tingkat kelayakan tanah lempung untuk menyalurka beban kontruksi (Determining the feasibility level of clay for distributing construction loads). *Jurnal Talenta Sipil*, 6(1), 195. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v6i1.166>
- Bayoumi, A., Chekired, M., & Karray, M. (2023). Laboratory measurement of permeability in postseismic flow. *International Journal of Geomechanics*, 23(3). <https://doi.org/10.1061/ijgnai.gmeng-7715>
- Choong, C. E., Wong, K. T., Jang, S. B., Jooho, S., An, S., Kang, C., Yoon, Y., & Jang, M. (2022). Soil permeability enhancement using pneumatic fracturing coupled by vacuum extraction for in-situ remediation: Pilot-scale tests with an artificial neural network model. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 107075. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107075>
- Disfani, MM, Arulrajah, A., Bo, MW y Hankour, R. (2011). Vidrio triturado reciclado en aplicaciones de obras viales. *Gestión de residuos*, 31(10), 2341-2351.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124948>

- Gverić, Z., Rubinić, V., Kampić, Š., Vrbanec, P., Paradžik, A., & Tomašić, N. (2022). Clay mineralogy of soils developed from Miocene marls of Medvednica Mt., NW Croatia: Origin and transformation in temperate climate. *CATENA*, 216, 106439. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106439>
- Jujun, Ruan., Dong, Lipeng., Jie, Zhu., Xu, Zhenming. (2018). Sistema y método de reciclaje de trituración y clasificación de residuos de vidrio.
- Keramatikerman, M., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2020). Soil stabilisation using glass powder. *International Journal of Engineering Applied Science and Technology*, 04(11), 339–342. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2020.v04i11.060>
- Kocaman, K., Özocak, A., Edil, T. B., Bol, E., Sert, S., Onturk, K., & Özsağır, M. (2022). Evaluation of Soil-Water characteristic curve and Pore-Size distribution of Fine-Grained soils. *Water*, 14(21), 3445. <https://doi.org/10.3390/w14213445>
- Mosa, A. M., Al-Dahlaki, M. H., & Salem, L. A. (2021). Modification of roadbed soil by crushed glass wastes. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 9(2), 1038. <https://doi.org/10.21533/pen.v9i2.2029>
- Niyomukiza, J. B., Eisazadeh, A., Akamumpa, J., Kiwanuka, M., Lukwago, A., & Tiboti, P. (2023). Use of waste glass powder in improving the properties of expansive clay soils. *Global NEST Journal*, 25(3), 139-145. Retrieved from https://journal.gnest.org/publication/gnest_04549
- Niyomukiza, J.B., Eisazadeh, A., Akamumpa, J., Kiwanuka, M., Lukwago, A., & Tiboti, P. (2023). Use of waste glass powder in improving the properties of expansive clay soils. *Global NEST Journal*, 25(3), 139-145. <https://doi.org/10.30955/gnj.004549>
- Ojotisa, V., & Balkis, A. P. (2023). Improvement of shear strength of Fine-Grained soils by waste glass. In *Lecture notes in civil engineering* (pp. 493–502).

https://doi.org/10.1007/978-3-031-20172-1_48

Patel, S. K. (2022). Experimental investigation of glass fiber reinforced clayey soil for its possible application as pavement subgrade material. In IntechOpen eBooks.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.102802>

Sharma, A., Thakur, Y., Gupta, A., & Singh, J. (2019). Effect of glass dust on properties of soil.

Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 6(2). Retrieved from

<http://www.jetir.org> (ISSN-2349-5162)

Urs, C. Y., & Prasanna, H. S. (2022). Parametric study on compaction characteristics of clay sand mixtures. In *Lecture notes in civil engineering* (pp. 141–152).

https://doi.org/10.1007/978-981-19-6513-5_12

Woldesenbet, T. T. (2023). Strength improvement of black cotton soil using plastic bottles and crushed glass wastes. *Journal of Engineering*, 2023, 1–11.

<https://doi.org/10.1155/2023/1583443>

Zhu, J., Chen, X., Ruan, J., Li, Y., He, E., & Xu, Z. (2019). A safe and efficient technology of recovering nano glass from penicillin bottles of medical wastes. *Journal of Cleaner Production*, 229, 632–639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.072>.

Anexos

Anexo 1. Evidencia de sumisión

20/11/24, 2:08 p.m.

