UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis

Influencia de la adición del vidrio reciclado en la capacidad de soporte de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023

Asesor:

Ph.D. Vásquez Ramírez Abbon Alex

Autor:

Aguilar Huaraca Luis Alberto

Para optar el título profesional:

Ingeniero Civil

Abancay – Apurímac – Perú

2025

Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 003

En la ciudad de Abancay año 2025 en el mes de **enero** día **viernes** del **31** siendo las **09:00 am**, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral **N° 063-2025-EPIC-FI-UTEA-SA** de fecha **22** de **enero** del **2025**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente	:	MSc. Ing. Angel MALDONADO MENDÍVIL
Dictaminante	:	Ing. Holguer CAYO BACA
Replicante	:	Ing. Rubén GAMARRA MOTA

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

"Influencia de la adición del vidrio reciclado en la capacidad de soporte de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco-Abancay 2023"

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br: AGUILAR HUARACA, Luis Alberto

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: unanimidad

(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Br. AGUILAR HUARACA, Luis Alberto	**Aprobado**

Siendo **las 10:40 de la mañana** concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: MSc. Ing. Angel MALDONADO MENDÍVIL

Dictaminante: Ing. Holguer CAYO BACA

Replicante: Ing. Rubén GAMARRA MOTA

Abancay 06 de febrero del 2025

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, contenido en los

(*): **Mayoría**: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; **Unanimidad**: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban. Art. 18 REDAE.

Influencia de la adición del vidrio reciclado en la capacidad de soporte de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco-Abancay 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%	16%	3%	8%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
2	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes Trabajo del estudiante	3%
3	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Universidad San Francisco de Quito Trabajo del estudiante	<1%
7	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1%
	repositorio.uss.edu.pe	

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Aguilar Huaraca Luis Alberto
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	71809616
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0005-8095-2494
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Vásquez Ramírez Abbon Alex
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	06532658
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-7299-5367
Datos de la investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de Investigación	:	Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	:	Noviembre 2023 – agosto 2024
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de originalidad	:	17%
URL ORCID	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

La confección de la actual disertación la consagro a mi progenitor celestial, por las enseñanzas que me transmitió, así como por otorgarme lucidez y orientarme en esta senda existencial.

A mi madre, Sabina Huaraca Aedo, por ser la entidad que me incitó y me estimuló a jamás rendirme, y por haberse mantenido a mi lado durante toda esta travesía vital, en homenaje a tu paciencia infinita y tu amor desinteresado.

A mi padre, quien desde los astros guía mis pasos, instándome a seguir hacia adelante en esta travesía que es la vida.

Agradecimiento

A mi progenitor celestial, por otorgarme vigor, sapiencia para elegir acertadamente, y los valores fundamentales que orientan mi existir diario.

A mi núcleo familiar, por ofrecerme su respaldo y aliento para persistir en la senda existencial.

A todos los maestros que compartieron conmigo sus saberes y sabidurías.

A mi mentor, el Ph.D. Abbon Alex Vásquez Ramírez, por su guía incesante, templanza y vasta experiencia.

Resumen

La presente tesis tiene el objetivo de analizar la influencia de la adición del vidrio reciclado en el mejoramiento de la capacidad de soporte de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca del distrito de Tamburco. La metodología de la presente tesis es aplicada, nivel explicativo y diseño experimental. Se llevaron a cabo pruebas físicas y mecánicas sobre las muestras de terreno original, y posteriormente se les incorporó polvo de vidrio reciclado en proporciones de 7%, 11%, 15% y 20%, en relación con el peso seco de la muestra. Los hallazgos señalaron decrementos sustanciales en el índice de plasticidad, evidenciándose que conforme se eleva el porcentaje de vidrio reciclado, dicho valor disminuye, reduciéndose de un promedio de 16.21% (suelo natural) a 9.85% con la dosificación del 20%. En cuanto a la densidad seca máxima, su valor ascendió de 1.811 g/cm³ (suelo original) a 1.884 g/cm³ de media con la adición del 11% de vidrio reciclado. Asimismo, en lo relativo a la capacidad de soporte, esta aumentó en 1.50 veces su valor, pasando de 2.657% (suelo natural) a 3.98% con la integración del 11% de vidrio reciclado. En conclusión, se deduce que el polvo de vidrio reciclado ejerce una influencia significativa en la capacidad de soporte de los suelos arcillosos.

Palabras clave: Capacidad de soporte, suelos arcillosos, vidrio reciclado, Densidad seca máxima.

Abstract

This thesis focuses mainly on analyzing the influence of the addition of recycled glass in improving the bearing capacity of clayey soils at the subgrade level in Caminos del Inca Street in the district of Tamburco. The methodology of this thesis is applied, explanatory level and experimental design. Physical and mechanical tests were carried out on the original soil samples, and subsequently recycled glass powder was incorporated in proportions of 7%, 11%, 15% and 20%, in relation to the dry weight of the sample. The findings indicated substantial decreases in the plasticity index, showing that as the percentage of recycled glass increases, said value decreases, falling from an average of 16.21% (natural soil) to 9.85% with the dosage of 20%. As for the maximum dry density, its value increased from 1,811 g/cm³ (original soil) to 1,884 g/cm³ on average with the addition of 11% recycled glass. Likewise, as regards the load-bearing capacity, this increased by 1.50 times its value, going from 2,657% (natural soil) to 3.98% with the integration of 11% recycled glass. Consequently, it can be deduced that recycled glass powder exerts a significant influence on the stabilization of clayey soils.

Keywords: support capacity, clay soils, recycled glass, Maximum dry density

Índice general

Portada ..... **i**

Acta de sustentación ..... **ii**

Reporte de similitud ..... **iii**

Metadatos ..... **iv**

Dedicatoria ..... **v**

Agradecimiento ..... **vi**

Resumen ..... **vii**

Abstract ..... **viii**

Índice general ..... **ix**

Índice de tablas ..... **xii**

Índice de figuras ..... **xiv**

Índice de anexos ..... **xv**

I. Introducción **16**

II. Planteamiento del problema **18**

2.1. Descripción y formulación del problema 18

2.2. Objetivos 20

2.2.1. Objetivo General 20

2.2.2. Objetivos Específicos 20

2.3. Justificación e importancia 21

2.4. Hipótesis 22

2.5. Variables 23

III. Marco Teórico 24

3.1. Antecedentes 24

3.2. Bases teóricas 30

3.2.1. Vidrio Reciclado 30

3.2.2. Capacidad de soporte de los suelos 33

3.2.3. Propiedades Físicas de los suelos 36

3.2.3.1. Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado 36

3.2.3.2. Clasificación de Suelos 41

3.2.3.3. Límites de Consistencia 46

3.2.4. Propiedades Mecánicas de los Suelos 51

3.2.4.1. Ensayo de Compactación de Suelos (Proctor Modificado) MTC E 115. 52

3.2.4.2. Relación de Soporte de California CBR. (MTC E132) 57

3.3. Definición de términos 60

IV. Metodología 63

4.1. Tipo y nivel de investigación 63

4.2. Ámbito temporal y espacial 63

4.3. Población y muestra 64

4.4. Instrumentos 66

4.5. Procedimientos 67

4.6. Análisis de datos 72

4.6.1. Prueba de Hipótesis 74

4.6.1.1. Prueba estadística para la hipótesis Especifica 1 74

4.6.1.2. Prueba estadística para la hipótesis Especifica 2 78

4.6.1.3. Prueba estadística para la hipótesis Especifica 3 82

4.7. Consideraciones éticas 86

V. Resultados y discusión 87

5.1. Resultados 87

5.1.1. Análisis granulométrico por tamizado de las muestras 87

5.1.2. Clasificación de suelos SUCS Y AASHTO 88

5.1.3. Ensayo estándar para el valor equivalente de arena de suelos y agregado fino 89

5.1.4. Resultados del Objetivo específico 1 89

5.1.5. Resultados del Objetivo específico 2 93

5.1.6. Resultados del Objetivo específico 3 94

5.2. Discusión de Resultados 96

VI. Conclusiones 99

VII. Recomendaciones 101

VIII. Referencias 102

IX. Anexos 108

Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variables 23

Tabla 2 Composición Química del polvo de vidrio 32

Tabla 3 Propiedades del vidrio Sodo Cálcico 32

Tabla 4 Caracterización de suelos según su Capacidad de Soporte CBR. 34

Tabla 5 Clasificación de Suelos según Tamaño de Partículas. 37

Tabla 6 Cuadro de aberturas de tamices 38

Tabla 7 Determinación del peso de la muestra en función al tamaño máximo de partículas 39

Tabla 8 Lectura de carga de penetración para el CBR 57

Tabla 9 Cantidad de puntos de investigación de acuerdo al tipo de vía. 65

Tabla 10 Ubicación de los puntos de investigación en coordenadas UTM 70

Tabla 11 Análisis de Varianza de medidas repetidas. 72

Tabla 12 Resultados del análisis de normalidad Shapiro - Wilk del I.P 74

Tabla 13 Resultados del análisis de homogeneidad de varianzas del I.P 75

Tabla 14 Media y Desviación estándar del I.P 76

Tabla 15 Resultados de varianza de los promedios Anova del I.P. 77

Tabla 16 Resultados del análisis de Tukey del I.P 78

Tabla 17 Resultados del análisis de normalidad Shapiro - Wilk de la M.D.S 79

Tabla 18 Resultados del análisis de homogeneidad de varianzas de la M.D.S. 79

Tabla 19 Media y Desviación estándar de la M.D.S 80

Tabla 20 Resultados de varianza de los promedios Anova de la M.D.S 81

Tabla 21 Resultados del análisis de Tukey de la M.D.S 82

Tabla 22 Resultados del análisis de normalidad Shapiro - Wilk del CBR. 83

Tabla 23 Resultados del análisis de homogeneidad de varianzas del CBR. 83

Tabla 24 Media y Desviación estándar del CBR**.** 84

Tabla 25 Resultados de varianza de los promedios Anova del CBR. 85

Tabla 26 Resultados del análisis de Tukey del CBR..... 86

Tabla 27 Resultados de la gradación de los suelos obtenidos mediante el análisis granulométrico..... 87

Tabla 28 Resultados de la clasificación de suelos..... 88

Tabla 29 Resultados obtenidos del ensayo de equivalente de arena 89

Tabla 30 Resultados del ensayo para determinar el límite liquido 89

Tabla 31 Resultados del ensayo para determinar el límite plástico..... 90

Tabla 32 Resultados del ensayo para determinar el índice de plasticidad 91

Tabla 33 Resultados del ensayo para determinar el óptimo contenido de humedad..... 93

Tabla 34 Resultados del ensayo para determinar la máxima densidad seca..... 93

Tabla 35 Resultados del CBR al 95% de la máxima densidad seca correspondiente al 0.1" 95

Índice de figuras

Figura 1 Composición química del vidrio reciclado 31

Figura 2 Pasos para la identificación del Tipo de Suelo 35

Figura 3 Proceso de selección del tipo de estabilización 36

Figura 4 Abaco de la carta de plasticidad 43

Figura 5 Ubicación georreferencial de la población 64

Figura 6 Ubicación de las calicatas de la zona de estudio 66

Figura 7 Acopio de residuos de vidrio 68

Figura 8 Vidrio triturado en tamaños de 3" a 2" 69

Figura 9 Obtención de polvo de vidrio 69

Figura 10 Procedimiento de la tesis investigada 72

Figura 11 Promedios del Índice de Plasticidad % 76

Figura 12 Promedios de la Máxima Densidad Seca (gr/cm3). 80

Figura 13 Promedios del valor del CBR %. 84

Figura 14 Curva Granulométrica 88

Figura 15 Resultados del ensayo para determinar el límite liquido 90

Figura 16 Resultados del ensayo para determinar el límite plástico 91

Figura 17 Resultados del ensayo para determinar el índice de plasticidad 92

Figura 18 Resultados del ensayo para determinar la máxima densidad seca 94

Figura 19 Resultados del CBR al 95% de la máxima densidad seca correspondiente al 0.1" 95

Índice de anexos

Anexo 1. Matriz de consistencia ……..…..109

Anexo 2. Matriz de operacionalización de variables ……..110

Anexo 2. Formatos de instrumentos utilizados ……...111

Anexo 3. Certificados y fotografías ……201

I. Introducción

En algunas zonas de expansión urbana del distrito de Tamburco existen subrasantes con material arcilloso que son calificados de regular a malo de acuerdo a su valor del CBR %, además estos suelos presentan baja resistencia, cambios volumétricos y potencial de hinchamiento provocando así daños a las estructuras y por ello se requiere usar métodos para mejorar estos suelos, es por ello que en esta investigación se utilizó como material estabilizante el vidrio reciclado con el fin de analizar si este material influye o no en la capacidad de resistencia de los terrenos arcillosos en la vía denominada Caminos del Inca, ubicada en el distrito de Tamburco.

Las proporciones de vidrio reciclado utilizadas como aditivo estabilizador fueron del 7%, 11%, 15% y 20%, en función del peso seco del suelo. Además, se ejecutaron pruebas de laboratorio para determinar los índices de plasticidad, la máxima densidad seca y la relación de soporte California, tanto en el suelo sin aditivos como con la inclusión del material estabilizante, para luego contrastar y analizar los resultados obtenidos.

La tesis se compone de cinco apartados que se describen a continuación:

Sección I. Se encuentra constituida por la introducción.

Sección II. Aborda la descripción y formulación del problema, los objetivos, la justificación y relevancia, las hipótesis y variables.

Sección III. Este fragmento se focaliza en los antecedentes de investigación, fundamentos conceptuales vinculados al tema de la investigación y las variables.

Sección IV. Esta área abarca el tipo y grado de investigación, el marco temporal y espacial, la población y el conjunto, instrumentos, procedimientos, análisis de datos y principios éticos.

Sección V. Finalmente, este capítulo está conformada por los hallazgos obtenidos de los ensayos efectuados y la interpretación de dichos hallazgos.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

Descripción

La construcción de infraestructuras sobre suelos arcillosos ha sido un problema latente debido a que estos suelos presentan baja resistencia, alta compresibilidad, cambios volumétricos y potencial de hinchamiento provocando así daños a las estructuras, como es el caso del vecino país de Paraguay el cual destina presupuesto periódicamente para el mantenimiento de la ruta de Transchaco, este atraviesa por suelos arcillosos potencialmente expansivos lo que ocasiona deformaciones y hundimientos de los terraplenes y posteriormente las rupturas y corrimientos de la estructura vial (Caceres, 2018). Otro caso similar ocurre en el vecino país de ecuador en la provincia de Manabi existen terrenos que contienen suelos altamente expansivos lo que son perjudiciales al momento de ejecutar cualquier tipo de obra civil, debido a que con el contacto con el agua estos suelos incrementan su volumen provocando asentamientos (Mero y Franco, 2017).

En el ámbito nacional en la región amazonas las vías principales y secundarias se han visto afectadas debido al fenómeno de la expansión de terrenos arcillosos, se ha provocado la fractura de pavimentos, hundimientos, fisuras, entre otros inconvenientes, lo cual interfiere en la operatividad de las rutas (Cercado y Zavaleta, 2018). De manera análoga, en la zona de Cusco, los senderos y caminos que se erigen sobre terrenos arcillosos con baja capacidad de resistencia no logran soportar las cargas del tránsito vehicular, presentando dificultades como fisuras y hundimientos que causan el desgaste progresivo de toda la estructura de la capa asfáltica, reduciendo así su durabilidad y afectando el bienestar de los individuos que circulan en sus automóviles (Argadoña y Palomino, 2019).

El distrito de Tamburco no es ajeno a esta problemática, ya que la urbanización y el rápido crecimiento poblacional especialmente en áreas de expansión urbana han llevado a un

aumento significativo de las actividades de construcción especialmente proyectos de infraestructuras relacionadas con pavimentos de carreteras para satisfacer la necesidad de transporte y la excelencia vivencial, sin embargo, debido a las limitaciones de espacio y los alineamientos de las calles, es posible que sea necesario construir pavimentos sobre suelos arcillosos, como es el caso de la calle Caminos del Inca, el cual se encuentra sobre suelos arcillosos y se puede apreciar perdida de finos y asentamientos notorios, que perjudican el libre tránsito vehicular, por tal razón, surge la inquietud de emprender iniciativas de edificación de redes viales que satisfagan los umbrales fundamentales establecidos por la normativa nacional vigente. De igual manera, emerge la exigencia de optimizar las características físicas y mecánicas de los terrenos arcillosos, con el fin de emplearlos como subrasante, garantizando así el cumplimiento de los criterios de seguridad y excelencia que se exigen en los preceptos regulatorios.

Por otra parte, el vidrio representa una parte importante de los residuos sólidos, lo que es muy preocupante porque todo esto termina en los botaderos, causa problemas ambientales y afectando directamente a la salud de la naturaleza y de los entes orgánicos. Es por este motivo que se lleva a cabo una indagación para establecer si el polvo proveniente del cristal incrementa la capacidad de soporte de los terrenos arcillosos y podría ser empleado como aditivo estabilizante, otorgándoles un incremento en su valía a los residuos de vidrio.

Formulación del problema

La dificultad que exhiben los terrenos arcillosos de la vía Caminos del Inca, en la demarcación de Aychahuacso, dentro de la jurisdicción de Tamburco, es la baja capacidad de soporte en relación al CBR % y la susceptibilidad a cambios volumétricos, estos son algunos factores a tener en cuenta para mejorar las características de un suelo arcilloso para hacerlo más adecuado y seguro para diversas aplicaciones en construcción de infraestructuras viales.

Problema general

- ¿Cuál es la influencia de la adición del vidrio reciclado en la capacidad de soporte de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023?

Problemas Específicos

- ¿Cuál es la influencia de la adición de vidrio reciclado en la plasticidad de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023?
- ¿Cuál es la influencia de la adición de vidrio reciclado en la máxima densidad seca de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023?
- ¿Cuál es la influencia de la adición de vidrio reciclado en la relación de soporte de california de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco - Abancay 2023?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

- Analizar la influencia de la adición del vidrio reciclado en la capacidad de soporte de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023.

2.2.2. Objetivos Específicos

- **O.E 1:** Determinar la influencia de la adición de vidrio reciclado en la plasticidad de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023.

- **O.E 2:** Evaluar la influencia de la adición de vidrio reciclado en la máxima densidad seca de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023.
- **O.E 3:** Evaluar la influencia de la adición de vidrio reciclado en la relación de soporte de california de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023.

2.3. Justificación e importancia

La presente tesis se justifica porque se pretende promover la implementación de nuevas alternativas de solución, para reemplazar a los compuestos convencionales empleados en el mejoramiento de la capacidad de soporte de bases arcillosas.

Además, mediante la integración de cristal reciclado y experimentaciones en laboratorio, será posible determinar si contribuye en la mejoría de las propiedades físicas y mecánicas que afectan la aptitud de carga del suelo arcilloso en la subrasante, con el fin de asegurar una base de cimentación idónea y conforme a los requisitos de calidad que se estipulan en la Norma CE 010 y el compendio del MTC.

Adicionalmente, la incorporación de restos de vidrio reciclado provenientes de vertederos, en sustitución de compuestos convencionales como la cal y el cemento para la consolidación de bases arcillosas, atrae el interés debido a que se trata de una indagación vanguardista que persigue el empleo de desechos sólidos con el fin de optimizar la resistencia del suelo y aminorar el hundimiento que pudiera comprometer gravemente la integridad de las infraestructuras viales.

2.4. Hipótesis

Hipótesis general

- La adición de vidrio reciclado influye en la capacidad de soporte de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023.

Hipótesis especificas

- **H1:** La adición de vidrio reciclado influye en la plasticidad de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023.
- **H2:** La adición de vidrio reciclado influye en la máxima densidad Seca de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023.
- **H3:** La adición de vidrio reciclado influye en la relación de soporte de california de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023.