Gmail - [ric] Submission Acknowledgement



Aldeir Pomari <aldeir90@gmail.com>

[ric] Submission Acknowledgement

Aldeir Pomari <aldeir90@gmail.com>
Para: mary lu ccari <marylucari123@gmail.com>

20 de noviembre de 2024, 13:09

----- Mensaje reenviado -----

De: **Omar Zegarra Marmanillo** | Editor Asistente <ric.ing@uc.cl>
Fecha: mié, 20 de noviembre de 2024 a las 1:00 pm: 05
Asunto: [ric] Acuse de recibo
A: ALDEIR POMARI CAÑAZACA <aldeir.90@gmail.com>

ALDEIR POMARI CAÑAZACA:

Gracias por enviar el manuscrito, "Influencia del tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso: Resistencia a la compresión y permeabilidad: Influencia del tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso: Resistencia a la compresión y permeabilidad" a la Revista Ingeniería de Construcción. Con el sistema de gestión de revistas en línea que estamos utilizando, podrá seguir su progreso a través del proceso editorial ingresando al sitio web de la revista: [URL](#)

de envío: <https://revistaingenieriaconstruccion.uc.cl/index.php/ric/authorDashboard/submission/86812> Nombre de usuario: aldeir_pomari Si tiene alguna [pregunta](#)

, por favor contácteme. Gracias por considerar esta revista como un lugar para su trabajo. [Omar](#)

Zegarra Marmanillo | Editor asistente

Omar Zegarra Marmanillo

Editor asistente

{journalName} <http://ojs.uc.cl/index.php/ric>

Revista: Revista Ingeniería Construcción.

Fecha de sumisión: 20 de noviembre de 2024.

Anexo 2. Resolución de Expedito



“AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO”

RESOLUCIÓN N° 0931-2024/UPeU-FIA-CF

Lima, Ñaña, 19 de noviembre de 2024

VISTO:

El expediente de los (las) bachilleres **Mary Luz Ccari Laura** identificado(a) con código universitario N° 201520031 y **Aldeir Pomari Cañazaca** identificado(a) con código universitario N° 201521114, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la sustentación de la tesis en formato artículo;

Que el Comité Dictaminador ha emitido su dictamen aprobando el informe de tesis titulado “Influencia del tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso: Resistencia a la compresión y permeabilidad”, presentado por los (las) bachilleres **Mary Luz Ccari Laura** y **Aldeir Pomari Cañazaca**, reuniendo de esta manera las condiciones previas para la declaratoria de expedito para la programación de la sustentación;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 19 de noviembre de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

1. Declarar expedito a los (las) bachilleres **Mary Luz Ccari Laura** y **Aldeir Pomari Cañazaca**, para que sustenten la tesis en formato artículo titulada “Influencia del tamaño y contenido de partículas de vidrio reciclado en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso: Resistencia a la compresión y permeabilidad”, conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Civil, el 04 de diciembre, a las 09:00 horas, en el Auditorio Pedro Kalbermatter.
2. Designar el Jurado de Sustentación, encargado de gestionar la sustentación respectiva, el mismo que queda constituido por los siguientes miembros:

Presidente: Ing. Herson Duberly Pari Cusi
Secretario: Mg. Edwin Parillo Escarsena
Asesor: Mtro. Leonel Chahuares Paucar
Vocal: Dr. Nestor Alejandro Cruz Calapuja

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Ph.D. Silvia Pilco Quesada
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:
-Intermedio
-Jurado (04)
-Secretaría General
-Archivo

Anexo 3. Ensayos de laboratorio



MEGALABORATORIO DEL SUR S.R.L.

Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concreto, Asfalto, Análisis Químico de Agregados, Agua y Ensayos de Materiales



RESUMEN DEL ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS

TESIS : INFLUENCIA DEL TAMAÑO Y CONTENIDO DE PARTÍCULAS DE VIDRIO RECIKLADO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO ARCILLOSO: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y PERMEABILIDAD*
SOLICITANTE : MARY LUZ CCARI LAURA - ALDEIR POMARI CAÑAZACA
UBIC. DEL PROY. : DISTRITO DE JULIACA - PROVINCIA DE SAN ROMÁN - DEPARTAMENTO DE PUNO
MUESTRA : MATERIAL ARENA ARCILLOSA
FECHA : 30 DE ENERO DE 2024
INGENIERO RESPONSABLE : W.M.Z.
TÉCNICO DE LABORATORIO : A.D.M.V.