2.5. Variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición	Instrumento
V. Independiente Vidrio Reciclado	El vidrio es una sustancia amorfa, transparente y dura compuesto principalmente de Álcalis y Silicatos fusionados a altas temperaturas. Además, el vidrio es un elemento quebradizo que se puede reciclar en su totalidad (Pearson, 2009).	Se adicionará polvo de vidrio en distintos porcentajes en relación al peso seco del suelo	Dosificación	7% 11% 15% 20%	Razón	Fichas de recolección de datos de laboratorio
V. Dependiente Capacidad de soporte de suelos arcillosos	La capacidad de soporte es la resistencia que presenta un suelo de subrasante, para el diseño de pavimentos. (RNE, 2020)	Se obtendrán los valores realizando ensayos de laboratorios y utilizando ecuaciones en base a las propiedades físicas y mecánicas del suelo natural y mejorado.	Propiedades físicas	Plasticidad	Razón	Fichas de recolección de datos de laboratorio
			Propiedades mecánicas	Proctor Modificado	Razón	Fichas de recolección de datos de laboratorio
				Relación de Soporte de California (CBR)	Razón	Fichas de recolección de datos de laboratorio

Nota. Elaboración propia.

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

Yaghoubi et al. (2021) en su investigación se mezcló un tipo de arcilla expansiva de alta plasticidad con 10%, 20% y 30% de vidrio reciclado como tratamiento del suelo, después se realizaron trabajos experimentales, modelación numérica y análisis del desempeño del pavimento. Tras haberse establecido las cualidades físicas de la arcilla y del cristal reutilizado, a través de un protocolo experimental se precisaron las particularidades del índice de resiliencia de la arcilla y las tres combinaciones de arcilla con vidrio reciclado. Como consecuencia de esta investigación, la reducción de la deformación mostro un aumento significativo en la vida a fatiga y la vida a huellada de los pavimentos fundados sobre subrasantes de arcillas tratadas con vidrio reciclado.

Blayi et al. (2020) en su indagación indica que el vidrio reciclado utilizado en esta indagación fue triturado y fusionado en proporciones de 2.5%, 5%, 10%, 15% y 25% con respecto al peso seco de la tierra. Se efectuaron las pruebas con el propósito de establecer los umbrales de Atterberg, análisis de densificación, expansión libre, tenacidad compresiva y el soporte de corte, y el índice CBR. Se arribó a la conclusión de que la fracción ideal para optimizar la subrasante consiste en un 15% de vidrio reutilizado, lo cual provoca una disminución del grosor de la subbase en un 63%.

Baldovino et al. (2021) en su indagación precisa que los residuos de vidrio reciclado tienen un uso prometedor en el mejoramiento de suelos para usarlo en remplazo de conglomerantes como el cemento y la cal viva. En el estudio se examinó la proporción de polvo de cristal recuperado en la reacción del terreno, evaluando la fortaleza a la compresión, tensión y la persistencia ante la humedad. Para tales experimentos, se incorporaron 5%, 15% y 30% de cristal reciclado y 5% de cal, en proporción al peso. Los hallazgos sugirieron un incremento en la microestructura y las cualidades mecánicas de la mezcla de tierra comprimida.

Aaqib y Chakraborty (2020) en su indagación, cuyo cometido radica en afianzar la firmeza del suelo mediante la implementación de esquirlas cristalinas reutilizadas y atenuar la inmundicia atmosférica, se incorporó polvillo vítreo reciclado en fracciones de 2%, 4%, 6%, 8% y 10% en relación con el peso árido del terreno para precisar la dosificación óptima. Se constata que el umbral licuante y el umbral maleable menguaron de 49.52% a 33.9% y de 28% a 18.4%, respectivamente, mientras que la Magnitud de Plasticidad decayó en todas las cuantías de vidrio micronizado, registrando una merma del 28% para la dosificación del 10%. La máxima densificación árida del suelo se incrementó de manera sostenida hasta el 8%, la saturación hídrica idónea disminuyó en un 67% para el 10% de partículas cristalinas; el CBR en estados áridos y saturados ascendió marcadamente conforme se intensificaba la carga de fragmentos silíceos, evidenciando un auge de 9.70 y 6.70 veces, respectivamente. La resistencia a la compresión no restringida se expandió de 63.2 KN/m² a 133.5 KN/m² con la adición de vidrio desmenuzado hasta un 8%, la cohesión y la inclinación del rozamiento intrínseco se elevaron progresivamente con la inclusión de polvillo cristalino, oscilando de 42.7 KN/m² a 106.4 KN/m² y de 27.4° a 43.5° respectivamente. Con estos hallazgos, la investigación concluye que la fracción idónea de residuo vítreo reciclado para el perfeccionamiento del subsuelo es del 8%.

Siyab et al. (2018) en su indagación cuyo propósito es escrutar los impactos del empleo de fragmentos de cristal en la optimización de las características geotécnicas del terreno, establece que la densidad seca máxima del terreno incrementó De manera paulatina hasta un 8% de fragmentos vítreos, tras lo cual se estabiliza invariablemente hasta una dosificación del 12%; el umbral licuante, el umbral maleable y la magnitud de plasticidad decrecieron a medida que se acrecentó la carga de esquirlas cristalinas, registrando sus cotas mínimas en el 12% de partículas silíceas; la inclinación de fricción del sustrato se incrementa hasta un cénit con un 8% de polvo vítreo, para luego descender; el CBR (índice de resistencia californiana) del

terreno se acrecienta proporcionalmente con la incorporación de cristal micronizado. La fluctuación en la proporción de CBR se elevó un 11.56%, 8.97% y 5.98% con una composición de 4%, 8% y 12% de residuo vítreo, respectivamente.

Samaniego (2021) en su disertación nos expone que la meta primordial consistió en analizar el impacto del cristal reciclado en la estabilización de las capas inferiores de terrenos arcillosos. La modalidad de investigación fue aplicada, con un diseño cuasi experimental y un enfoque cuantitativo, en el cual se efectuaron ensayos de clasificación granulométrica, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR, incorporando vidrio reciclado molido en proporciones del 4%, 7% y 11%. Entre los hallazgos, se determinó que al emplear un 7% de vidrio reciclado pulverizado, el Índice Plástico se mejoró del 27% al 24%. La densidad seca máxima aumentó con la inclusión de un 4% de vidrio reciclado pulverizado, de 1.78 gr/cm³ a 2.01 gr/cm³. El valor del CBR al 95% ascendió del 5% al 6.3%, y al 100% subió de 5.92% a 7.52% con la adición del 11% de vidrio reciclado, siendo este último el porcentaje más ventajoso. Concluye que, al incorporar vidrio reciclado pulverizado, se puede certificar que dicho material potenció las características de la subrasante.

Espinoza y Santimperi (2021) en su disertación, nos revela que la meta primordial consistió en evaluar el empleo de cristal reciclado con el fin de potenciar la solidificación de terrenos arcillosos de escasa maleabilidad. Este estudio se catalogó como aplicado, con un enfoque cuantitativo y diseño pre experimental. Para la ejecución de esta evaluación, se integraron 4%, 6% y 8% de vidrio reutilizado, estimado conforme a la masa árida del sustrato analizado. Las averiguaciones obtenidas fueron: una compacidad álgida en estado exánime de 1.91 gr/cm³, 1.92 gr/cm³ y 1.93 gr/cm³, parámetros idóneos de saturación de 13.5%, 11.62% y 10.71%, y coeficientes de CBR al 95% de 8.80%, 10.5% y 13.03 tras añadir 4%, 6% y 8% de vidrio reciclado micronizado, respectivamente. Llega a la conclusión de que la proporción idónea del 8% de cristal fragmentado es la más propicia para la consolidación de terrenos

argilosos, menguando su plasticidad, intensificando la compacidad cúspide en estado exánime y optimizando la aptitud de soporte del suelo.

Haro (2021) en su disertación, donde el propósito primordial fue determinar el impacto de la incorporación de cristal reciclado en terrenos arenosos, esta indagatoria se clasificó como aplicada, con un enfoque cuantitativo y una estructura experimental. Para dicho estudio, se utilizaron proporciones de 0%, 6% y 8% de cristal reciclado en relación con la muestra de suelo. Los resultados obtenidos revelaron valores promedio de densidad máxima en estado seco de 1.936 gr/cm³, 1.951 gr/cm³ y 1.946 gr/cm³, así como valores promedio de CBR al 95% de 18.24%, 28.46% y 25.78%. La conclusión del análisis es que la adición de un 6% de cristal reciclado constituye la dosis ideal para la estabilización de terrenos arenosos, incrementando el valor del CBR al 95% en más de un 50% respecto a su valor inicial.

Soberon (2022) en su disertación, cuyo fin primordial es establecer la proporción y magnitud idónea de cristal pulverizado para optimizar subrasantes con el propósito de pavimentación urbana. Esta indagación fue de índole experimental, de nivel correlativo y con un enfoque cuantitativo, en el que se ejecutaron pruebas de clasificación granulométrica mediante cribado y medición hidrométrica, así como los límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR, y se evaluaron porcentajes de cristal del 3%, 6%, 9% y 14% respecto al peso seco del suelo con distribuciones de partículas de 75 y 300 micrómetros. Los hallazgos obtenidos en esta pesquisa para una partícula de menos de 75 micrómetros indicaron que el valor del Índice de plasticidad disminuyó de un 17.8% a un 14.7% con la incorporación del 6% de cristal, el contenido más favorable de humedad descendió de un 14.95% a un 10.35%, la densidad seca máxima se incrementó de 1.756 gramos por centímetro cúbico a 1.835 gramos por centímetro cúbico, y los índices para el CBR al 95% se elevaron notablemente de un 3.80% a un 12.20% con la incorporación de un 14% de cristal, reduciendo asimismo su expansión de un 0.20% a un 0.06% con el agregado de un 9% de vidrio. Se concluyó que la inclusión de

cristal mejora las características físicas y mecánicas de los suelos arcillosos; además, el 14% de cristal es el porcentaje más adecuado para alcanzar la densidad seca óptima y para el CBR, mientras que, en cuanto a los límites de consistencia, el porcentaje más efectivo fue el 6% de vidrio. Finalmente, se establece que la estabilización del terreno con vidrio reciclado resulta más rentable que con otros aditivos como el cemento o la cal.

Pajuelo y Rivera (2022) en su indagación, cuyo fin es corroborar si el polvo vítreo reutilizado potencia los atributos estructurales y de solidez del estrato arcilloso mediante la consolidación del sustrato, esta indagación fue de tipo aplicada y con una estructura experimental, en dicha pesquisa se empleó una proporción de polvo de cristal reciclado de 20% y 30% en comparación al peso seco de la muestra de suelo. Los hallazgos obtenidos tras ejecutar las evaluaciones de umbrales de cohesión, el test Proctor modificado y el CBR con la inclusión de fragmentos silíceos revelaron que el Índice de Plasticidad disminuyó de 11.33% a 4.53%, la humedad ideal decreció de 10.01% a 8.12%, la compactación árida máxima se elevó de 2.212 g/cm³ a 2.848 g/cm³ y la CBR aumentó de 1.57% a 2.68% con la integración del 20% de vidrio. Se concluye que se lograron optimizaciones en las cualidades físicas y mecanicas del suelo, obteniendo registros favorables.

Galvez (2023) en su disertación, cuyo fin fue determinar el impacto del cristal molido en la consolidación de terraplenes arenosos, este estudio adoptó un enfoque experimental. En el transcurso de esta indagación, se utilizaron proporciones de cristal molido de 5%, 7%, 9% y 11% en seis muestras de terreno. Entre los hallazgos obtenidos, se observaron valores de la Densidad Máxima Seco (D.M.S) de 1.90 g/cm³ en el suelo virgen y de 1.92 g/cm³, 1.95 g/cm³, 1.98 g/cm³ y 1.96 g/cm³ con la adición del cristal. Los índices del CBR al 95% de la D.M.S revelaron valores de 7.68% en el suelo sin modificar y de 8.03%, 8.58%, 9.32% y 9.08% con la incorporación del cristal. Se llega a la conclusión de que la proporción más adecuada para la estabilización de terrenos arenosos fue el 9% de cristal pulverizado.

Bonifacio (2023) en su disertación, cuyo fin fue esclarecer si la inclusión de fragmentos de cristal triturado conlleva una mejora en las propiedades físicas y mecánicas de los terraplenes arcillosos, esta investigación adoptó un enfoque experimental, de índole cuantitativa y con una estructura explicativa. En dicho análisis, se llevaron a cabo pruebas de granulometría mediante tamizado, determinación de límites de Atterberg, ensayo Proctor modificado, CBR y se evaluaron proporciones de cristal triturado de 8%, 12% y 16%. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: los valores del Índice de Plasticidad se redujeron de 42.61% a 35.57% con la adición de 16% de cristal triturado, el contenido óptimo de humedad aumentó de manera leve de 17.75% a 19.98% con el 12% de cristal, la densidad máxima seca experimentó una disminución promedio de 1.723 g/cm³ a 1.668 g/cm³, y la capacidad de carga creció de 3.01% a 4.88% al incorporar el 12% de cristal triturado. Se concluye que la inclusión de vidrio triturado mejora de forma significativa la resistencia de los suelos arcillosos.

Zambrano (2022) en su disertación, cuyo fin primordial es optimizar las características de expansión, compactación seca y modificar las propiedades plásticas mediante la incorporación de 5%, 10%, 15% de Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) y 5%, 10%, 15% de CBCA combinado con NaOH. Este estudio se clasificó como aplicado, de nivel explicativo y con un diseño experimental. A lo largo del escrutinio, se identificaron los siguientes resultados: al integrar RCBSO junto con NaOH, se constató un acrecentamiento notable en las cifras del CBR en contraste con la mera adición de RCBSO al sustrato arcilloso. A modo de ilustración, con la inclusión del 10% de RCBSO se consignó un valor de 10.37%, mientras que con la combinación del 5% de RCBSO y NaOH, el CBR ascendió hasta un 15.5%, rebasando ampliamente los estándares mínimos requeridos para la aplicabilidad del material en capas de cimentación. Se concluyó que la sinergia entre el Residuo Calcáreo de Bagazo de Saccharum Officinarum y el Reactivo Alcalino incide desfavorablemente en la densidad

árida máxima, pero ejerce una repercusión benéfica en los índices de CBR, plasticidad y expansión.

Chipana (2023) en su disertación, el propósito primordial consistió en identificar las características geotécnicas y la resistencia a la fuerza cortante del terreno al incorporar cal y cemento en proporciones del 6%, 12% y 18% respecto al peso seco de la muestra de suelo. Este estudio fue de índole aplicada, con un alcance correlacional y un enfoque experimental. Los escrutinios fueron efectuados de manera independiente para cada agente estabilizador. La adición del 18% de tales compuestos evidenció los efectos más sobresalientes, potenciando la capacidad de sustentación en un 146.02% con la inclusión del aglutinante y un 116.81% con la integración de cal viva. Al incorporar el 12% y 18% de ambos elementos, las cualidades de firmeza ante la solicitación cortante se acrecentaron, registrando magnitudes de 0.20 kg/cm² y 0.22 kg/cm², respectivamente. No obstante, con la agregación del 6%, dichas cifras menguaron de 0.17 kg/cm² a 0.09 kg/cm². En lo que respecta al ángulo de rozamiento interno, se observó un ascenso desde 25.08° hasta 33.42°, 33.49° y 33.62° en progresión gradual. Se deduce que se constató un ensalzamiento significativo en el ángulo de fricción y la trabazón interna, así como un incremento sustancial en la aptitud portante, la cual se duplicó mediante la incorporación de los estabilizadores mencionados. El porcentaje óptimo para mejorar la capacidad portante resultó ser el 18% de aditivos. No obstante, se observó que la incorporación de cemento produjo un incremento más significativo en la capacidad portante en comparación con el uso de cal.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Vidrio Reciclado

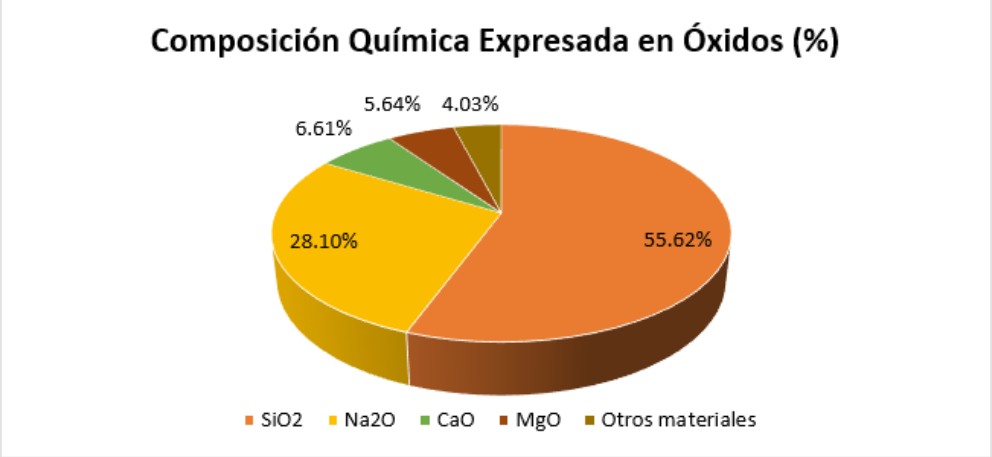
El cristal es un elemento frágil que puede reinsertarse completamente sin desperdiciarse nada, el rehúso de este material favorece tanto al entorno natural como a la especie humana. Adicionalmente, se le puede conferir un plus a los desechos de cristal

utilizándolos como aditivo en las construcciones, como por ejemplo en la elaboración de compuestos de concreto, piezas de mampostería, en el mejoramiento de suelos y en otras utilizaciones (Carrasco, 2017).

El cristal de tipo Sódico Cálcico es el más comercial, el de mayor difusión, el de menor costo, y se emplea primordialmente en la fabricación de recipientes, ventanas, en la esfera constructiva y en la manufactura de vehículos. La cualidad más sobresaliente de este cristal es su aptitud para la transmisión de luz (Pearson, 2009). El compuesto vítreo empleado en esta pesquisa está constituido en un 55.62% por (SiO_2), un 28.10% de (Na_2O), un 6.61% de (CaO), un 5.64% de (MgO) y un 4.03% de otros elementos, conforme a lo expuesto en la gráfica 1 y la tabla 2. Para la determinación de estos valores, se realizó un escrutinio a través de la técnica de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva. En el cuadro 3 se consignan las propiedades fundamentales, tanto físicas como mecánicas, del material vidrioso analizado.

Figura 1

Composición química del vidrio reciclado



Nota. En la figura 1 se muestra el porcentaje de los principales componentes de vidrio reciclado utilizado en la presente tesis. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2

Composición Química del polvo de vidrio

Composición Química	Resultados (%)	Método Utilizado
Silicio (SiO2)	55.620	Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva
Sodio (Na2O)	28.101	
Calcio (CaO)	6.612	
Magnesio (MgO)	5.642	
Aluminio (Al2O3)	2.549	
Azufre (SO3)	0.787	
Hierro (Fe2O3)	0.438	
Potasio (K2O)	0.184	
Fósforo (P2O5)	0.054	
Zirconio (ZrO2)	0.014	

Nota. En la tabla 2 se exhibe la constitución química del polvo vítreo expresada en términos de óxidos, elaborada en el laboratorio LABICER UNI (2024).

Tabla 3

Propiedades del vidrio sodo cálcico

Principales propiedades del vidrio sodo cálcico	
Propiedades Físicas	
Densidad	Por cada mm de grosor, 2,5 kg/m3.
Punto de ablandamiento	Aproximadamente 730°C.
Conductividad térmica	1.05 W/mk
Coeficiente de dilatación lineal	Es 9 x 10-6 /ºC para el vidrio (entre 20 y 220ºC).
Dureza	Escala Mohs 6 a 7, Escala Knoop (kg/mm2) 575
Propiedades Mecánicas	
Soporte traccional	Fluctúa entre 300 y 700 kg/cm2, En caso de que la carga sea constante, la resistencia a la tracción se reduce.
Soporte compresivo	Aprox. 10.000 kg/cm2.

Nota. La tabla 3 nos muestra los elementales atributos físico-mecánicos del tipo de vidrio utilizado en esta tesis. Adaptado de (Pearson, 2009).

3.2.2. Capacidad de soporte de los suelos

Este hace referencia al esfuerzo vertical transmitido por la estructura del pavimento que puede resistir un terreno sin asentarse (Chavez y Odar, 2019). Por tal motivo surge la imperiosa necesidad de consolidar los terrenos a nivel de subrasante con el fin de optimizar su plasticidad y aptitud para sustentar cargas, al no alcanzar los estándares exigidos por las normativas vigentes.

La consolidación de terrenos se fundamenta en incrementar la fortaleza estructural y asegurar que estas propiedades perduren con el paso del tiempo, con el propósito de hacer el terreno más competente para soportar cargas y condiciones de tránsito. Este procedimiento se lleva a cabo, por lo común, en terrenos cuyas subrasantes son clasificadas como inadecuadas o deficientes en cuanto a su capacidad portante (CBR). Existen diversos enfoques de estabilización, entre estos métodos se incluyen la permuta de los niveles de subyacente, la amalgama de terrenos, la consolidación a través de procedimientos mecánicos, químicos o mediante la implementación de geopolímeros. No obstante, dicha estabilización debe ser sometida a ensayos laboratoriales que corroboren el rendimiento de los segmentos edificados; del mismo modo, es imprescindible garantizar que la ejecución y conservación de las infraestructuras viales se efectúe de forma asequible, expedita y con la utilización óptima de los insumos disponibles (MTC, 2014).

Criterios Geotécnicos para establecer la estabilización de suelos

Se especifican 6 criterios en el MTC para la estabilización de suelos los cuales se mencionan a continuación:

- Los terrenos con un CBR ≥ 6% son clasificados como materiales idóneos para capas subyacentes. Si dicho valor resulta ser inferior, será necesario proceder con la consolidación del terreno, ya sea a través de técnicas mecánicas, con aditivos o

mediante el uso de geosintéticos. A continuación, en la tabla N°4, se presenta la caracterización de los suelos conforme a su capacidad portante CBR.

Tabla 4

Caracterización de suelos según su Capacidad de Soporte CBR.

categoría de sub rasante	CBR
S0-Subrasante inadecuada	CBR < 3 %
S1-Subrasante insuficiente	CBR ≥ 3 % a CBR < 6 %
S2-Subrasante regular	CBR ≥ 6 % a CBR < 10 %
S3-Subrasante buena	CBR ≥ 10 % a CBR < 20 %
S4-Subrasante muy buena	CBR ≥ 20 % a CBR < 30 %

Nota. La tabla 4 muestra la calidad de las capas subyacentes conforme a los valores de CBR. Adaptado del (MTC, 2014).

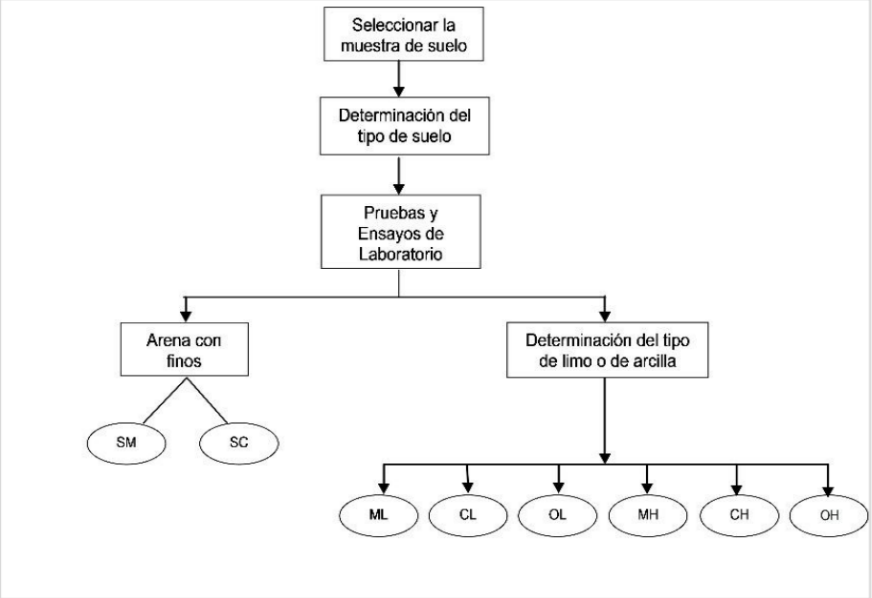
- En el supuesto de que la estratificación inferior del terreno sea limosa o arcillosa y, al mojarse, las diminutas partículas de dicho compuesto logren penetrar las estratas de material granular del pavimento, alterándolas y degradándolas.
- La capa inferior del terreno deberá ubicarse sobre la primitiva, al menos a 0.60 metros cuando se trate de un compuesto de calidad excelente, 0.80 metros en el caso de materiales de buena a media calidad, y entre 1.00 y 1.20 metros para compuestos deficientes e inapropiados, según corresponda.
- Se examinará la influencia de las heladas en las zonas elevadas a 4,000 msnm. Es crucial tomar en cuenta que si la profundidad del acuífero supera los 1.20 metros, el fenómeno de congelamiento no afectará la capa superficial del sustrato. No obstante, si la capa superior del sustrato está ubicada dentro de los últimos 0.60 metros, el grosor

del terreno impactado será sustituido o la elevación del terreno será ajustada con un relleno granular adecuado, hasta conseguir la cota exigida.

- Es imprescindible identificar el tipo de terreno presente para definir el método de estabilización más adecuado.

Figura 2

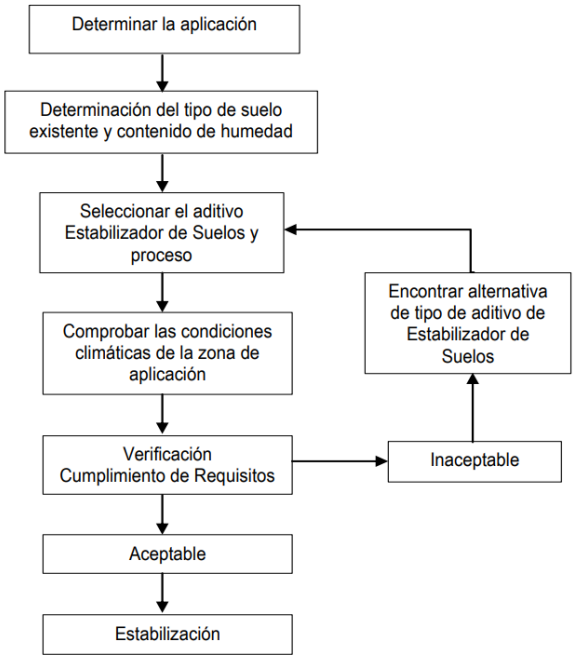
Pasos para la identificación del Tipo de Suelo



Nota. En la figura 2 se muestra el esquema del proceso para elegir el enfoque más idóneo de estabilización del suelo. Adaptado del (MTC, 2014, p.90).

Figura 3

Proceso de selección del tipo de estabilización



Nota. En la figura 3 se muestra el esquema de los pasos a seguir para la selección del tipo de estabilización. Adaptado del (MTC, 2014, p.91).

3.2.3. Propiedades Físicas de los suelos

Estas aluden a los atributos perceptibles y cuantificables que no conllevan alteraciones en su estructura interna, tales cualidades reflejan la conducta y disposición del terreno sin modificar su esencia. Estas propiedades se emplean para detallar y categorizar los suelos, siendo fundamentales para entender su comportamiento bajo diversas circunstancias.

3.2.3.1. Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado

El escrutinio granulométrico se constituye como la disposición de las dimensiones inherentes a una porción de suelo a través del proceso de tamizado conforme a las directrices normativas estipuladas en la directiva MTC E107. El propósito de la valoración fraccionaria de una porción del terreno radica en determinar la disposición dimensional de los fragmentos

contenidos en una muestra de suelo, para posteriormente ser clasificados de acuerdo a su medida, como se ilustra subsiguientemente.

Tabla 5

Clasificación de Suelos según Tamaño de Partículas.

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

Nota. En la tabla 5 nos muestra la clasificación de suelos en relación al tamaño de partículas. Adaptado del (MTC, 2014).

En la normativa (MTC E107) se detalla el proceso para precisar las magnitudes de tierra que atraviesan las diversas mallas, alcanzando hasta la malla N° 200 (75 µm).

Dispositivos a Emplear:

- Un par de balanzas. Una con precisión de 0.01 g y la otra con exactitud de 0.1% respecto al peso de la sustancia.
- Un horno, diseñado para mantener temperaturas uniformes, alcanzando 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F).

Materiales a Utilizar:

- Tamices con aberturas mostradas subsecuentemente.

Tabla 6

Cuadro de aberturas de tamices

Tamices	Abertura (mm)
3"	75.000
2"	50.800
1 1/2"	38.100
1"	25.400
3/4"	19.000
3/8"	9.500
N° 4	4.760
N° 10	2.000
N° 20	0.840
N° 40	0.425
N° 60	0.260
N° 140	0.106
N° 200	0.075

Nota. En la tabla 6 nos muestra las aberturas de los tamices a tener en consideración al ejecutar el test de análisis granulométrico. Adaptado del (MTC, 2016).

Recipientes, brocha y cepillos.

Muestra

- Conformemente a las características de los elementos granulados de escasa dimensión, la indagación mediante mallas se ejecuta con la totalidad del espécimen o con una fracción posterior a la segregación de los elementos minúsculos por medio de un proceso de enjuague.
- Consiste en dos componentes, uno que se conserva en el colador número 4 y otro que se filtra a través de dicho artefacto. Ambas fracciones serán analizadas de forma aislada.
- El espécimen de suelo debe ser deshidratado de manera natural en la atmósfera y seleccionado para el ensayo experimental.

- La fracción del espécimen que queda retenida en el tamiz número 4 será determinada según las dimensiones máximas de las partículas de la tierra conforme a la tabla subsecuente.

Tabla 7

Determinación del peso de la muestra en función al tamaño máximo de partículas

Diámetro nominal de las partículas más grandes mm (pulg)	Peso mínimo aproximado de la porción (g)
9.5 (3/8")	500
19.6 (3/4")	1000
25.7 (1")	2000
37.5 (1 1/2")	3000
50.0 (2")	4000
75.0 (3")	5000

Nota. En la tabla 7 se visualiza el peso mínimo aproximado a tener en cuenta al momento de realizar en ensayo granulométrico. Adaptado del (MTC, 2016).

- La masa estimada del componente que atraviesa la malla número 4 será de 65 gramos para los compuestos arcillosos y limosos, y de 115 gramos para los suelos predominantemente arenosos.

Método para el Análisis de la Distribución Granulométrica:

- Se utilizan las mallas de 3 pul, 2 pul, 1½ pul, 1 pul, ¾ de pul, 3/8 de pul y la malla número 4 para la magnitud muestral que queda (número 4).
- Al efectuar el tamizado manual, la malla o mallas se desplazan en un movimiento oscilante circular. Posteriormente, tras realizar este proceso, es imperativo corroborar, al desmontar las mallas, que la operación haya sido completada. En caso de que se encuentren partículas atrapadas en las aberturas, estas deberán ser liberadas

mediante el uso de un instrumento de cerdas como un cepillo o brocha, y se deben clasificar como retenidas en la malla correspondiente.

- Para el tamizado mecánico, se utilizará la máquina de tamizado, la cual se activará durante aproximadamente diez minutos, tras lo cual se llevará a cabo una verificación manual del proceso.
- La cuantía segmentada de cada retícula será establecida mediante una balanza de altísima exactitud (susceptibilidad de 0.1%), y la sumatoria de todas las particiones no podrá apartarse en más de un 1%.
- Para la subdivisión minúscula del terreno que atraviese la retícula número 4, se aislará una fracción de cerca de 65 gramos para limos y caolines, y 115 gramos para sustratos granulosos, utilizando una balanza con meticulosidad de 0.01 gramos.
- Después de efectuar la ablución sobre la retícula número 200 y deshidratar la muestra, se ejecutará la criba.

Cálculos

- Para precisar la proporción de espécimen que atraviesa la malla número 200, se emplea la siguiente fórmula.

$$\% \text{ Pasa } 0{,}074 = \frac{\text{Peso Total} - \text{Peso retenido en el tamiz de } 0{,}074}{\text{Peso Total}} x100$$

- Para el cálculo del porciento de la muestra de cada tamiz se utiliza expresión.

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso Retenido en el Tamiz}}{\text{Peso Total}} x100$$

- Para el cálculo del porciento de muestra más fino se utiliza la expresión.

$$\% \text{ Pasa} = 100 - \% \text{ Retenido Acumulado}$$

3.2.3.2. Clasificación de Suelos

Se han instaurado dos esquemas primordiales para la tipificación de terrenos, el mecanismo AASHTO y el SUCS (Montejo, 2002).

Clasificación Unificada de los Suelos (SUCS).

Este procedimiento fue sugerido por Arthur Casagrande, en el que los terrenos se clasifican en suelos de partículas gruesas, finas y orgánicas.

Si los elementos del terreno quedan resguardados en el tamiz N° 200 en más del 50%, se les etiqueta como terrenos gruesos, mientras que, si atraviesan más del 50% de dicha malla, se consideran suelos finos. Los tipos de suelos se identifican mediante símbolos de grupo y cada grupo incluye un prefijo que representa las primeras letras de los nombres en inglés y un sufijo que señala las subdivisiones de estos grupos.

Suelos Gruesos

Si el tamiz N°4 retiene más del 50% de la fracción macroscópica de las partículas del terreno, se clasificarán como gravillas (G), de lo contrario, serán etiquetados como areniscas (S). Estos suelos se agrupan en cuatro divisiones. (GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM y SC).

Gravas

- Si la fracción de partículas finas es inferior al 5%, y el Cc oscila entre 1 y 3, mientras que el Cu excede 4, entonces la grava puede ser clasificada como grava de excelente gradación (GW), y si no se ajusta a estos parámetros, será considerada grava de mala gradación (GP).
- Si la fracción de partículas finas en la grava supera el 12%, la grava podría ser clasificada como GC o GM.
- Si la proporción de partículas en la grava está entre el 5% y el 12%, podría ser clasificada como GW-GC.

Arenas

- Si la porción de arena es inferior al 5% y cumple con los requisitos $1>C_C<3$ y $C_u>6$, entonces la arena puede ser bien gradada (SW), caso contrario será arena mal gradada (SP).
- Si la porción de partículas finas en la arena supera el 12 % la arena puede ser SC y SM.
- Si la porción de partículas finas en la arena esta entre el 5% y el 12 % se usa doble símbolo como SP-SM.

Para determinar los C_C y de C_u se utilizan las expresiones:

$$Cc=\frac{D30^2}{D10xD60}$$

$$Cu=\frac{D60}{D10}$$

Donde:

D60: Dimensión de la abertura que corresponde al 30% del porcentaje de partículas que atraviesan el material.

D30: Dimensión de la abertura asociada al 30% del porcentaje de partículas que pasan a través del suelo.

D10: Dimensión de la abertura correspondiente al 10% del porcentaje de partículas que atraviesan el terreno.

Suelos finos

Los substratos finos se segmentan en tres categorías: limos inorgánicos (M), arcillas orgánicas (C), y limos y arcillas orgánicas (O). Estos, a su vez, se fraccionan en dos subgrupos según el porcentaje del umbral de fluidez; si este umbral es superior al 50%, se incorpora la

letra L (Baja plasticidad), y si es inferior, se añade la letra H (Alta plasticidad). Así, se obtienen los siguientes tipos de suelos:

ML: Limos inorgánicos de baja compresibilidad.

OL: Limos y arcillas orgánicas de baja compresibilidad.

CL: Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.

CH: Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.

MH: Limos orgánicos de alta compresibilidad.

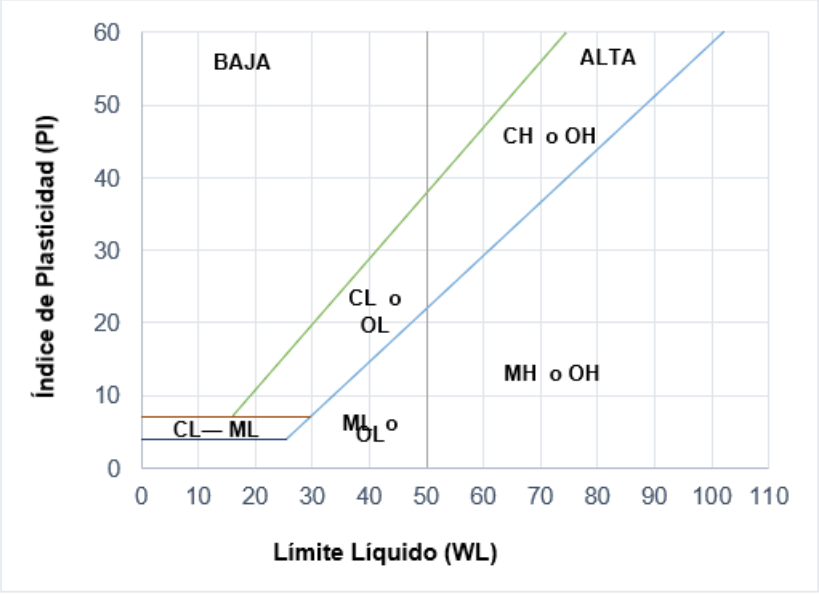
OH: Arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad.

Los substratos orgánicos se designan con la sigla Pt.

La clasificación de los suelos finos se lleva a cabo a través de la siguiente tabla de plasticidad:

Figura 4

Abaco de la carta de plasticidad



Nota. Adaptado de la gráfica de plasticidad (Braja M. Das, 2015, p.84).

Clasificación de suelos AASHTO.

En esta estructura, los terrenos se segmentan en ocho divisiones, identificadas con los símbolos del A1 al A8; los substratos se fraccionan en siete categorías desde el A1 hasta el A7, que a su vez se subdividen en doce subdivisiones, mientras que los terrenos con elevado contenido de material se etiquetan como A-8.

Suelos Granulares

Los terrenos que albergan un 35% o menos de elementos que atraviesan el tamiz N°200 y están constituidos por las categorías A-1, A-2 y A-3.

Categoría A-1.- Esta categoría incluye mezclas bien graduadas, formadas por fragmentos de rocas, gravas, arenas y aglomerantes de escasa plasticidad, también se integran mezclas bien graduadas que carecen de aglomerante.

Subcategoría A-1a.- Integrada predominantemente por elementos de piedra y grava, con aglomerante bien gradada.

Subcategoría A-1b.- Formada por un material que prevalece con arena gruesa bien gradada, con o sin aglomerante.

Categoría A-2.- Compuesta por material granular que posee menos del 35% de componentes finos.

Subcategoría A-2-4 y A-2-5.- Se asignan a este subgrupo aquellos materiales cuyo porcentaje de partículas finas no supera el 35%, en las cuales la porción que atraviesa el tamiz N°40 exhibe atributos similares a los de los terrenos A-4 y A-5. Dentro de este subgrupo se incluyen los suelos compuestos por gravas y arenas que contienen limo, con índices de agrupación superiores a los del grupo A-1. También se incorporan las arenas de grano fino

con contenido de limo no plástico en cantidades que exceden los límites estipulados para el grupo A-3.

Subcategoría A-2-6 y A-2-7.- Este subgrupo agrupa las partículas de suelos que guardan similitudes con los anteriores, pero la fracción que pasa por el tamiz N°40 presenta características que corresponden a los suelos A-6 y A-7, respectivamente.

Categoría A-3.- En esta agrupación se encuentran los áridos finos con menguada proporción de limo y desprovistos de maleabilidad, junto con los sedimentos aluviales que contienen cantidades reducidas de grava y granulometría gruesa.

Suelos finos limo arcillosos

Incluyen los suelos cuya granulometría inferior al tamiz N°200 supera el 35% y están conformados por las categorías A-4, A-5, A-6 y A-7.