% CONTENIDO DE HUMEDAD, NORMA ASTM D-2216	
4.007 %	
CLASIFICACIÓN DE SUELOS, NORMA ASTM D2487- 17	
Cu	0.00
Cc	0.00
SUCS	SC
AASHTO	A-2-4
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, NORMA ASTM D 6913/6913 -17	
% DE GRAVA	30.56 %
% DE ARENA	39.24 %
% DE FINOS	30.20 %
LÍMITES DE CONSISTENCIA, NORMA ASTM D4318 - 17	
LÍMITES LÍQUIDO	30.856 %
LÍMITE PLÁSTICO	22.150 %
ÍNDICE DE PLÁSTICIDAD	8.706 %
PROCTOR MODIFICADO Y CBR, NORMA ASTM D1557/ASTM D1883	
PROCTOR PARA CBR - DENSIDAD	--
PROCTOR PARA CBR - CHO	--
CBR AL 100 %	--
CBR AL 95%	--
PROCTOR MODIFICADO CONTROL DE CALIDAD NORMA ASTM D1557	
PESO UNITARIO MÁXIMO SECA	19.348 kN/m ³
DENSIDAD MÁXIMA SECA	1.973 gr/cm ³
C.H.O. %	11.500 %

OBSERV.: LOS MATERIALES FUE PROPORCIONADO POR EL SOLICITANTE
 NOTA: LA DENSIDAD MÁXIMA SECA DEL CONTROL DE CALIDAD SE UTILIZARA PARA REALIZAR REMOLDEOS CON ADICIONAMIENTO DE PARTÍCULAS DE VIDRIO RECIKLADO.

MEGALABORATORIO DEL SUR S.R.L.
 ING. ALEX DAVID MUMUZ VARGAS
 TÉCNICO DE LABORATORIO

MEGALABORATORIO DEL SUR S.R.L.
 WALTER MACHACA ZAMATA
 INGENIERO CIVIL CIP N° 126148
 ESPECIALISTA EN GEOTECNIA



CONTENIDO DE HUMEDAD	
(MÉTODO DE ENSAYO MTC E 108, NORMA ASTM D-2216)	
TESIS	: INFLUENCIA DEL TAMAÑO Y CONTENIDO DE PARTICULAS DE VIDRIO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO ARCILLOSO; RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y PERMEABILIDAD*
SOLICITANTE	: MARY LUZ CCARI LAURA - ALDEIR POMARI CAÑAZACA
UBIC. DEL PROY.	: DISTRITO DE JULIACA - PROVINCIA DE SAN ROMAN - DEPARTAMENTO DE PUNO
MUESTRA	: MATERIAL ARENA AROLLOSA
FECHA	: 30 DE ENERO DE 2024
INGENIERO RESPONSABLE	: W.M.Z.
TÉCNICO DE LABORATORIO	: A.D.M.V.

ENSAYO DE LA DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL DEL SUELO				
ENSAYO	Nº	1	2	3
TARA	Nº	T - 121	T - 48	T - 95
MASA DE LA TARA	(gm)	30.25	34.10	32.35
MASA DE LA TARA + SUELO HÚMEDO	(gm)	3296.06	3303.06	3299.26
MASA DE LA TARA + SUELO SECO	(gm)	3168.00	3177.12	3175.66
MASA DEL AGUA	(gm)	128.06	125.94	123.60
MASA DEL SUELO SECO	(gm)	3137.75	3143.02	3143.32
HUMEDAD	%	4.08	4.01	3.93
PROMEDIO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	%	4.01		

FORMULA DE CALCULO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

$$W\% = \frac{\text{peso del agua}}{\text{peso seco}} * 100 = \frac{W_h - W_s}{W_s} * 100$$



- DATOS DONDE:**
- W% = CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO
 - Wh = PESO DE LA MUESTRA HUMEDA
 - Ws = PESO DE LA MUESTRA SECA

MEGALABORATORIO DEL SUR S.R.L.
 ING. ALEX DAVID MUÑOZ VARGAS
 TÉCNICO DE LABORATORIO

MEGALABORATORIO DEL SUR S.R.L.
 WALTER MACHACA ZAMATA
 INGENIERO CIVIL CIP Nº 126146
 ESPECIALISTA EN GEOTECNIA



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO
(MÉTODO DE ENSAYO MTC E 107, NORMA ASTM D 6913M-17)

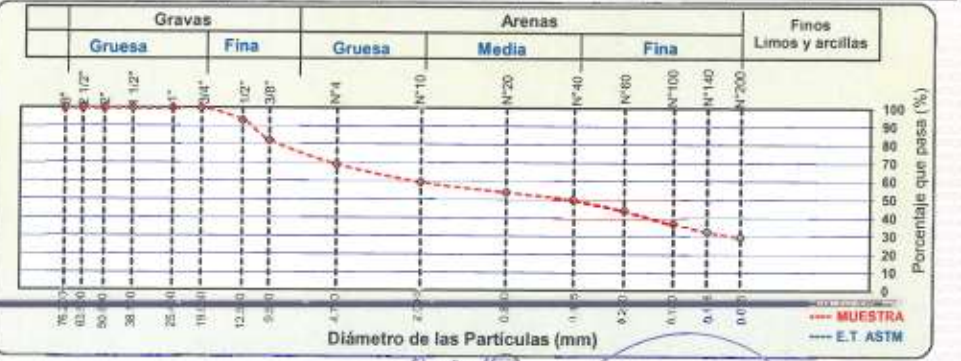
TESIS : INFLUENCIA DEL TAMAÑO Y CONTENIDO DE PARTICULAS DE VIDRIO RECIKLADO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO ARCILLOSO: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y PERMEABILIDAD¹
SOLICITANTE : MARY LUZ CCARI LAURA - ALDEIR POMARI CAÑAZACA
UBIC. DEL PROJ. : DISTRITO DE JULIACA - PROVINCIA DE SAN ROMAN - DEPARTAMENTO DE PUNO
MUESTRA : MATERIAL ARENA ARCILLOSA
FECHA : 30 DE ENERO DE 2024
INGENIERO RESPONSABLE : W.M.Z.
TÉCNICO DE LABORATORIO : A.D.M.V.

DATOS DE ENSAYO	—	Tamizado Simple			PERDIDA DE PROCESAMIENTO		
		1ra separación	2da separación	tamizado simple/fracción	CRITERIO	0.5	0.5
masa total cuarteado	E	1614.00	—	—	fase de ensayo	lavado	tamizado
tamiz de separación	N°	>3/4"	—	<3/4"	1ra separación	—	0.00
masa total seca, separada -2da cuart.	E	0.00	—	1614.00	2da separación	0.25	0.25
masa total seca lavada	E	0.00	—	1596.12	Suma Ret. N° 200	1126.6	1126.6
sumatoria de masa retenida	E	0.00	—	1592.13	Diferencia con masa inicial	—	487.5
					Dif. entre MS y MLS	17.9	21.9

TAMIZES ASTM	ABERTURA mm	FRACCIÓN QUE PASA DE LA 1ra SEPARACIÓN (kg/g)	FRACCIÓN QUE TAMBIÉN PASA (kg/g)	retenido en tamiz separador (%)	% en Jr. Tamizado	% RETENIDO SOBRE MUESTRA	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUM. QUE PASA	NO CORRESPONDE ESPECIFICACIÓN
3"	76.200	0.0	0	—	0.06196	0.00	0.00	100.00	—
2-1/2"	63.500	0.0	0	—	0.06196	0.00	0.00	100.00	—
2"	50.800	0.0	0	—	0.06196	0.00	0.00	100.00	—
1-1/2"	38.100	0.0	0	—	0.06196	0.00	0.00	100.00	—
1"	25.400	0.0	0	—	0.06196	0.00	0.00	100.00	—
3/4"	19.050	0.0	0	—	0.06196	0.00	0.00	100.00	—
1/2"	12.500	0.0	108.00	—	0.06196	8.89	8.89	93.31	—
3/8"	9.500	0.0	175.89	—	0.06196	10.90	17.59	82.4	—
N° 4	4.750	0.0	209.31	—	0.06196	12.97	30.56	69.4	—
N° 10	2.000	0.0	153.05	—	0.06196	9.48	40.04	60.0	—
N° 20	0.840	0.0	87.92	—	0.06196	5.45	45.49	54.5	—
N° 40	0.425	0.0	65.39	—	0.06196	4.05	49.54	50.5	—
N° 60	0.250	0.0	90.96	—	0.06196	5.84	55.17	44.8	—
N° 100	0.150	0.0	117.15	—	0.06196	7.26	62.43	37.6	—
N° 140	0.106	0.0	68.67	—	0.06196	4.25	66.69	33.3	—
N° 200	0.075	0.0	50.21	—	0.06196	3.11	69.80	30.2	—
fondo	—	0.0	465.58	—	0.06196	30.20	100.00	0.0	—