Categoría A-4.- Esta categoría abarca depósitos limosos de escasa o nula ductilidad, en los cuales al menos un 75% de las partículas trasponen la rejilla N°200. Asimismo, se contemplan compuestos de limo con áridos y fragmentos pétreos, con una proporción de hasta un 64%.

Categoría A-5.- Reúne sedimentos análogos a los previos, pero con la incorporación de elementos micáceos o diatomáceos, los cuales tienden a exhibir umbrales líquidos elevados.

Categoría A-6.- Incluye terrenos donde al menos un 75% de las partículas atraviesa la rejilla N°200. Son característicos de esta categoría los caolines altamente maleables. También se agregan las amalgamas de arcilla y arena con un contenido de fragmentos pétreos y áridos por debajo del 64%.

Categoría A-7.- Los estratos de este grupo son semejantes a los del A-6, pero muestran una elasticidad acentuada y presentan umbrales líquidos elevados.

Subcategoría A-7-5.- Este subgrupo comprende terrenos cuyo índice de plasticidad es moderadamente bajo en proporción a su umbral líquido.

Subcategoría A-7-6.- En este subgrupo se agrupan suelos cuyo índice de plasticidad es excepcionalmente alto en relación con sus umbrales líquidos.

Índice de grupo

La tipificación de un estrato dentro de un grupo específico se fundamenta en su umbral líquido, nivel de maleabilidad y proporción de sedimento sutil que atraviesa la rejilla N°200, siendo esta establecida mediante la siguiente fórmula:

$$IG=(F-35)[0.2+0.005(LL-40)]+0.01(F-15)(IP-10)$$

Donde:

IG: Índice de Grupo

F: Porcentaje del suelo que pasa la malla N°200, expresado en número entero.

LL: Límite Liquido

IP: Índice de plasticidad

Nota: El IG se expresa en un numero entero más cercano, en caso de ser negativo se reporta como 0.

3.2.3.3. Límites de Consistencia

Cuando una superficie terrosa compuesta por partículas finas se amalgama con una proporción desmesurada de líquido, tiene la capacidad de deslizarse como una sustancia semifluida. Si este terreno se deshidrata progresivamente, adoptará las características de una

substancia maleable, intermedia entre sólido y líquido, o completamente rígida, según la cantidad de humedad contenida. El coeficiente higrométrico donde el sustrato muta de un estado fluídico a uno dúctil se designa como lindero licuante (LL). De forma semejante, el coeficiente higrométrico en que el sustrato migra de un estado dúctil a uno transitorio o de este a uno endurecido se denomina lindero plastificante (LP). Tales cotas son identificadas como los Umbrales de Atterberg (Braja M, 2015).

Determinación del Límite Líquido (MTC E 110).

Es la tasa de impregnación acuosa, expresada en porcentaje, en la que el suelo alcanza el umbral que separa los estados licuado y maleable. De manera estandarizada, se estipula este coeficiente como el punto de saturación en el que la fractura delimitante de dos segmentos de una amalgama edáfica colapsa a lo largo de su base en una extensión de 13 milímetros (1/2 pulgada), cuando el receptáculo es descendido 25 veces desde una elevación de 1 centímetro, a un ritmo de dos impactos por segundo.

Instrumentos:

- Un receptáculo de porcelana con un diámetro aproximado de 115 milímetros.
- Copa de Casagrande.
- Herramienta ranuradora.
- Dispositivo calibrador con un grosor de 10,00 ± 0,2 milímetros.
- Contenedores fabricados con material resistente a la oxidación, con tapaderas herméticas.
- Balanza de precisión con sensibilidad de 0,01 gramos.
- Artefacto térmico con aptitud para sostener calores de 110±5°C destinado a la deshidratación del espécimen.

Elementos:

- Espátula de lámina flexible, con una longitud entre 75 y 100 milímetros y un ancho de 20 milímetros.

Muestra:

- Se precisa una magnitud notable de material mediante el procedimiento de cuarteo, utilizando entre 150 g y 200 g de material que haya pasado a través de un tamiz de 425 micrómetros (Nº 40).

Procedimiento de ensayo

- Colocar el espécimen edáfico en el receptáculo de Casagrande, aplicando compresión y extendiéndolo hasta lograr una hondura cercana a 10 milímetros en su sector más hondo, obteniendo una superficie nivelada, evitando la incorporación de vesículas gaseosas retenidas en la amalgama.
- Depositar el espécimen edáfico en el receptáculo de Casagrande, aplicando compresión y distribuyéndolo hasta obtener una profundidad cercana a 10 milímetros en su sector más hondo, asegurando una superficie homogénea y evitando la retención de vesículas gaseosas en la amalgama.
- Utilizando el implemento ranurador, seccionar la muestra terrígena contenida en el receptáculo de Casagrande, trazando un surco que enlace el punto más prominente con el más deprimido en el perímetro del contenedor.
- Alzar y rotar el receptáculo, operando el mecanismo de Casagrande a una frecuencia de 1,9 a 2,1 impactos por segundo, hasta que ambas secciones del suelo coaleszcan.
- Anotar la cantidad de percusiones requeridas para la completa obliteración de la hendidura.

- Ejecutar la evaluación con un mínimo de tres repeticiones, garantizando que la cantidad de impactos para el cierre de las divisiones en la primera prueba oscile entre 25 y 35, en la segunda entre 20 y 30, y en la tercera entre 15 y 25.
- Determinar la proporción de humedad empleando la ecuación subsiguiente.

$$w = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo seco al horno}} x100$$

Determinación del Límite Plástico (MTC E111)

Se denomina umbral plastificante a la saturación hídrica ínfima en la que es factible conformar filamentos terrígenos de aproximadamente 3,2 mm (1/8") de diámetro, manipulando dicha materia mediante fricción entre las yemas dactilares y una superficie lisa, sin que tales filamentos se fragmenten (MTC, 2016).

El experimento para la identificación del límite plástico, según lo delineó Atterberg, no precisa el calibre exacto que debe alcanzarse al crear el tubo deseado. Terzaghi incorporó el requisito de que el espesor sea de 3 mm. La gestación de los minúsculos conductos suele efectuarse sobre un pergamino absolutamente desprovisto de efluvios acuosos, con el propósito de agilizar la disipación hídrica del compuesto; asimismo, es frecuente que el arrollamiento se efectúe sobre un bloque vítreo. Una vez que los cilindros alcanzan los 3 mm, se pliegan y se compactan, configurando una tableta que se vuelve a enroscar, hasta que, al arribar a la magnitud precisa de 3 mm, acontece su fragmentación y resquebrajamiento; en ese punto, se calculará de inmediato su grado higrométrico, que constituye el umbral dúctil (Badillo y Rodríguez, 2005).

Instrumentos:

- Paleta de lámina flexible, con una extensión de entre 75 y 100 mm de longitud y un ancho de 20 mm.

- Vasija de porcelana o material afín, con un diámetro de 115 mm.
- Instrumento de pesaje, con precisión de 0,01 g.
- Cámara de calefacción, con control termostático ajustable a 110 ± 5 °C.
- Criba, con malla de 426 µm (N° 40).
- Agua purificada por destilación.
- Contenedores adecuados para la medición de contenidos hídricos.
- Cristal grueso y pulido al ácido.

Muestra

Se extraen cerca de 20 g de espécimen de tierra que ha atravesado la criba N°40, y se amasa con agua purificada hasta lograr que la mezcla sea moldeable, permitiendo la creación de una esfera con la pasta terrosa. Luego, se extraen alrededor de 1,5 a 2,0 g.

Procedimiento

- El espécimen se conforma en estructura elipsoidal y se arrolla entre los dígitos sobre una superficie lustrosa, ejerciendo la presión precisa para originar cilindros.
- Si el cilindro no se desmorona antes de alcanzar una envergadura de 3,2 mm, se reconfigura el elipsoide y se reitera el procedimiento tantas veces como sea menester hasta que colapse en torno a dicha magnitud.
- La fracción obtenida se traslada a los receptáculos previamente tarados y se determina su proporción de fluidez conforme a lo estipulado por la directriz MTC E108.
- El umbral dúctil se manifiesta como un % de saturación hídrica y se computa mediante la fórmula siguiente.

$$\text{Límite plástico} = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo secado al horno}} x100$$

Determinación del Índice de Plasticidad (MTC E111)

En la ciencia de la ingeniería civil y la geotecnia, el coeficiente de maleabilidad constituye una característica de los suelos que se emplea para ilustrar la capacidad de deformación plástica. Este se emplea para examinar la aptitud de un sustrato para alterar su configuración bajo la influencia de presión y humedad, lo cual resulta fundamental en el diseño de cimientos, calzadas y otras edificaciones.

El coeficiente de maleabilidad refleja la capacidad de plastificación del suelo. Los terrenos con un elevado índice de maleabilidad tienden a ser más adherentes y, al modificarse la humedad, pueden experimentar alteraciones volumétricas sustanciales. Por el contrario, los suelos con un bajo índice de maleabilidad muestran una menor cohesión y presentan una menor susceptibilidad a las fluctuaciones hídricas.

Cálculo del índice de plasticidad.

Se calcula con la siguiente expresión:

$$IP=LL-LP$$

Donde:

IP= Índice de Plasticidad.

LL= Límite Liquido (Numero entero)

PL= Límite Plástico (Numero entero)

3.2.4. Propiedades Mecánicas de los Suelos

Las características estructurales de un elemento exponen su reacción frente a fuerzas o cargas externas, así como su conducta en cuanto a deformación y resistencia, lo cual se denomina propiedades mecánicas. Estas características son esenciales para evaluar la

idoneidad de un material para aplicaciones particulares y para diseñar estructuras o componentes de manera segura y eficiente.

3.2.4.1. Ensayo de Compactación de Suelos (Proctor Modificado) MTC E 115.

Este ensayo viabiliza determinar la relación entre el tenor de humedad y la densidad específica anhidra de los suelos compactados en un receptáculo de 101,6 o 152,4 mm de calibre (4 o 6 pulgadas), empleando un pisón de 44,5 N que se desploma desde una cota de 457 mm. Se mencionan tres metodologías alternativas, las cuales se basan esencialmente en la distribución granulométrica del sustrato:

Técnica A

- Se utiliza el recipiente con un d de 101,6 mm (4 pulgadas).
- El elemento que se emplea es aquel que pasa a través de la malla N°4 (4,75 mm).
- Se realiza la compactación en 5 estratos.
- Se aplica un total de 25 impactos por capa.
- Este procedimiento se adopta cuando una quinta parte o menos de la masa del aglomerado queda contenida en la rejilla N°4 (4,75 mm).

Técnica B

- Se recurre a un receptáculo con un diámetro de 101,6 mm (4 pulg.).
- El componente seleccionado es el que atraviesa el tamiz de 9,5 mm (3/8 pulg.).
- La consolidación se ejecuta en cinco segmentos superpuestos.
- Se imprimen 25 percusiones por estrato.
- Esta táctica se implementa cuando más de una quinta parte de la masa del conglomerado permanece en la malla de 4,75 mm (N°4), pero una quinta parte o menos se conserva en la criba de 9,5 mm (3/8 pulg.).

Técnica C

- Se utiliza un receptáculo con un diámetro de 152,4 mm.
- El insumo empleado es el que logra franquear el tamiz de 19,0 mm (3/4 pulg.).
- El afianzamiento se lleva a cabo en cinco niveles superpuestos.
- Se administran 56 acometidas por estrato.
- Este mecanismo resulta idóneo cuando más de una quinta parte de la masa del agregado queda retenida en la malla de 9,5 mm (3/8 pulg.), y menos de tres décimas partes en la malla de 19,0 mm (3/4 pulg.).

Equipos

- Un contenedor de 4 pulg. que ostente un calibre intrínseco de aproximadamente 101,6 ± 0,4 mm (4,000 ± 0,016 pulg.), una altitud de 116,4 ± 0,5 mm (4,584 ± 0,018 pulg.) y una cubicación de 944 ± 14 cm^3 (0,0333 ± 0,0005 ft^3).
- Un receptáculo de 6 pulg. que exhiba un diámetro interno estimado de 152,4 ± 0,7 mm (6,000 ± 0,026 pulg.), una elevación de 116,4 ± 0,5 mm (4,584 ± 0,018 pulg.) y una cabida de 2 124 ± 25 cm^3 (0,075 ± 0,0009 ft^3).
- Un artefacto de percusión manual, el cual debe descender sin resistencia desde una cota de 457,2 ± 1,6 mm (18 ± 0,05 pulg.) sobre la muestra. La masa del percutor será de 4,54 ± 0,01 kg (10 ± 0,02 lbm), y su base de golpeo deberá ser plana y de perfil redondeado. El mazo será reemplazado si su área de impacto se erosiona o deforma hasta sobrepasar los 50,800 ± 0,25 mm (2,000 ± 0,01 pulg.).
- Un mecanismo de medición ponderal electrónico con una exactitud de 1 g.
- Un equipo térmico capacitado para sostener una temperatura uniforme de 110 ± 5 ºC.

Materiales

- Un artefacto métrico metálico, rígido, con un perfil achaflanado si su espesor supera los 3 mm, de extensión adecuada, pero jamás menor a 254 mm (10 pulg.). La dimensión total de dicho implemento deberá ajustarse a una tolerancia exacta de ± 0,1 mm (± 0,005 pulg.)
- Coladores de 19,0 mm (3/4 pulgadas), 9,5 mm (3/8 pulgadas) y 4,75 mm (Nº 4).
- Utensilios destinados a la amalgama de la muestra con la adición de agua, tales como cucharones, morteros, agitadores, palas, espátulas, botellas pulverizadoras, entre otros.

Muestra

Se utilizarán cerca de 16 kilogramos de pasta terráquea deshidratada aproximadamente para las técnicas A y B, mientras que se emplearán unos 29 kilogramos de pasta terráquea deshidratada para la técnica C. Como consecuencia de lo anterior, el espécimen del terreno debe contar con una masa saturada que no sea inferior a 23 kilogramos ni a 45 kilogramos.

Procedimiento

Preparación de Aparatos

- Escoger el modelo de receptáculo de compactación conforme a las metodologías (A, B y C). Establecer y registrar su peso con un margen de error de 1 miligramo. Conjugar el receptáculo, su base y el anillo de extensión, comprobando la congruencia del contorno interno y el anillo de extensión del receptáculo.
- Inspeccionar el ensamblaje del apisonador para garantizar que se halle en condiciones óptimas, asegurándose de que sus partes no estén sueltas ni deterioradas; de ser necesario, efectuar los ajustes y reparaciones pertinentes.

- Corroborar la exactitud del instrumento de medición de masas.
- Establecer el volumen del receptáculo.
- Validar la magnitud de descenso libre, la masa y la cara del apisonador.

Preparación de muestra húmeda

- Es imperativo contar con, por lo menos, cuatro experimentos que presenten variaciones en la proporción de agua, los cuales se aproximen al ideal calculado. En primer lugar, el primer modelo debe exhibir la humedad más aproximada al valor óptimo, luego, se debe ajustar la cantidad de agua de manera que se generen muestras tanto secas como saturadas en relación a la humedad ideal para delinear la curva.
- La captación hídrica deberá ser, como umbral inferior, del 2 % para lograr la máxima densidad, mientras que, en especímenes con alta saturación acuosa, el aumento de humedad no deberá superar el 4 %.
- Se destinarán, al menos, 2,3 kg de suelo tamizado según los esquemas A o B, y 5,9 kg para la metodología C.
- El espécimen deberá ser mezclado ininterrumpidamente para garantizar una dispersión homogénea del líquido incorporado gradualmente. Luego, las muestras deberán ser depositadas individualmente en contenedores herméticos y dispuestas conforme a la consolidación previamente ejecutada.

Compactación

- Es imperativo consignar la masa del receptáculo.
- Unir y asegurar el anillo y el receptáculo a la plataforma, sobre la cual descansará sobre una base firme para garantizar la correcta dispersión en el momento de descenso del mazo.

- Es necesario comprimir la muestra en cinco estratos, siendo que, al concluir la compresión, cada estrato debe poseer una altura semejante. Al situar el primer estrato, se debe someter a presión ligera.
- Si el estrato quinto excede los 6 mm (1/4 de pulgada) sobre el receptáculo o se ubica por debajo del ápice del molde de compactación, la evaluación será invalidada.
- Tras culminar la compactación, se debe extraer el aro y nivelar el espécimen comprimido con una regla metálica hasta lograr una superficie homogénea en la cúspide. Si existen oquedades, se deben colmar con material sobrante.
- Cuantificar la masa del espécimen junto con su contenedor.
- Luego de determinar la masa, se debe sustraer el material del receptáculo para analizar el contenido hídrico, obteniendo una fracción representativa de cerca de 500 gramos.

Cálculos

- Es necesario computar la proporción de agua, manifestada en porcentaje, utilizando la fórmula.

$$\%Agua = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso material seco}} x100$$

- Calcular la densidad húmeda del espécimen con la siguiente expresión.

$$\rho húmeda = \frac{Mtotal - Mmolde}{V}$$

- Calcular la densidad seca del espécimen con la siguiente expresión.

$$\rho seca = \frac{\rho húmeda}{1 + \frac{\%Agua}{100}}$$

3.2.4.2. Relación de Soporte de California CBR. (MTC E132)

Este análisis se lleva a cabo comúnmente con terrenos acondicionados en un entorno controlado de laboratorio bajo condiciones específicas de humedad y compactación, y su propósito es valorar el poder de los elementos subyacentes y de las capas fundacionales.

Instrumentos:

- Dispositivo de prensado análogo a aquellos empleados en las evaluaciones de compresión, utilizado para obligar la intrusión de un émbolo en el espécimen.
- Recipiente metálico cilíndrico de 152.4 mm ± 0.66 mm (6 ± 0.026”) de diámetro interno y 177.8 ± 0.46 mm (7 ± 0.018") de altura.
- Placa separadora metálica de contorno circular, con un diámetro externo de 150,8 mm (Dimensión de 5 15/16” y espesor de 61,37 ± 0,127 mm (2,416 ± 0,005”).
- Pistón de consolidación conforme al estipulado en el protocolo de Proctor Modificado.
- Mecanismo para evaluar dilatación, integrado por una lámina metálica horadada con una varilla axial y un trípode cuyas extremidades descansan sobre el perímetro del contenedor.
- Lastres compensatorios.
- Pistón de intrusión.
- Indicadores con recorrido mínimo de 25 mm (1”) para registrar la penetración del pistón en la probeta.
- Recipiente apto para la inmersión de los moldes.
- Estufa con capacidad para conservar una temperatura de 110° ± 5 ºC.
- Báscula con límite de 20 kg y exactitud de 1 g.
- Báscula con umbral de 1 kg y sensibilidad de 0,1 g
- Tamiz N°4, 3/4” y 2”. Otros utensilios de uso común como mezcladora, fraccionadora, cilindros de ensayo, filtros, entre otros.

Muestra

Si toda la materia es capaz de atravesar el tamiz N° 3/4", se utilizará la totalidad de la distribución granulométrica para conformar las muestras a compactar sin alteración alguna. En caso de que la sustancia quede atrapada en el tamiz N° 3/4", será necesario extraerla y reemplazarla por una magnitud equivalente de elemento que transite por el tamiz N° 3/4".

Procedimiento

- Determinada la sobresaturación innata del sustrato, se adiciona el volumen hídrico requerido para alcanzar la saturación estipulada en el examen, usualmente la óptima determinada en la apreciación de consolidación, y se entremezcla meticulosamente con el espécimen.
- Se cuantifica la masa del armazón con su pedestal y se posiciona el anillo junto con el disco disociador, colocando sobre este último una lámina filtrante de celulosa.
- Para la indagación, se habilitan tres configuraciones, y en cada una se comprime el ensayo en su interior, utilizando un mecanismo oscilatorio de compactación, aplicando respectivamente 55, 26 y 12 impactos por estrato.
- Tras culminar la compactación, se extrae el anillo y se uniformiza la muestra empleando un alisador. Cualquier depresión generada durante el nivelado se colmará con remanentes del material, consolidándola con una espátula.
- Se desensambla la estructura y se recompone en disposición inversa, omitiendo el disco disociador, intercalando una membrana filtrante entre el esqueleto y su base. Se cuantifica nuevamente su peso.
- Inmersión. Se superpone sobre la faz de la muestra invertida la plancha perforada con vástago, y sobre esta, los anillos pertinentes como carga adicional.
- Se efectúa la primera medición para analizar el incremento volumétrico, registrando su lectura, la fecha y la hora.