OBSERV.: LOS MATERIALES FUERON PROPORCIONADO POR EL SOLICITANTE

MEDIDEN DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	RESERVA DE LÍMITES LL. CONSISTENCIA	DIÁMETROS EFECTIVOS Y COEFICIENTES	CLASIFICACIÓN DE SUELOS
% DE GRAVA = 30.56	% LÍMITE LÍQUIDO = 30.86	d10 = 0	SUCS = SC
% DE ARENA = 39.24	% LÍMITE PLÁSTICO = 22.15	d30 = 0.09	AASHTO = A-2-4
% DE FINOS = 30.20	% I. DE PLASTICIDAD = 8.71	d60 = 2.18	I. GRUPO = U



MEGALABORATORIO DEL SUR S.R.L.
ING. ALEX DAVID PAREZ VARGAS
 TÉCNICO DE LABORATORIO

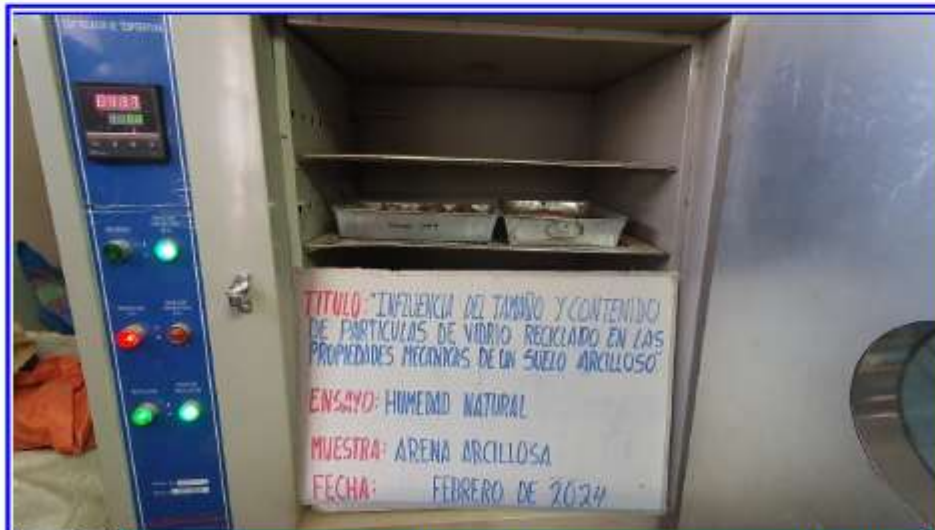
MEGALABORATORIO DEL SUR S.R.L.
WALTER MACHACA ZAMATA
 INGENIERO CIVIL CIP N° 126148

Anexo 4. Panel fotográfico de ensayos

PANEL FOTOGRÁFICO DE ENSAYOS EN LABORATORIO
"INFLUENCIA DEL TAMAÑO Y CONTENIDO DE PARTICULAS DE VIDRIO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DE UN SUELO ARCILLOSO"



VISTA 01: CUARTEO DE MUESTRAS DE CAMPO PARA SU SECADO, MATERIAL PARA TRABAJO DE INVESTIGACION.



VISTA 02: SECADO DE MUESTRAS DE CAMPO EN HORNO, MATERIAL PARA TRABAJO DE INVESTIGACION.

PANEL FOTOGRÁFICO DE ENSAYOS EN LABORATORIO
"INFLUENCIA DEL TAMAÑO Y CONTENIDO DE PARTICULAS DE VIDRIO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DE UN SUELO ARCILLOSO"



VISTA 03: PROCESO DE REGISTRO Y PESADO DE MUESTRAS SECAS, MATERIAL PARA TRABAJO DE INVESTIGACION.



VISTA 04: PREPARANDO TAMICES PARA REALIZAR EL ENSAYO DE GRANULOMETRIA.

PANEL FOTOGRAFICO DE ENSAYOS EN LABORATORIO
"INFLUENCIA DEL TAMAÑO Y CONTENIDO DE PARTICULAS DE VIDRIO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DE UN SUELO ARCILLOSO"