- Acto seguido, se sumerge la estructura en el receptáculo acuoso con la sobrecarga adherida, permitiendo la libre circulación del líquido por ambas superficies del espécimen. Se mantiene en esta condición durante 96 horas (4 jornadas). Se admite una duración inferior si se trata de suelos de composición granular con rápida absorción hídrica.
- Finalizado el lapso de inmersión, se procede a una nueva evaluación de expansión.
- Tras la fase de sumersión, se extrae la estructura del recipiente y se evacua el excedente de agua en su parte superior, permitiendo su drenaje por 15 minutos en su orientación habitual. Luego, se retira la sobrecarga y la placa perforada. Inmediatamente se cuantifica su peso y se inicia la prueba de penetración.
- Penetración. Se traslada el conjunto a la prensa y se inserta el pistón de penetración en la abertura central del lastre anular, adicionando el resto de la sobrecarga. Se ensambla el calibrador de dial y se impone una presión de 50N (5 kg) para el asentamiento del pistón. Luego, se reajustan a cero las agujas de los indicadores de medición, tanto el del anillo dinamométrico como el del control de penetración.
- Se aplica la carga sobre el pistón de penetración mediante el mecanismo hidráulico o equivalente de la prensa, manteniendo una velocidad invariable de 1,27 mm (0,05") por minuto. En los dispositivos manuales, se registran los valores de carga en cada penetración sucesiva.

Tabla 8

Lectura de carga de penetración para el CBR

PENETRACION	
Milímetros (mm.)	Pulgadas (pulg.)
0.63	0.025
1.27	0.050
1.90	0.075
2.54	0.100
3.17	0.125
3.81	0.150
5.08	0.200
7.62	0.300
10.16	0.400
12.70	0.500

Nota. En la tabla 8 nos muestra las lecturas de carga de penetración a tomar en consideración al realizar el ensayo de CBR. Adaptado del (MTC, 2016).

- Se aplica la presión sobre el pistón de penetración mediante el actuador o mecanismo adecuado de la prensa, conservando una velocidad invariable de inserción de 1,27 mm (0,05") por minuto. En los dispositivos de accionamiento manual, se documentan las magnitudes de la fuerza para las incursiones subsiguientes.

3.3. Definición de términos

Capacidad de soporte. - La resistencia que exhibe el material subrasante con el objetivo de diseñar pavimentos (RNE, 2020).

Estabilización. - Procedimiento fisicoquímico que optimiza las particularidades estructurales y dinámicas de un sustrato (RNE, 2020).

Índice de plasticidad. - Se refiere a la distinción entre el límite líquido y el límite plástico de un terreno (Braja M, 2015).

Límite líquido. - Se refiere al nivel de humedad donde se cierra una ranura de 12.7 mm a través de 25 impactos (Braja M, 2015).

Límite plástico. - Hace referencia al grado de humedad donde el suelo se fractura al producir un rollo con un diámetro de 3.18 mm (Braja M, 2015).

Máxima densidad Seca. – Es el valor máximo de la densidad seca de un suelo que está dado por la curva de compactación para un determinado esfuerzo (MTC, 2018)**.**

Optimo contenido de Humedad. – Cantidad de agua requerida para obtener la máxima densidad seca mediante el proceso de compactación (Montejo et al., 2018)**.**

Proctor modificado. – Ensayo experimental que permite establecer la correlación entre el óptimo contenido de agua y el peso unitario seco de un suelo (MTC, 2016).

Propiedades físicas de los suelos. – Las propiedades físicas definen las características propias de un suelo sin la intervención de una fuerza externa. (Crespo, 2004).

Propiedades mecánicas de los suelos. – Propiedades que describen la reacción del suelo ante la imposición de cargas externas (Graux, 1975)**.**

Relación de soporte CBR. – Ensayo destinado a evaluar la tenacidad de un suelo ante cargas de intrusión bajo condiciones reguladas de humedad y densidad (Bowles, 1981).

Subrasante. - Superficie finalizada a nivel del movimiento de tierras, que servirá de base para la superestructura vial (MTC, 2014).

Suelo. - Conjunto heterogéneo de partículas minerales, cohesivas y granulares, susceptibles de separación mediante métodos mecánicos de baja energía o por agitación acuosa (RNE, 2020).

Suelo arcilloso. – Material compuesto por partículas microscópicas inferiores a 0.005 mm de diámetro, con alta tendencia a plasticidad al interactuar con el agua (Crespo, 2004).

Tamiz. – Dispositivo de laboratorio empleado para clasificar los fragmentos del suelo conforme a su granulometría (MTC, 2018)**.**

Vías urbanas. - Espacios habilitados para el desplazamiento de peatones y vehículos dentro del perímetro urbano, clasificados en vías expresas, arteriales, colectoras y locales según su función (RNE, 2020).

Vidrio. - Sustancia vítrea amorfa, diáfana y resistente, compuesta esencialmente por silicatos y caliza sólida, formulada químicamente como SiO_2 (Na_2O) m (CaO) n. El SiO_2 proviene de arena silícea purificada, mientras que los óxidos básicos, como el Na_2O, derivan del carbonato o sulfato sódico, y el CaO y MgO provienen de caliza y dolomita naturales (RNE, 2020).

Vidrio sodo cálcico. - Variedad comercial de vidrio más extendida y económica, empleada principalmente en la manufactura de envases y acristalamientos, tanto en la edificación como en la industria automovilística. Su cualidad primordial es la transmisión de luz, estando constituido por (SiO_2), óxido sódico, cal y una fracción menor de otros compuestos específicos para conferir propiedades diferenciadas, como la coloración (Pearson, 2009).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

Tipo de investigación

Esta tesis corresponde a una investigación aplicada, dado que este tipo de estudio busca resolver dificultades que emergen en la sociedad, fundamentándose en saberes adquiridos (Zamora y Calixto, 2021), con la meta de corroborar la teoría directamente en un campo concreto de aplicación (Moreno, 1986).

Nivel o alcance de investigación

Esta tesis es de nivel o alcance explicativo porque se basa en una pregunta adecuadamente formulada y busca relaciones causales, utilizando necesariamente hipótesis para explicar los efectos de las variables independientes sobre la variable dependiente (Ñaupas et al., 2018).

Diseño de la investigación

El diseño de esta tesis es experimental porque en estos estudios manipulamos una de las variables del estudio (llamada variable independiente) para comprender su efecto sobre la variable dependiente (Zamora y Calixto, 2021).

4.2. Ámbito temporal y espacial

Temporal

Las pruebas y la recopilación de resultados para este estudio se llevaron a cabo de febrero a abril de 2024.

Espacial

La delimitación espacial de la presente tesis tiene como zona de estudio la calle Caminos del Inca del sector de Aschahuacso que está situada en el distrito de Tamburco, provincia de Abancay, región Apurímac.

4.3. Población y muestra

Población.

Se refiere al al conjunto de elementos denominados entidades de escrutinio (sujetos, artefactos, corporaciones, episodios, colectividades, coyunturas, sucesos, etc.). En cualquier supuesto, la noción de cosmos o conglomerado evoca a todas las existencias naturales y socioculturales que integran un ámbito donde se ejecuta la pesquisa (Silvestre y Huaman, 2020). En este contexto la población para la presente tesis está conformado por el suelo de la calle Caminos del Inca de la jurisdicción de Tamburco que tiene una extensión de 265 ml. Y un área de 2385 m2.

Figura 5

Ubicación georreferencial de la población

Nota. La figura 5 nos muestra la población de estudio, que en este caso es la calle Caminos del Inca. Fuente: Google Earth.

Muestra.

Se refiere a un conjunto de elementos seleccionados de una población siguiendo un plan de acción previamente establecido (muestreo), con el objetivo de adquirir conclusiones que pueden ser aplicadas a toda la población (Salazar y Del Castillo, 2018). Según Carrasco Diaz (2015), es un segmento representativo de la población, cuyos atributos fundamentales son ser imparciales y un fiel reflejo de la misma, de forma que los hallazgos logrados en la muestra puedan aplicarse a todos los componentes de dicha población.

El muestreo de esta tesis será no probabilístico intencional ya que el investigador inicia la selección de la muestra de manera deliberada, seleccionando aquellos elementos que percibe como apropiados y considera que son los más representativos (Silvestre y Huaman, 2020). Por consiguiente, la cantidad de puntos de investigación estará dado de acuerdo al criterio del indagador y a los preceptos de Pavimentos Urbanos (CE. 010). Dicha regulación establece que la hondura mínima de sondeo deberá ser de 1.50 m por debajo del nivel de rasante, la cantidad de puntos exploración estará dada de acuerdo a la siguiente tabla, pero no será menor a 3.

Tabla 9

Cantidad de puntos de investigación de acuerdo al tipo de vía.

TIPO DE VIA	NUMERO DE PUNTOS DE INVESTIGACION	AREA (m2)
Expresas	1 cada	1000
Arteriales	2 cada	1200
Colectoras	3 cada	1500
Locales	4 cada	1800

Nota. Esta tabla nos muestra el número de puntos de investigación en relación al tipo de vía de acuerdo al (RNE, 2020).

En consecuencia, se ejecutaron tres calicatas para la obtención de especímenes a una profundidad mínima de 1.5 m. Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas laboratoriales con el propósito de determinar las características índice mecánicas tanto del sustrato natural como del modificado mediante la adición de vidrio reciclado como agente estabilizador, en proporciones del 7%, 11%, 15% y 20% respecto a la masa seca del terreno, para luego contrastar los hallazgos obtenidos.

Figura 6

Ubicación de las calicatas de la zona de estudio

Nota. En la figura 6 se puede observar los puntos de indagación de las tres calicatas que se realizó en esta tesis. Fuente: Google Earth.

4.4. Instrumentos

La técnica de investigación se refiere al conjunto de preceptos y metodologías que auxilian al indagador en la configuración del nexo con el ente o individuo objeto de su escrutinio (Fuentes et al., 2020). Vale la pena enfatizar que en este artículo se debe utilizar la observación como método porque ésta permite al investigador medir, evaluar o analizar adecuadamente los fenómenos que ocurren, dependiendo del tema de estudio (Arias et al., 2022).

Por otra parte, los instrumentos son herramientas que permite al investigador registrar y recolectar la información de la realidad que se observa (Feria et al., 2019). El instrumento de esta tesis fue las fichas de recolección de datos y fichas de registro de observación las cuales mencionaremos a continuación.

- Ensayo de granulometría por tamizado (MTC E 107, ASTM D422).
- Ensayo de Límites de Consistencia (MTC E 110 - 111, ASTM D 4318).
- Ensayo Estándar para el valor equivalente de arena de suelos y agregado fino (MTC E114, ASTM D 2419)
- Ensayo de Compactación Proctor Modificado (MTC E – 115, ASTM D 1557).
- Ensayo de CBR “MTC E– 132, ASTM D 1883.

4.5. Procedimientos

Luego de haber planteado las bases teóricas, se procedió a aplicar dichas técnicas de manera práctica para poder desarrollar cada fin precisado en la tesis, a continuación, se detalla el procedimiento.

Acopio y trituración de residuos de vidrio

Acopio

La recolección de vidrio se realizó en la vidriería “ALUGLASS” que se encuentra ubicada en el Jr. Apurímac de la ciudad de Abancay. El tipo de vidrio recolectado corresponde al tipo Sodo Cálcico el cual es el más común y usados en la elaboración de ventanas, mamparas, vitrinas, repisas, etc. y estos son los que generan mayor cantidad de residuos. La cantidad de residuos sólidos recolectado fueron unos 45 kg aproximadamente de los cuales tenían distintos espesores y colores.

Figura 7

Acopio de residuos de vidrio

Nota. En la figura 7 se observa la recolección del vidrio reciclado utilizado en la presente tesis.

Proceso de Trituración del vidrio

Antes de proceder al triturado del vidrio se procedió a lavar el vidrio con agua a alta presión para así poder sacar todas las impurezas que existen el vidrio, posterior a ello se procedió a secar los residuos de vidrio durante un día (24 horas). Una vez secado los residuos de vidrio se procedió a triturar el vidrio en dos etapas utilizando implementos de seguridad como son guantes de badana, lentes de seguridad, mascarillas, etc. para así evitar posibles accidentes.

La primera etapa consistió en introducir en dos sacos los residuos de vidrio para luego ser triturado forma manual usando como herramienta el martillo, hasta conseguir tamaños de entre 3” a 2”, para que puedan ser más manejables como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 8

Vidrio triturado en tamaños de 3" a 2"

Nota. En la figura 8 se observa la primera etapa del triturado el vidrio reciclado.

La segunda etapa consistió en triturar el vidrio usando el equipo de abrasión los ángeles para así conseguir granos más finos y acorde con esta investigación, posterior a ello se procedió a tamizar en la malla N°200. Este procedimiento se realizó hasta conseguir la cantidad necesaria de polvo de vidrio para realizar la investigación.

Figura 9

Obtención de polvo de vidrio

Nota. En la figura 9 se observa el proceso de la segunda etapa el cual consistió en triturar el vidrio hasta obtener la granulometría deseada para la tesis.

Exploración y muestreo de las calicatas

Primeramente, se procedió a extraer las muestras de suelos de los puntos identificados, para posterior a ello realizar los ensayos laboratorio.

Ubicación de los puntos de investigación

A continuación, se exhibe en la tabla siguiente la localización de los sitios de toma de muestras o excavaciones efectuadas en la actual investigación.

Tabla 10

Ubicación de los puntos de investigación en coordenadas UTM

Coordenadas de los puntos de investigación (WGS-84)

	Este m.	Norte m.	Cota msnm.
C-1	730841.35	8493857.47	2652.46
C-2	730856.15	8493924.24	2668.24
C-3	730875.63	8493997.41	2676.52

Nota. En la tabla 10 se muestra las coordenadas en metros de cada una de las calicatas con sus respectivas cotas altitudinales en metros sobre el nivel del mar. Fuente: Elaboración propia.

Muestras de suelo natural

Tras la obtención de las muestras de terreno de las tres perforaciones y su transporte al laboratorio, se procedió al desecado de la muestra de suelo, seguido del fraccionamiento manual de cada una, para luego efectuar los ensayos de distribución granulométrica conforme al MTC E 107. Se llevaron a cabo pruebas para hallar los límites líquido y plástico, y seguidamente se calculó el índice de plasticidad de los suelos de acuerdo con lo estipulado en los MTC E 110 y 111. Además, se ejecutaron ensayos de compactación Proctor modificado para determinar la máxima densidad seca y el contenido de humedad óptimo, según lo

especificado en el MTC E 115. Finalmente, se realizó la prueba CBR a un 95% de la densidad seca máxima, con el fin de medir la capacidad de soporte del suelo, siguiendo las directrices del MTC E 132. Los hallazgos del análisis granulométrico y los límites de consistencia fueron utilizados para clasificar el tipo de material de cada muestra, utilizando los ábacos de clasificación SUCS y AASHTO.

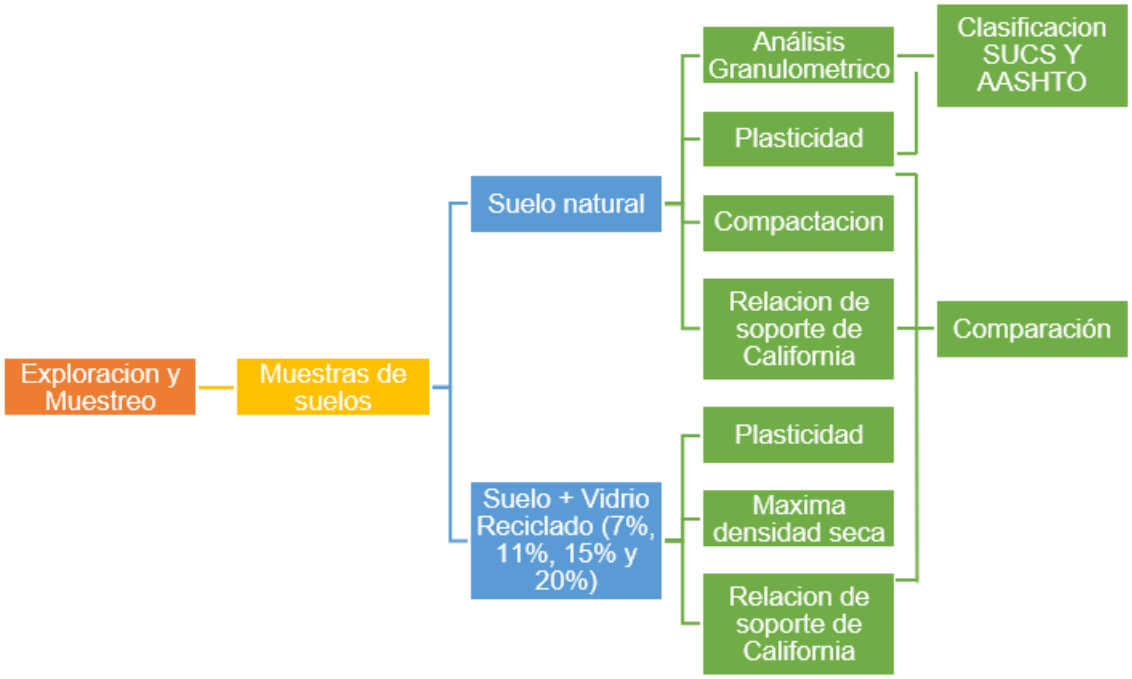
Muestras de suelo más la adición de vidrio reciclado

Al finalizar las pruebas sobre el terreno natural, se inició la evaluación de cada muestra, incorporando polvo de vidrio reciclado según el peso seco de la muestra en proporciones de 7%, 11%, 15% y 20%. Para ello, se efectuaron ensayos para establecer el límite líquido y plástico, con el fin de evaluar la plasticidad de cada tipo de suelo. También se realizaron pruebas de compactación para determinar la densidad seca máxima y el contenido ideal de humedad, y luego se ejecutó el ensayo de CBR para medir la capacidad de carga de los suelos. Todos estos ensayos se efectuaron conforme a los procedimientos establecidos en el manual de ensayos de materiales del MTC.

Una vez obtenidos los resultados de cada prueba para el suelo natural y el suelo tratado con polvo de vidrio reciclado, se compararon los valores. En este estudio se utilizaron estadísticas inferenciales utilizando el método ANOVA de un solo factor y el software estadístico IBM SPSS como herramientas de análisis.

Figura 10

Procedimiento de la tesis investigada



Nota. La figura 10 nos muestra el procedimiento realizado para alcanzar los objetivos planteados en la presente tesis.

4.6. Análisis de datos

En esta tesis como herramienta estadística y dar validación a las hipótesis se empleó el método de ANOVA de un factor.

Tabla 11

Análisis de Varianza de medidas repetidas

Origen de la Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F
Entre Grupos	$SS_F=\sum_{i=1}^{k} n_i(\bar{y}-\bar{y})^2$	k-1	$MSE_F=\frac{SS_F}{k-1}$	$F=\frac{MSE_F}{MSE_E}$
Dentro de Grupos	$SS_E=\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n_i}(y_{ij}-\bar{y}_i)^2$	N-k	$MSE_E=\frac{SS_E}{N-k}$	

Total	$SS_T = \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	N-1

Nota. La tabla 11 nos ilustra el análisis de varianza ANOVA de un factor (Academia Balderix, S.f)

Donde:

n_i:Magnitud de la muestra i.

N:Magnitud total de observaciones.

K:Magnitud de conjunto diverso anova.

y_{ij}:Magnitud j del conjunto i.

$\bar{y}_i$:Media del conjunto i.

$\bar{y}$:Media de la data.

Para su aplicación es necesario que cumplan los siguientes supuestos; las variables deben ser cuantitativas, las muestras deben ser independientes, seguir una distribución normal, las varianzas deben ser homogéneas y deben ser tres o más muestras diferentes (Zamora y Calixto, 2021).

Antes de realizar un análisis de varianza (ANOVA), es importante verificar si las muestras de cada grupo provienen de una distribución normal. Esto se hace mediante la prueba de normalidad que en este caso se ha usado la prueba de Shapiro-Wilk. Ya que el ANOVA asume que los residuos del modelo siguen una distribución normal, por lo que es importante verificar esta suposición.

Otra suposición clave del ANOVA es que las varianzas de las poblaciones son iguales (homogeneidad de varianza). En este caso se ha realizado la prueba de Levene para verificar esta suposición. Si las varianzas no son homogéneas, los resultados del ANOVA pueden ser poco confiables.

Una vez que se han verificado las suposiciones, se procede a ajustar el modelo ANOVA ya que este modelo permite determinar si hay diferencias significativas entre las medias de los grupos en función de la variable independiente (factor) especificada.

Después de ajustar el modelo ANOVA, es común realizar pruebas post hoc para determinar qué grupos difieren entre sí. En este caso se ha realizado la prueba de Tukey ya que es una de las pruebas post hoc más utilizadas y proporciona intervalos de confianza para las diferencias entre las medias de los grupos.

4.6.1. Prueba de Hipótesis

4.6.1.1. Prueba estadística para la hipótesis Especifica 1

Planteamiento de Normalidad

La verificación de la normalidad fue ejecutada mediante el test de Shapiro-Wilk debido a que el tamaño de la muestra es inferior a 50.

H_0 (Hipótesis Nula) = La muestra obedece a una distribución normal.

H_1 (Hipótesis Alternativa) = La muestra no obedece a una distribución normal.

Tabla 12

Resultados del análisis de normalidad Shapiro - Wilk del I.P

Grupos	% de Vidrio	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Índice de Plasticidad	0%	0.996	3	0.885
	7%	0.994	3	0.849
	11%	0.976	3	0.701
	15%	0.996	3	0.879
	20%	0.982	3	0.742

Nota. La tabla 12 nos muestra los resultados del análisis de normalidad para el índice de plasticidad, obtenido del software estadístico IBM SPSS.

En la tabla N°12 se presenta la prueba de normalidad, destacando el “valor-p” correspondiente a cada caso, y en todos supera el umbral de significancia α=0.05. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula, lo que valida que los datos siguen una distribución normal.

Homogeneidad de varianzas.

H_0 Hipótesis nula= Son iguales las varianzas

H_1 Hipótesis Alternativa= No son iguales las varianzas

Tabla 13

Resultados del análisis de homogeneidad de varianzas del I.P

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
1.053	4	10	0.428

Nota. La presente tabla nos muestra los resultados del análisis de homogeneidad de varianzas del índice de plasticidad, obtenidos del software estadístico IBM SPSS.

En la tabla N°13 se presenta la prueba de homogeneidad de varianzas, en la cual el valor de significancia es 0.428, superior al umbral de 0.05. Por lo tanto, no se dispone de evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Este resultado respalda la conclusión de que las varianzas de los datos son iguales.

Estadísticos Descriptivos.

Seguidamente, en la tabla N°14 se exponen los parámetros de la media aritmética y la dispersión típica correspondientes a cada una de las apreciaciones sobre la maleabilidad de los terrenos arcillosos.

Tabla 14

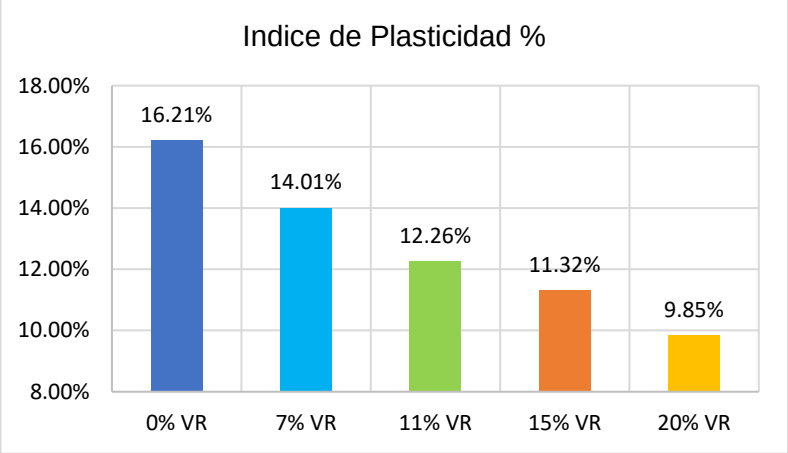
Media y Desviación estándar del I.P

% de Vidrio Reciclado	Media	Desv. Est.
0%	16.210	1.443
7%	14.010	1.429
11%	12.257	1.407
15%	11.323	1.273
20%	9.847	0.172

Nota. En la tabla 14 se exhiben los desenlaces de la media aritmética y la dispersión típica de cada una de las muestras del coeficiente de maleabilidad, derivados del programa informático estadístico IBM SPSS.

Figura 11

Promedios del Índice de Plasticidad %



Nota. Esta figura nos muestra los promedios de la plasticidad (%) de los suelos arcillosos a nivel de subrasante con adición de porcentajes de vidrio reciclado (VR) (0%, 7%, 11%, 15% y 20%).

Prueba de Anova

H_0 Hipótesis Nula= La adición de vidrio reciclado no influye en la plasticidad de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca.

H_1 Hipótesis Alternativa= La adición de vidrio reciclado influye en la plasticidad de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca.

Tabla 15

Resultados de varianza de los promedios Anova del I.P

	Suma de cuadrados	**gl**	**Media cuadrática**	**F**	**Sig.**
Entre grupos	72.795	4	18.199	11.736	0.001
Dentro de grupos	15.507	10	1.551		
Total	88.302	14			

Nota. En la presente tabla se muestra los resultados de varianza de promedios Anova del índice de plasticidad, obtenidos del software estadístico IBM SPSS.

En la tabla N°15 se detalla el análisis de la variabilidad (ANOVA) con un intervalo de confianza del 95% respecto a las medias del Índice de Plasticidad (%) de los suelos arcillosos en la subrasante, incorporando diversos porcentajes de vidrio reciclado (VR) (0%, 7%, 11%, 15% y 20%) en la ruta Caminos del Inca. En este estudio, se señala que el valor P es 0.001, menor que el umbral de 0.05, lo cual lleva a rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, se establece que existe una diferencia estadísticamente relevante en la plasticidad (%).

Prueba Post Hoc (Tukey).

Tabla 16

Resultados del análisis de Tukey del I.P

% de Vidrio Reciclado	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
20%	3	9.8467		
15%	3	11.3233	11.3233	
11%	3	12.2567	12.2567	
7%	3		14.0100	14.0100
0%	3			16.2100

Nota. Esta tabla presenta los desenlaces del examen post hoc de Tukey para el índice de plasticidad, extraídos del programa estadístico IBM SPSS.

En la tabla N°16 se exhibe el análisis post hoc de Tukey, el cual ofrece los rangos de certeza para las disparidades entre las medias. En consecuencia, podemos aseverar, con un nivel de significancia de 0.05, que la maleabilidad del terreno arcilloso de la vía Caminos del Inca, al incorporar un 20% de vidrio, resulta inferior en comparación con la muestra sin adición de vidrio.

4.6.1.2. Prueba estadística para la hipótesis Especifica 2

Planteamiento de Normalidad

La prueba de normalidad se realizó con la prueba de Shapiro-Wilk ya que el número de muestra es menor a 50.

H_0= La muestra sigue una distribución normal.

H_1= La muestra no sigue una distribución normal.

Tabla 17

Resultados del análisis de normalidad Shapiro - Wilk de la M.D.S

Grupos	% de Vidrio	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Máxima Densidad Seca	0%	0.987	3	0.780
	7%	0.970	3	0.668
	11%	0.984	3	0.756
	15%	0.989	3	0.803
	20%	0.973	3	0.683

Nota. Esta tabla nos muestra los resultados del análisis de normalidad para la máxima densidad seca, obtenido del software estadístico IBM SPSS.

En la tabla N°17 se presenta el test de normalidad, en el cual se exhibe el "p-valor" para cada situación y, en todos los casos, este excede el umbral de significancia α=0.05. Por lo tanto, no se descarta la hipótesis nula y se confirma que los valores se acomodan a una distribución normal.

Homogeneidad de varianzas.

$\mathbf{H_0}$ = Son iguales las varianzas

$\mathbf{H_1}$ = No son iguales las varianzas

Tabla 18

Resultados del análisis de homogeneidad de varianzas de la M.D.S

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
0.822	4	10	0.540

Nota. La presente tabla nos muestra los resultados del análisis de homogeneidad de varianzas para la máxima densidad seca, obtenidos del software estadístico IBM SPSS.

En la tabla N°18 se expone el examen de homogeneidad de las dispersiones, en el cual se observa que el índice de significancia obtenido es 0.540, cifra que excede el umbral de

0.05. Por ende, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Con este desenlace, se puede ratificar que los datos exhiben varianzas equivalentes.

Estadísticos Descriptivos.

A continuación, en la tabla N°19 se muestran los valores de la media y la desviación estándar para cada una de las observaciones de la máxima densidad seca de los suelos arcillosos.

Tabla 19

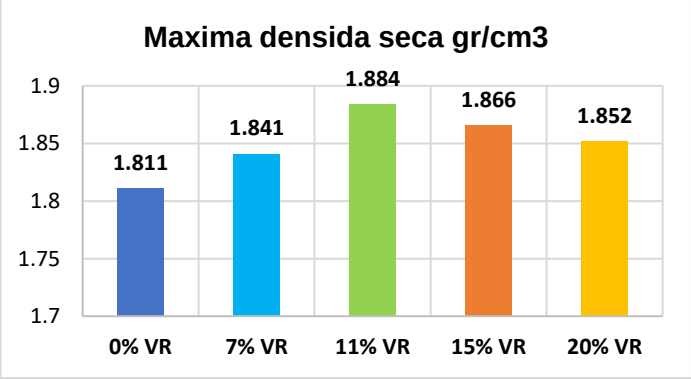
Media y Desviación estándar de la M.D.S

% de Vidrio Reciclado	Media	Desv. Est.
0%	1.811	0.025
7%	1.841	0.012
11%	1.884	0.009
15%	1.866	0.020
20%	1.852	0.016

Nota. En la presente tabla se muestra los resultados de la media y desviación estándar de todas las muestras de la máxima densidad seca, obtenidos del software estadístico IBM SPSS.

Figura 12

Promedios de la Máxima Densidad Seca (gr/cm3).



Nota. Esta figura nos muestra los promedios de la máxima densidad seca (gr/cm3) de los suelos arcillosos a nivel de subrasante con adición de porcentajes de vidrio reciclado (VR) (0%, 7%, 11%, 15% y 20%).

Prueba de Anova

H_0= La adición de vidrio reciclado no influye en la máxima densidad Seca de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca.

H_1= La adición de vidrio reciclado influye en la máxima densidad Seca de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca.

Tabla 20

Resultados de varianza de los promedios Anova de la M.D.S

	Suma de cuadrados	**gl**	**Media cuadrática**	**F**	**Sig.**
Entre grupos	0.009	4	0.002	7.458	0.005
Dentro de grupos	0.003	10	0.000		
Total	0.012	14			

Nota. En la tabla 20 se muestra los resultados de varianza de promedios Anova para la máxima densidad seca, obtenidos del software estadístico IBM SPSS.

En la tabla N°20 se exhibe la interpretación del ANOVA con un intervalo de fiabilidad del 95% de los promedios de la Magnitud plástica (%) de los terrenos arcillosos en la zona subyacente, con la incorporación de diversos porcentajes de cristal reciclado (VR) (0%, 7%, 11%, 15% y 20%) en la vía Caminos del Inca. En dicho análisis se evidencia que el valor P es de 0.005, inferior al umbral de 0.05, lo que conlleva al rechazo de la conjetura nula y, por ende, se precisa que existe una variación significativa a nivel estadístico en la densidad máxima seca.

Prueba Post Hoc (Tukey).

Tabla 21

Resultados del análisis de Tukey de la M.D.S

% de Vidrio Reciclado	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
0%	3	1.811	
7%	3	1.841	1.841
20%	3	1.852	1.852
15%	3		1.866
11%	3		1.884

Nota. Esta tabla presenta los resultados de la evaluación posterior de Tukey para la densidad máxima seca, derivados del programa de análisis estadístico IBM SPSS.

En la tabla N°21 se presenta el análisis post hoc de Tukey, que ofrece los rangos de confianza para las discrepancias entre los promedios. En consecuencia, podemos aseverar, con un margen de error de 0.05, que la densidad máxima seca (gr/cm^3) del terreno arcilloso en la vía Caminos del Inca, al incorporar un 11% de vidrio, experimenta una mejora sustancial en comparación con la precisa sin vidrio.

4.6.1.3. Prueba estadística para la hipótesis Especifica 3

Planteamiento de Normalidad

La prueba de normalidad se realizó con la prueba de Shapiro-Wilk ya que el número de muestra es menor a 50.

H_0 = La muestra sigue una distribución normal.

H_1 = La muestra no sigue una distribución normal.

Tabla 22

Resultados del análisis de normalidad Shapiro - Wilk del CBR.

Grupos	% de Vidrio	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Capacidad de Soporte	0%	0.997	3	0.900
	7%	0.935	3	0.506
	11%	0.999	3	0.942
	15%	0.954	3	0.585
	20%	0.958	3	0.607

Nota. Esta tabla nos muestra los resultados del análisis de normalidad para el CBR, obtenido del software estadístico IBM SPSS.

En la tabla N°22 se especifica la evaluación de normalidad, donde se indica el "valor-p" para cada situación y en todos los casos este supera el umbral de significancia α=0.05, lo que implica que no se descarta la H_0 y se valida que los datos se ajustan a una distribución normal.

Homogeneidad de varianzas.

H_0 = Son iguales las varianzas

H_1 = No son iguales las varianzas

Tabla 23

Resultados del análisis de homogeneidad de varianzas del CBR.

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
0.165	4	10	0.951

Nota. La presente tabla nos muestra los resultados del análisis de homogeneidad de varianzas para el CBR, obtenidos del software estadístico IBM SPSS.

En la tabla N°23 se expone la evaluación de la homogeneidad de varianzas, donde se puede apreciar que el valor de significancia obtenido es 0.951, superior al umbral de 0.05. Por

lo tanto, no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. A partir de este hallazgo, se puede corroborar que los datos presentan varianzas homogéneas.

Estadísticos Descriptivos.

Seguidamente, en la tabla N°24 se exponen los valores promedio y las desviaciones estándar correspondientes a cada una de las mediciones de la capacidad de carga de los suelos arcillosos.

Tabla 24

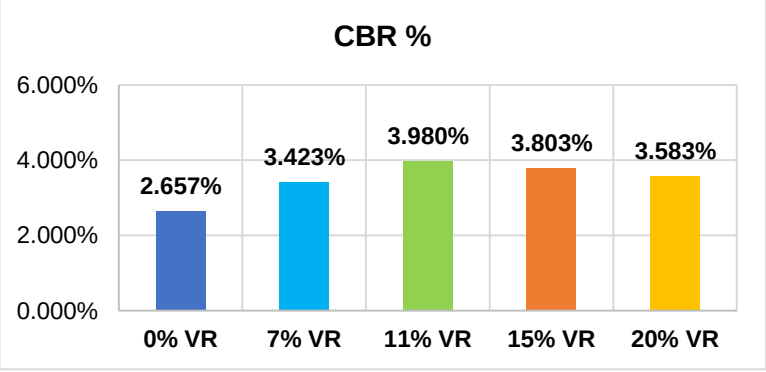
*Media y Desviación estándar del CBR***.**

% de Vidrio Reciclado	Media	Desv. Est.
0%	2.657	0.275
7%	3.423	0.248
11%	3.980	0.285
15%	3.803	0.348
20%	3.583	0.240

Nota. En la tabla 24 se muestra los resultados de la media y desviación estándar de todas las muestras del CBR, obtenidos del software estadístico IBM SPSS.

Figura 13

Promedios del valor del CBR %.



Nota. Esta figura nos precisa los promedios del CBR (%) de los suelos arcillosos a nivel de subrasante con adición de porcentajes de vidrio reciclado (VR) (0%, 7%, 11%, 15% y 20%).

Prueba de Anova

H_0= La adición de vidrio reciclado no influye en la relación de soporte de california de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca.

H_1= La adición de vidrio reciclado influye en la relación de soporte de california de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca.

Tabla 25

Resultados de varianza de los promedios Anova del CBR.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	3.138	4	0.784	9.863	0.002
Dentro de grupos	0.795	10	0.080		
Total	3.933	14			

Nota. En la presente tabla se muestra los resultados de varianza de promedios Anova para los valores del CBR, obtenidos del software estadístico IBM SPSS.

En la tabla N°25 se presenta el análisis de dispersión (ANOVA) con un nivel de confianza del 95% de los promedios del CBR (%) de los terrenos arcillosos en la capa subyacente, con la incorporación de diversas proporciones de vidrio reciclado (VR) (0%, 7%, 11%, 15% y 20%) en la calle Caminos del Inca. En este análisis se observa que el valor P es 0.002, inferior al umbral de 0.05, lo que lleva al rechazo de la hipótesis nula. Por lo tanto, se concluye que existe una diferencia significativa desde el punto de vista estadístico en cuanto a la relación de soporte de california (%).

Prueba Post Hoc (Tukey).

Tabla 26

Resultados del análisis de Tukey del CBR.

% de Vidrio Reciclado	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
0%	3	2.6567	
7%	3		3.4233
20%	3		3.5833
15%	3		3.8033
11%	3		3.9800

Nota. Esta tabla nos muestra los resultados de la prueba post hoc Tukey para los valores del CBR, obtenidos del software estadístico IBM SPSS.

En la tabla N°26 se muestra la prueba post hoc Tukey, por lo tanto, podemos afirmar con un nivel de significación de 0.05 que la relación de soporte de california al 95% del suelo arcilloso de la calle caminos del inca con el tratamiento de vidrio en un 11% presenta el mayor valor con respecto a las demás muestras.

4.7. Consideraciones éticas

Se tomará muestras en campo para el desarrollo de esta indagación y los datos se manipularán con la mayor honestidad y fidelidad no será copia de otras investigaciones o publicaciones realizadas.

De igual manera, en este estudio se considera las referencias de diferentes pensadores y se les da crédito a otras investigaciones previas. Por ende, tales datos no se asumen como obra de mi propia creación.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

5.1.1. Análisis granulométrico por tamizado de las muestras

Tabla 27

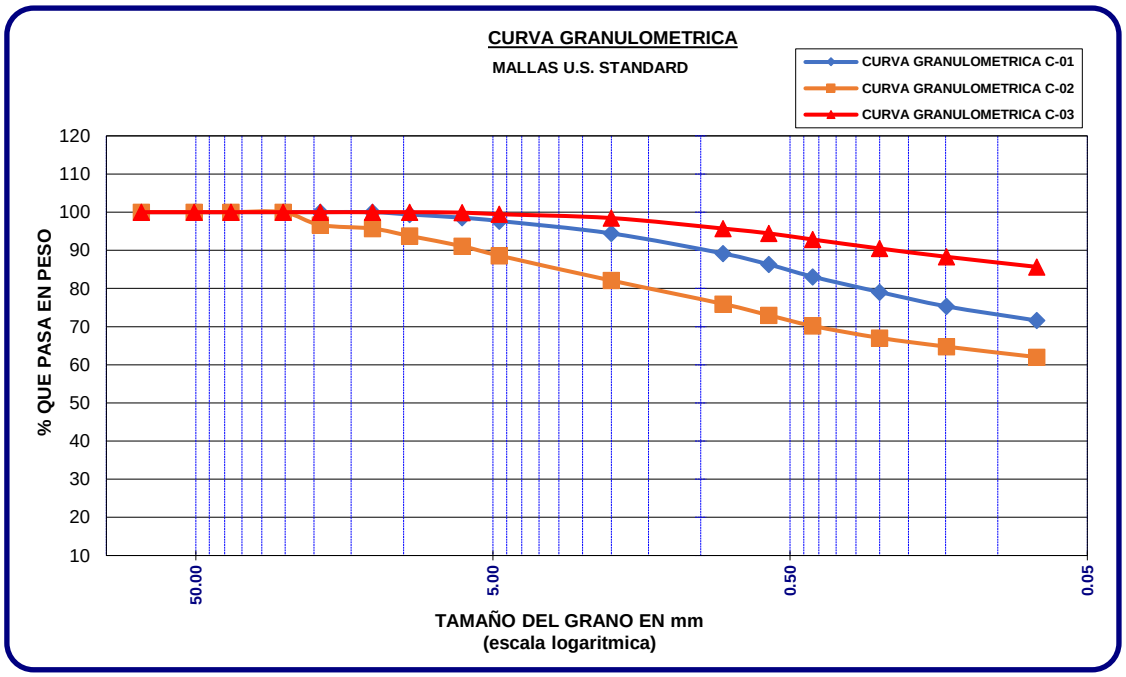
Resultados de la gradación de los suelos obtenidos mediante el análisis granulométrico

TAMICES ASTM	ABERTURA mm	% QUE PASA C-01	C-02	C-03
1"	25.400	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.050	100.00	96.64	100.00
1/2"	12.700	100.00	95.70	100.00
3/8"	9.525	99.39	93.76	100.00
1/4"	6.350	98.56	91.09	99.89
No4	4.760	97.69	88.61	99.46
No10	2.000	94.43	82.09	98.46
No20	0.840	89.17	75.94	95.70
No30	0.590	86.29	72.99	94.44
No40	0.420	83.09	70.18	92.83
No60	0.250	79.07	67.06	90.48
No100	0.149	75.31	64.76	88.30
No200	0.074	71.60	62.01	85.66
CAZUELA	BASE	71.51	61.83	85.60

Nota. En esta tabla se muestra el porcentaje de material de pasa por los tamices, estos resultados fueron obtenidos del ensayo del análisis granulométrico de acuerdo a lo que se establece en el MTC E 107.

Figura 14

Curva Granulométrica



Nota. En la siguiente figura se observa la curva granulométrica, donde se muestra el tamaño de las partículas que lo conforman a cada una de las muestras investigadas, obtenida de los resultados del análisis granulométrico.

5.1.2. Clasificación de suelos SUCS Y AASHTO

Tabla 28

Resultados de la clasificación de suelos

MUESTRA	CLASIFICACION DE SUELOS	
	SUCS	AASHTO
C-01	CL Arcilla de Baja Plasticidad	A-6 (10)
C-02	CL Arcilla de Baja Plasticidad	A-6 (7)
C-03	CL Arcilla de Baja Plasticidad	A-6 (11)

Nota. En la presente tabla se muestra los resultados de la clasificación de suelos SUCS y AASHTO de acuerdo a lo que se establece en la NTP 339.134-1999 y la NTP 339.135-1999.

5.1.3. Ensayo estándar para el valor equivalente de arena de suelos y agregado fino

Tabla 29

Resultados obtenidos del ensayo de equivalente de arena

Arena Equivalente	
Muestras de Suelo	SE (%)
C-1	9.0
C-2	12.0
C-3	8.0

Nota. Esta tabla nos muestra los resultados del valor del equivalente de arena de suelos y agregado fino, estos resultados se obtuvieron de acuerdo a los ensayos realizados como se establece en el MTC E 114.

5.1.4. Resultados del Objetivo específico 1

"Determinar la influencia de la adición de vidrio reciclado en la plasticidad de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023".

Límite líquido

Tabla 30

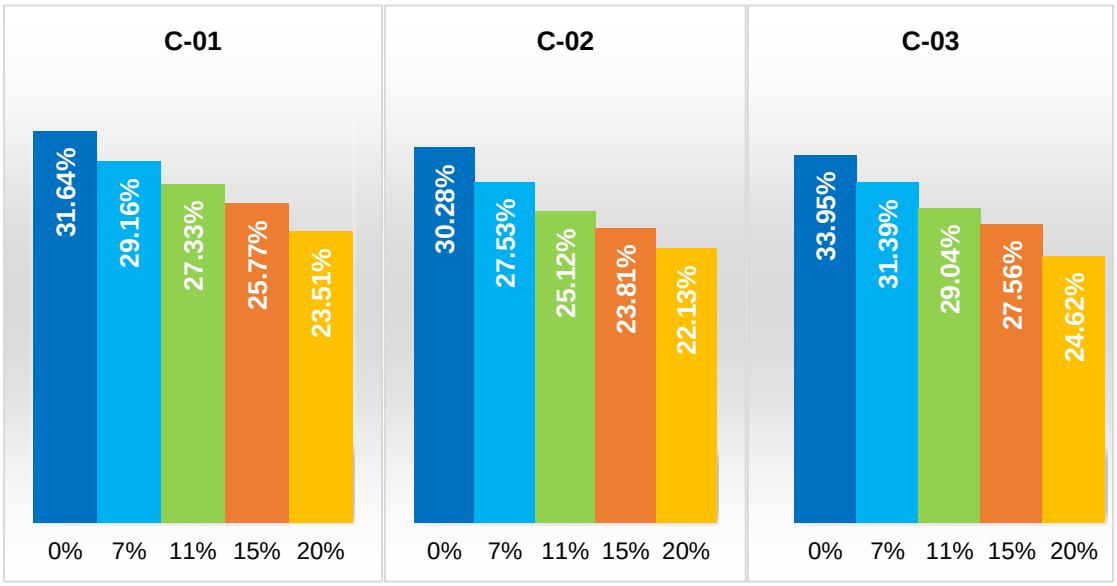
Resultados del ensayo para determinar el límite liquido

LÍMITE LÍQUIDO (LL)					
N° de Calicata	0% Vidrio	7% Vidrio	11% Vidrio	15% Vidrio	20% Vidrio
C-01	31.64%	29.16%	27.33%	25.77%	23.51%
C-02	30.28%	27.53%	25.12%	23.81%	22.13%
C-03	33.95%	31.39%	29.04%	27.56%	24.62%

Nota. En esta tabla se muestra los resultados del límite líquido, los resultados se obtuvieron de acuerdo a los ensayos realizados de acuerdo al MTC E 110.

Figura 15

Resultados del ensayo para determinar el límite líquido



Nota. En esta figura se puede observar que, a medida que incrementamos el porcentaje de vidrio reciclado como aditivo, se produce una disminución del límite líquido en cada una de las muestras estudiadas.

Limite plástico

Tabla 31

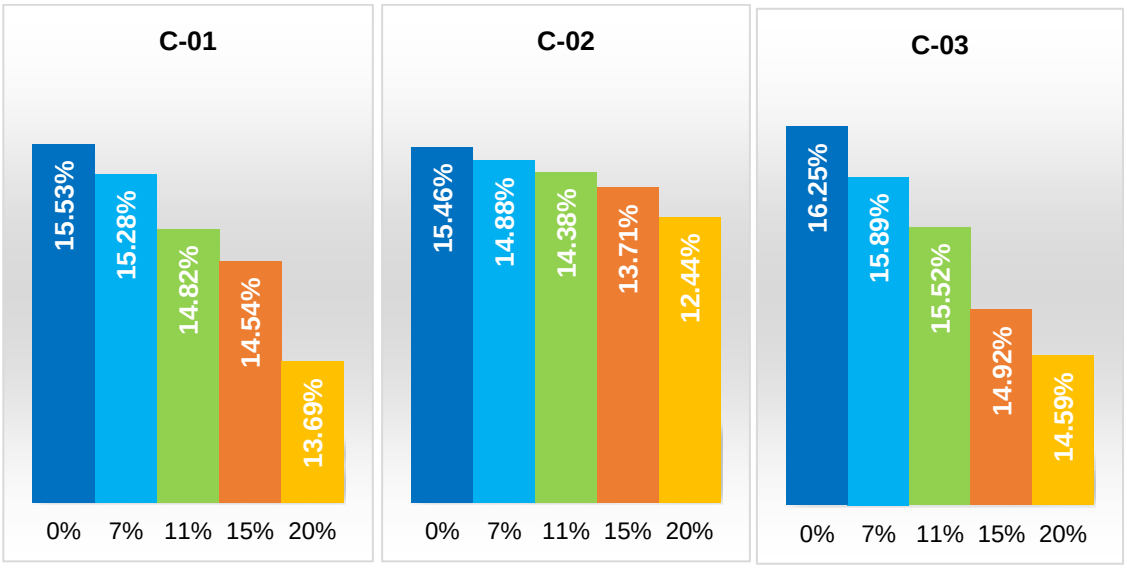
Resultados del ensayo para determinar el límite plástico

LÍMITE PLÁSTICO (LP)					
N° de Calicata	0% Vidrio	7% Vidrio	11% Vidrio	15% Vidrio	20% Vidrio
C-01	15.53%	15.28%	14.82%	14.54%	13.69%
C-02	15.46%	14.88%	14.38%	13.71%	12.44%
C-03	16.25%	15.89%	15.52%	14.92%	14.59%

Nota. En esta tabla se muestra los resultados del límite plástico, los resultados se obtuvieron de acuerdo a los ensayos realizados de acuerdo al MTC E 111.

Figura 16

Resultados del ensayo para determinar el límite plástico



Nota. En esta figura podemos apreciar que, existe una reducción de los valores del límite plástico a medida que se incrementa la dosificación del vidrio reciclado en cada una de las muestras analizadas.

Índice de plasticidad

Tabla 32

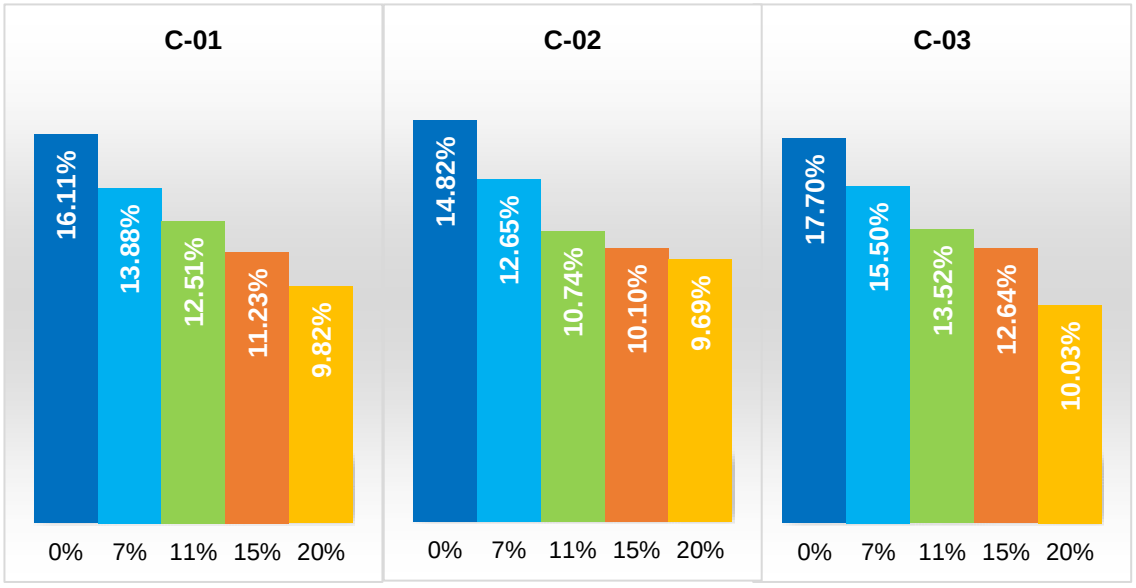
Resultados del ensayo para determinar el índice de plasticidad

ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%) VS VIDRIO RECICLADO					
Porcentaje de Vidrio	0%	7%	11%	15%	20%
I. Plasticidad (C-01)	16.11%	13.88%	12.51%	11.23%	9.82%
I. Plasticidad (C-02)	14.82%	12.65%	10.74%	10.10%	9.69%
I. Plasticidad (C-03)	17.70%	15.50%	13.52%	12.64%	10.03%

Nota. En esta tabla se muestra los resultados de la plasticidad de los suelos, los resultados se obtuvieron de acuerdo a los ensayos realizados de acuerdo al MTC E 111.

Figura 17

Resultados del ensayo para determinar el índice de plasticidad



Nota. En esta figura podemos apreciar que, mientras se incrementa el porcentaje de vidrio reciclado como aditivo, existe una reducción en el valor del índice de plasticidad para cada una de sus dosificaciones con respecto al suelo natural, esto ocurre para cada una de las muestras analizadas.

5.1.5. Resultados del Objetivo específico 2

Evaluar la influencia de la adición de vidrio reciclado en la máxima densidad seca de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023.

Óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca

Tabla 33

Resultados del ensayo para determinar el óptimo contenido de humedad

OPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%) VS VIDRIO RECICLADO					
Porcentaje de vidrio	0%	7%	11%	15%	20%
C.H.O (C-01)	13.30%	11.15%	10.40%	12.35%	14.40%
C.H.O (C-02)	12.45%	10.40%	11.65%	13.20%	14.05%
C.H.O (C-03)	14.60%	11.85%	10.75%	12.80%	14.80%

Nota. En esta tabla se muestra los resultados del óptimo contenido de humedad, los resultados se obtuvieron del ensayo de compactación de acuerdo a los ensayos realizados de acuerdo al MTC E – 115.

Tabla 34

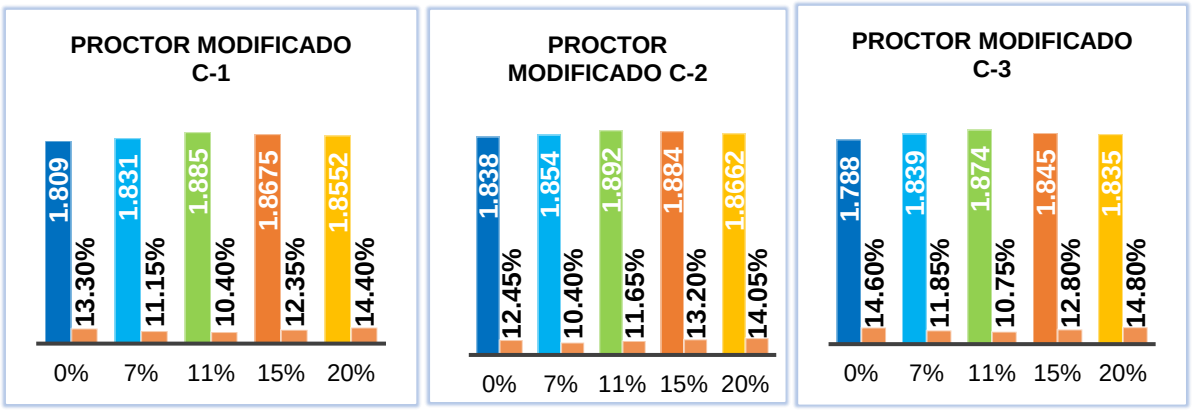
Resultados del ensayo para determinar la máxima densidad seca

MÁXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm3) VS VIDRIO RECICLADO					
Porcentaje de Vidrio	0%	7%	11%	15%	20%
M.D.S (C-01)	1.809	1.831	1.885	1.8675	1.8552
M.D.S (C-02)	1.838	1.854	1.892	1.884	1.8662
M.D.S (C-03)	1.788	1.839	1.874	1.845	1.835

Nota. En esta tabla se muestra los resultados de la máxima densidad seca, los resultados se obtuvieron del ensayo de compactación de acuerdo a los ensayos realizados de acuerdo al MTC E – 115.

Figura 18

Resultados del ensayo para determinar la máxima densidad seca



Nota. En esta figura podemos apreciar un aumento en el valor de la máxima densidad seca (gr/cm3) y reducción del optimo contenido de humedad (%) con la adición del 7% y 11% de vidrio reciclado, mientras que con la incorporación del 15% y 20% de VR empieza a decrecer el valor de la máxima densidad seca, como también aumenta su humedad óptima para cada muestra analizada.

5.1.6. Resultados del Objetivo específico 3

Evaluar la influencia de la adición de vidrio reciclado en la relación de soporte de california de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Tamburco – Abancay 2023.

Índice de soporte C.B.R

Tabla 35

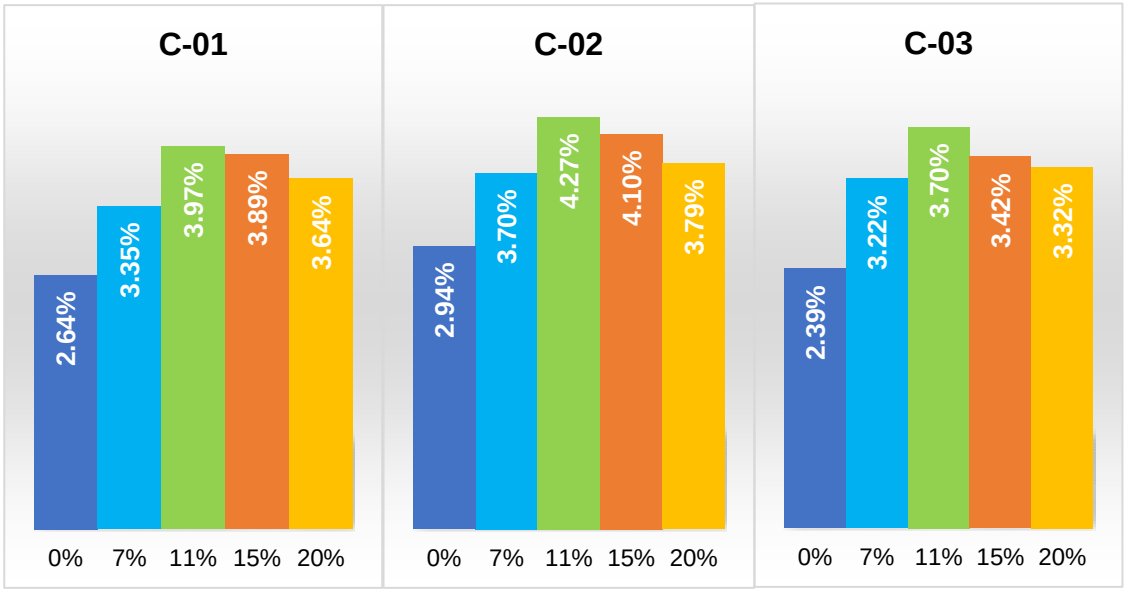
Resultados del CBR al 95% de la máxima densidad seca correspondiente al 0.1"

CBR 0.1” 95% VS VIDRIO RECICLADO					
Porcentaje de Vidrio	0%	7%	11%	15%	20%
CBR (C1)	2.64%	3.35%	3.97%	3.89%	3.64%
CBR (C2)	2.94%	3.70%	4.27%	4.10%	3.79%
CBR (C3)	2.39%	3.22%	3.70%	3.42%	3.32%

Nota. En esta tabla se muestra los resultados del CBR (%) al 95% de la máxima densidad seca correspondiente al 0.1”, los resultados se obtuvieron de acuerdo a los ensayos realizados de acuerdo al MTC E – 132.

Figura 19

Resultados del CBR al 95% de la máxima densidad seca correspondiente al 0.1"



Nota. En esta figura podemos apreciar un aumento en el valor del CBR (%) al 95% de la máxima densidad seca, correspondiente al 0.1” con la adición del 7% y 11% de vidrio reciclado y empieza a decrecer este valor con la incorporación del 15% y 20% de VR en cada una de las muestras estudiadas.

5.2. Discusión de Resultados

Objetivo general de esta tesis es analizar la influencia de la adición del vidrio reciclado en la capacidad de soporte de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca para su uso como subrasante mejorada. Para ello, se efectuaron pruebas físicas y mecánicas sobre el suelo virgen, añadiendo vidrio en diferentes proporciones, con el fin de identificar el porcentaje ideal que favorezca la plasticidad, la densidad seca máxima y la relación de soporte de California. Los resultados obtenidos fueron favorables, permitiendo concluir que la inclusión de vidrio reciclado sí repercute en la capacidad de soporte de los terrenos arcillosos de dicha vía.

Discusión de resultados de la hipótesis especifica “H1”.

Al determinar la influencia de la adición de vidrio reciclado en la plasticidad de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, mediante los ensayos realizados y los resultados obtenidos, se observa que la plasticidad disminuye a medida que aumenta el porcentaje de vidrio reciclado (VR) en las concentraciones de 0%, 7%, 11%, 15% y 20%. Los valores promedio obtenidos fueron 16.21%, 14.01%, 12.26%, 11.32% y 9.85%, respectivamente, como se expone en la imagen N°11. Con base en los resultados, se concluye que, en comparación con los suelos sin vidrio reciclado, aquellos con 11%, 15% y 20% presentan una reducción significativa, destacándose que la proporción más eficaz es la de 20%, como se detalla en la tabla N°16, mostrando una disminución del 6.36% respecto al suelo natural.

Por otro lado, Samaniego (2021) en su investigación, empleó vidrio reciclado pulverizado (VPR) en dosis de 0%, 4%, 7% y 11%, siendo la dosificación óptima del 7%, lo que redujo la plasticidad de 27% a 24%. Sin embargo, este hallazgo no coincide con lo encontrado en la presente investigación, ya que, en este caso, a medida que aumentamos la cantidad de vidrio, la plasticidad disminuye.

Discusión de resultados de la hipótesis especifica “H2”.

Al determinar la influencia de la adición de vidrio reciclado en la densidad seca máxima de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, mediante las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, se observa que la densidad seca máxima aumenta con la inclusión de vidrio reciclado (VR) en concentraciones de 7% y 11%, mientras que disminuye al agregar vidrio reciclado (VR) en proporciones de 15% y 20%. Los valores registrados para los suelos sin vidrio reciclado (0%) y aquellos con VR al 7%, 11%, 15% y 20% fueron 1.811 gr/cm³, 1.841 gr/cm³, 1.884 gr/cm³, 1.866 gr/cm³ y 1.852 gr/cm³, respectivamente, tal como se observa en la imagen N°12. Con base en los resultados, se puede deducir que la densidad seca máxima entre el suelo sin tratar y los suelos con VR presenta notables diferencias, destacando que la dosis óptima corresponde al 11% de VR, con la cual se logró un aumento del valor de 1.811 gr/cm³ a 1.884 gr/cm³, según lo detallado en la tabla N°21.

De manera similar, en la investigación de Soberón (2022) se utilizó polvo de vidrio reciclado en proporciones de 0%, 3%, 6%, 9% y 14%, logrando que la dosificación ideal para la máxima densidad seca fuera del 14%, lo que provocó un incremento de 1.756 gr/cm³ a 1.835 gr/cm³. Por lo tanto, este hallazgo no concuerda con los resultados obtenidos en el presente estudio, ya que, mientras en el trabajo de Soberón Monja el valor aumentó con la adición de vidrio reciclado hasta el 14%, en la presente investigación, el valor disminuyó después del 11% de VR.

Discusión de resultados de la hipótesis especifica “H3”.

Al determinar la influencia de la adición de vidrio reciclado en la relación de soporte de california de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, a partir de las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, se observa que dicho valor aumenta al añadir 7% y 11% de vidrio reciclado. No obstante, con la inclusión de 15% y 20%, los valores comienzan a reducirse. Los suelos con adiciones de 0% (suelo virgen), 7%, 11%, 15% y 20%

arrojaron promedios de 2.657%, 3.423%, 3.98%, 3.803% y 3.583%, respectivamente, como se presenta en la imagen N°13. La mezcla más eficiente fue la que contenía 11%, alcanzando el mayor valor de CBR al 95% con 0.1”, tal como se ilustra en la tabla N°26.

Por otro lado, en la investigación de Bonifacio (2023) se determinó que la capacidad de soporte aumentó de 3.01% a 4.88% con la adición de vidrio al 12%, siendo este el porcentaje óptimo. En relación con esta investigación, los resultados son congruentes, ya que el porcentaje óptimo obtenido en este estudio para la capacidad de soporte fue el 11%, donde el valor creció de 2.657% a 3.98%, aumentando 1.50 veces más en comparación con el suelo natural.

VI. Conclusiones

Conclusión del objetivo general.

En esta tesis se analizó la Influencia de la adición del vidrio reciclado en la estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, Los resultados revelaron mejoras favorables en las propiedades físicas y mecánicas, destacándose una reducción significativa en la plasticidad al adicionar un 20% de vidrio reciclado, en comparación con las proporciones de 7%, 11% y 15%. En cuanto a la densidad seca máxima y la relación de soporte de California, la mezcla más eficiente resultó ser la que contenía 11% de polvo reciclado de vidrio, superando en rendimiento a las demás concentraciones. No obstante, para que un terreno sea adecuado como subrasante, debe cumplir con un índice de resistencia CBR igual o superior al 6% (MTC, 2014). A pesar de los resultados positivos, el uso de vidrio reciclado como estabilizador no alcanzó un nivel adecuado para lograr una subrasante satisfactoria, ya que solo se mejoró de una subrasante deficiente a una insuficiente. Por lo tanto, no es viable usar el polvo de vidrio reciclado como material estabilizador para la subrasante de la calle Caminos del Inca.

Conclusión del objetivo específico 1.

Se determino la influencia de la adición de vidrio reciclado en la plasticidad de suelos arcillosos a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, donde se advirtió que conforme se incrementa la proporción de VR, se observa una disminución en el límite líquido y limite plástico en cada una de las muestras evaluadas. En consecuencia, ello señala una reducción en el valor de la plasticidad. El Índice de Plasticidad sin la inclusión de VR presenta un valor promedio de 16.21%, disminuyendo a 9.85% con la inclusión del 20% de cristal reciclado, siendo esta la proporción más idónea. Por lo tanto, se concluye que el efecto del VR disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y este puede ser usado para la reducción del IP de los

terrenos arcillosos de la calle caminos del Inca, ya que se obtuvo un valor < 10 y se encuentra dentro de los parámetros que exige las normas peruanas.

Conclusión del objetivo específico 2.

De manera análoga, al evaluar la influencia de la adición de vidrio reciclado en la densidad seca máxima de suelos arcillosos en la subrasante de la calle Caminos del Inca, se observó que al incrementar la proporción de vidrio reciclado al 7% y 11%, el valor de la densidad máxima seca aumentó a 1.811 g/cm³ y 1.884 g/cm³ respectivamente. Sin embargo, con la adición de un 15% y 20%, dicho valor comenzó a disminuir, registrando 1.866 g/cm³ y 1.852 g/cm³ respectivamente. Como resultado, la densidad máxima seca se incrementó en 0.073 g/cm³, pasando de 1.811 g/cm³ (suelo sin tratar) a 1.884 g/cm³ de promedio con la inclusión del 11% de vidrio reciclado, siendo esta la proporción más eficaz. Por lo tanto, se puede concluir que la adición de vidrio reciclado mejora la densidad seca máxima de los suelos arcillosos.

Conclusión del objetivo específico 3.

Finalmente, al evaluar la influencia de la adición de vidrio reciclado en la relación de soporte de california a nivel de subrasante en la calle Caminos del Inca, se constató que conforme se elevaba la proporción de vidrio reciclado al 7% y 11%, el indicador de resistencia CBR ascendió a un 3.42% y 3.98% respectivamente. En cambio, con la inclusión del 15% y 20%, dicho índice comenzó a descender a un 3.80% y 3.58% respectivamente. De esta forma, la capacidad de soporte (CBR) se multiplicó por 1.5, pasando de un 2.657% (suelo virgen) a un 3.980% en promedio con la adición del 11% de cristal reciclado, resultando ser esta la proporción óptima. En consecuencia, se determina que el vidrio reciclado potencia la resistencia de los suelos arcillosos.

VII. Recomendaciones

Recomendación de la conclusión general.

Se sugiere recurrir a materiales alternativos para la optimización de subrasantes en terrenos arcillosos, dado que el polvo de vidrio reciclado no logra un valor de CBR adecuado. Esto impide que sea considerado como una subrasante conforme a las especificaciones estipuladas en las normativas peruanas.

Recomendación de la conclusión especifica 1.

Se aconseja seguir con esta línea de estudio para conocer la plasticidad en suelos limosos incorporando polvo de vidrio reciclado, para determinar si este puede llegar a ser un aditivo efectivo para la reducción de plasticidad de los suelos, ya que en esta tesis dio resultados positivos en la reducción de este valor.

Recomendación de la conclusión especifica 2.

Se sugiere usar la incorporación de un 11% de micropartículas vitrificadas recuperadas con el propósito de incrementar el índice de la densidad seca suprema en tierras limo-arcillosas, dado que con esta proporción se logró el nivel más elevado, alcanzando la combinación más idónea.

Recomendación de la conclusión especifica 3.

Se sugiere evaluar índice de soporte california (CBR) con granulometrías mayores a 300 µm en suelos arcillosos, con el fin de determinar si con granulometrías mayores se podría lograr mejores resultados.

VIII. Referencias

Aaqib, S., & Chakraborty, S. (2020). Effects of Waste Glass Powder on Subgrade Soil Improvement. *World Scientific News*. https://www.researchgate.net/publication/340967394_Effects_of_Waste_Glass_Powder_on_Subgrade_Soil_Improvement

Academia Balderix. (S.f). *Tabla Anova*. Retrieved 05 de julio de 2024, from Probabilidad y Estadistica: https://www.probabilidadyestadistica.net/tabla-anova/

Argadoña, D., & Palomino, J. (2019). *Evaluación De Las Propiedades Físico-Mecánicas Del Suelo Obtenido De La Apv. Kari Grande Vía Rumi Wasi – San Sebastián Utilizado A Nivel De Subrasante En La Región Cusco. Tesis de Pregrado, Universidad Andina del Cusco.* Repositorio Institucional. https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/3487/Diego_Julio_Tesis_bachiller_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Arias, J., Holgado, J., & Tafur, T. V. (2022). *Metodologia de la investigacion.* Puno: Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C. https://doi.org/10.35622/inudi.b.016

Baldovino, J., Izzo, R., Rose, J., & Domingos, M. (2021). Strength, durability, and microstructure of geopolymers based on recycled-glass powder waste and dolomitic lime for soil stabilization. *Construction and Building Materials, 271*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121874

Blayi, R., Sherwani, A., Hashim, H., Faraj, R., & Daraei, A. (2020). Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials, 13*. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00427

Bonifacio Cuzqui, S. (2023). *Efectos del vidrio triturado en la estabilizacion de suelos arcillosos a nivel de subrasantes en camino departamental UC- 104 - Ucayali, 2023. [Tesis de Pregadro, Universidad Nacional Hermilio Valdizan].* Repositorio Digital Instirtucional. https://hdl.handle.net/20.500.13080/9359

Bowles, J. (1981). *Manual de laboratorio de suelos en ingenieria civil.* Mc Graw Hill.

Braja M, D. (2015). *Fundamentos de Ingenieria Geotecnica Cuarta Edicion.* CENGAGE learning.

Caceres, C. A. (Febrero de 2018). *ABC Color*. MOPC podria autorizar " Inyeccion de Lecherada" en la Transchaco.: https://www.abc.com.py/nacionales/el-mopc-podria-autorizar-inyeccion-de-lecherada-de-cal-a-presion-1674816.html

Carrasco Diaz, S. (2015). *Metodologia de la investigacion Cientifica.* Lima: San marcos.

Carrasco, T. (2017). El reciclaje de vidrio y sus beneficios en el medio Ambiente. *Explorador Digital, 1*(1), 11. https://doi.org/https://doi.org/10.33262/exploradordigital.v1i1.315

Cercado, L., & Zavaleta, J. (2018). *Analisis del Grado de Expansibilidad de Suelos arcillosos en las calles del Asentamiento Humano Señor de los Milagros del Distrito de Chachapoyas, Amazonas. Tesis de Pregardo, Universidad Privada Antenor Orrego.* Repositorio Institucional. https://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12759/4174/REP_ING.CIVIL_LENIN.CERCADO_JAVIER.ZAVALETA_AN%C3%81LISIS.GRADO.EXPANSIBILIDAD.SUELOS.ARCILLOSOS.CALLES.ASENTAMIENTO.HUMANO.SE%C3%91OR.MILAGROS.DISTRITO.CHACHAPOYAS.AMAZONAS.pdf?sequence=1

Chavez, D., & Odar, G. (2019). *Propuesta de estabilización con cal para subrasantes con presencia de suelos arcillosos en bofedales y su influencia en el pavimento rígido bajo*

la metodología de diseño AASHTO. [Tesis de Pregrado, UPC]. Repositorio institucional. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/625903?show=full

Chipana Tello, W. (2023). *Análisis comparativo de la influencia de adición de cal y cemento en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral–Abancay–Apurímac–2022. [Tesis de Pregrado, Universidad Tecnologica de los Andes].* Repositorio Digital Institucional. https://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/551

comunicaciones, M. d. (2014). *Manual de Carreteras Suelos Geologia, Geotecnia y Pavimentos Seccion Suelos y Pavimentos.* Lima: Squadrito EIRL.

Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecanica de suelos y cimentaciones.* Limusa.

Espinoza, L., & Santimperi, G. (2021). *Uso del vidrio reciclado en la mejora de la estabilización de suelos de la Carretera Tramo Collud – Ventarrón, Pomalca – Lambayeque - 2021. [Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo].* Repositorio Digital Institucional. https://hdl.handle.net/20.500.12692/83975

Feria, H., Blanco, M., & Valledor, R. (2019). *La dimension metodologica del diseño de la investigacion cientifica.* Universitaria.

Fuentes, D., Toscano, A., Malvaceda, E., Diaz, J., & Leonardo, D. (2020). *Metodologia de la investigacion: Conceptos, hermaientas, y ejercicios practicos en las ciencias administrativas y contables.* Universidad Pontificia Bolivariana.

Galvez Tirado, M. R. (2023). *Efecto de la Adición de Vidrio Pulverizado para la Estabilización de Suelos Arenosos en Subrasante. [Tesis de Pregrado, Universidad Señor de Sipan].* Repositorio Digital Institucional. https://hdl.handle.net/20.500.12802/11403

Graux, D. (1975). *Fundamentos de Mecanica del Suelo Proyecto de Muros y Cimentaciones.* Editores Tecnicos Asociados S.A. https://www.google.com.pe/books/edition/Fundamentos_de_mec%C3%A1nica_del_suelo_proye/96EEoaVynI4C?hl=es-419&gbpv=1&dq=PROPIEDADES+MECANICAS+DE+LOS+SUELOS&pg=PA2&printsec=frontcover

Haro Marchena, L. M. (2021). *Efecto de la adición de Vidrio Reciclado en la estabilización de suelo arenosoenelA.H.VillaHermosa,NuevoChimbote. [Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo].* Repositorio Digital Institucional. https://es.scribd.com/document/657901823/Haro-MLM-SD-2

Mero, M., & Franco, J. (2017). *Determinacion del Comportamiento del Suelo Arcilloso existente de la Calle Eloy Alfaro de la Parroquia Andres de Vera del Canton Portoviejo y sus Caracteristicas de Neutralizacion. (Tesis de Pregrado, Universidad Tecnica de Manabi).* Repositorio Institucional. http://repositorio.utm.edu.ec:3000/server/api/core/bitstreams/ab037ee0-2c4a-4802-b904-3144c330f31b/content

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingenieria de pavimentos.* Universidad Catolica dee Colombia.

Montejo, A., Montejo, A., & Montejo. (2018). *Estabilizacion de suelos.* Bogota: DGP editores SAS.

Moreno Bayardo, M. G. (1986). *Introduccion a la metodologia de la investigacion educativa.* Guadalajara: Progreso.

MTC, M. d. (2018). *Glosario de Terminos.* Lima.

MTC, M. d. (2014). *Manual de Carreteras Suelos Geologia, Geotecnia y Pavimentos Seccion Suelos y Pavimentos.* Servicios Graficos Squadrito EIRL.

MTC, M. d. (2016). *Manual de ensayo de materiales.* Lima.

Muñoz Razo, C. (2011). *Como Elaborar y Asesorar una Investigacion de Tesis.* PEARSON.

Ñaupas Paitan, H., Valdivia Dueñas, M., Palacios Vilela, J., Delgado, R., & Hugo. (2018). *Metodologia de la Investigacion Cuantitativa - Cualitaiva y redaccion de Tesis.* Bogota: Ediciones de la U.

Pajuelo, ,. C., & Rivera, J. (2022). *Evaluación de las Propiedades Mecánicas de un Suelo Arcilloso Agregando Polvo de Vidrio Reciclado, San Marcos, Ancash 2022. [Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo].* Repositorio Digital Institucional. https://hdl.handle.net/20.500.12692/102113

Pearson, I. C. (2009). *Manual del Vidrio Plano.* CAVIPLAN. https://www.bia.com.uy/manual_vidrio_plano_3ra_edicion.pdf

RNE, M. d. (2020). *Reglamento Nacional de Edificaciones.* Megabyte.

Salazar, C., & Del Castillo, S. (2018). *Fundamentos basicos de estadistica.*

Samaniego, K. (2021). *Aplicación de vidrio reciclado pulverizado para la estabilización de la subrasante en suelos arcillosos, Jr. Progreso – Chilca 2021.[Tesis de Pregrado, Universida Cesar Vallejo].* Repositorio Digital Institucional. https://hdl.handle.net/20.500.12692/100727

Silvestre, I., & Huaman, C. (2020). *Pasos para elaborar la investigacion y la readaccion de la tesis universitaria.* San Marcos.

Siyab, M., Tufail, M., & Mateeullah, M. (2018). Effects of Waste Glass Powder on the Geotechnical Properties of Loose Subsoils. *Civil Engineering Journal, 4*. https://doi.org/10.28991/cej-03091137

Soberon Monja, B. (2022). *Estabilización de suelos arcillosos usando vidrio reciclado molido para su uso como subrasante mejorada en pavimentos urbanos en la urb. Ciudad del Chofer, Chiclayo 2019. [Tesis de Pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo].* Repositorio Digital Institucional. http://hdl.handle.net/20.500.12423/5368

Vazquez, A., Guanuchi, L., Cahuana, R., Vera, R., & Holgado, J. (2023). *Metodos de investigacion cientifica.* Puno: Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C. https://doi.org/10.35622/inudi.b.094

Yaghoubi, E., Yaghoubi, M., Guerrieri, M., & Sudarsanan, N. (2021). Improving expansive clay subgrades using recycled glass: Resilient modulus characteristics and pavement performance. *Construction and Building Materials, 302*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124384

Zambrano Sierra, F. G. (2022). *Análisis comparativo de la capacidad de soporte a nivel de subrasante en suelos arcillosos incorporando ceniza de Saccharum Officinarum y activador alcalino en la trocha carrozable Sahuanay – Umaccata Tamburco Abancay 2021. [Tesis de Pregrado, UTEA].* Repositorio Digital Institucional. https://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/478

Zamora, I., & Calixto, L. (2021). *Estadistica Aplicada con SPSS para Investigadores.* Lima: SMITH ZAMORA.

Zamora, I., & Calixto, L. (2021). *Metodologia de la Investigacion en la Tesis.* Smith Zamora.

IX. Anexos

Anexo 1. Matriz de consistencia

Anexo 2. Matriz de Operacionalización de variables

Anexo 2. Formatos de instrumentos utilizados

Anexo 3. Certificados y fotografías

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes.