

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



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

**AUTOR**

**Brayan Brandon Soberon Monja**

**ASESOR**

**Lucas Ludeña Gutierrez**

<https://orcid.org/0000-0001-7903-3646>

**Chiclayo, 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**

PRESENTADA POR  
**Brayan Brandon Soberon Monja**

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

**INGENIERO CIVIL AMBIENTAL**

APROBADA POR

Carlos Rafael Tafur Jimenez  
PRESIDENTE

Luis Quiroz Quiñonez  
SECRETARIO

Lucas Ludeña Gutierrez  
VOCAL

## **Dedicatoria**

A mí fallecido perrito Spark, por llegar a mi vida a regalarme lo mejor de él y ahora ser mi fuente de inspiración. ¡Te extraño de aquí al cielo amiguito!

## **Agradecimientos**

Me es grato usar este espacio para agradecer a Dios, por brindarme salud y permitirme tener y disfrutar a mi familia. A mi madre, por haberme dado la oportunidad de ser un profesional y alentarme a seguir adelante.

De igual modo, mi profundo agradecimiento al que fue el mejor docente del mundo, el profesor Juan Tenorio Cubas, por educar con todo su amor y enseñar con el ejemplo, por ser amigo y confidente, por permitirme ser uno de sus alumnos. Muchas gracias.

Finalmente, mi agradecimiento a la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, a la facultad de ingeniería, a todos mis profesores y compañeros de carrera.

# Informe de tesis

---

## INFORME DE ORIGINALIDAD

---

23%

INDICE DE SIMILITUD

22%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

12%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

---

## FUENTES PRIMARIAS

---

1	<a href="https://repositorio.ucv.edu.pe">repositorio.ucv.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
2	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	2%
3	<a href="#">Submitted to Universidad Cesar Vallejo</a> Trabajo del estudiante	1%
4	<a href="https://docplayer.es">docplayer.es</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://cybertesis.uni.edu.pe">cybertesis.uni.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://repositorio.uss.edu.pe">repositorio.uss.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
8	<a href="https://repositorio.urp.edu.pe">repositorio.urp.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
9	<a href="https://www.slideshare.net">www.slideshare.net</a> Fuente de Internet	1%

---

## Índice

<b>Resumen</b> .....	<b>13</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>14</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>15</b>
<b>Revisión de literatura</b> .....	<b>21</b>
Antecedentes .....	21
Bases teóricas .....	28
Suelos .....	28
Suelos arcillosos.....	33
Estabilización de suelos .....	35
Vidrio .....	43
Pavimento.....	45
Ensayos de laboratorio .....	50
<b>Materiales y métodos</b> .....	<b>51</b>
Tipo y nivel de investigación .....	51
Tipo de investigación .....	51
Nivel de investigación.....	51
Enfoque de investigación .....	51
Diseño de investigación .....	51
Hipótesis.....	51
Diseño de contrastación de hipótesis .....	51
Población, muestra, muestreo .....	52
Población.....	52
Muestra.....	52
Muestreo.....	52
Criterios de selección .....	54
Operacionalización de variables .....	57
Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	58
Procedimientos .....	59
Plan de procesamiento y análisis de datos .....	70
Consideraciones éticas .....	70
Matriz de consistencia.....	72
<b>Resultados y discusión</b> .....	<b>73</b>

Resultados .....	73
Discusión de resultados.....	103
<b>Conclusiones .....</b>	<b>111</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>111</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>112</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>117</b>

## Lista de ilustraciones

Ilustración 1: Ubicación de Urb. Ciudad del Chofer .....	19
Ilustración 2: Temperatura en Chiclayo [4] .....	19
Ilustración 3: Microzonificación de Chiclayo [4] .....	20
Ilustración 4: Estructura del suelo [28] .....	29
Ilustración 5: Formas de la curva de distribución granulométrica [30] .....	30
Ilustración 6: Comportamiento del suelo según su humedad [30] .....	31
Ilustración 7: Proceso de selección del Tipo de estabilización [29] .....	37
Ilustración 8: Fórmula para determinar energía de compactación [27] .....	38
Ilustración 9: Estabilización mecánica en campo .....	38
Ilustración 10: Estabilización con cal en campo .....	39
Ilustración 11: Estabilización con cemento en campo .....	40
Ilustración 12: Estabilización con cloruro de sodio en campo .....	41
Ilustración 13: Estabilización con asfalto en campo .....	42
Ilustración 14: Composición del vidrio en % .....	44
Ilustración 15: Vidrio triturado [24] .....	45
Ilustración 16: Estructura típica de pavimentos asfálticos [32] .....	46
Ilustración 17: Estructura tradicional de pavimentos flexible .....	47
Ilustración 18: Estructura tradicional de pavimento adoquinado .....	48
Ilustración 19: Estructura tradicional de pavimento rígido [33] .....	48
Ilustración 20: Zona específica de estudio dentro de Urb. Ciudad del Chofer .....	53
Ilustración 21: Consistencia del suelo encontrado durante la exploración geotécnica... ..	60
Ilustración 22: Ubicación exacta de puntos de investigación en zona de estudio Urb. Ciudad del Chofer .....	61
Ilustración 23: Zona de extracción de calicata N° 01 en Urb. Ciudad del Chofer.....	62
Ilustración 24: Zona de extracción de calicata N° 03 en Urb. Ciudad del Chofer.....	62
Ilustración 25: Zona de extracción de calicata N° 02 en Urb. Ciudad del Chofer.....	63
Ilustración 26: Vidriería “Cristal & Art” de la cual se obtuvo los residuos de vidrio ....	64
Ilustración 27: Residuos de vidrio recolectados de vidriería “Cristal & Art” .....	65

Ilustración 28: Residuos de vidrio reducidos de manera manual a tamaños de entre 2 a 3 pulgadas .....	65
Ilustración 29: Triturado de vidrio usando un molino artesanal eléctrico .....	66
Ilustración 30: Vidrio triturado por primera vez con molino artesanal eléctrico.....	66
Ilustración 31: Vidrio triturado por vez con molino artesanal eléctrico .....	67
Ilustración 32: Proceso de tamizado del vidrio triturado usando la malla N° 50 y N° 200 .....	67
Ilustración 33: Vidrio triturado de tamaño entre 75 $\mu\text{m}$ – 300 $\mu\text{m}$ .....	68
Ilustración 34: Dosificaciones de suelo arcilloso seco y vidrio molido previo a su mezclado .....	69

## Lista de tablas

Tabla 1: Clasificación de suelos de acuerdo al tamaño de las partículas de suelo [29]..	30
Tabla 2: Clasificación de suelos de acuerdo al índice de plasticidad IP [29].....	31
Tabla 3: Correlación entre clasificación de suelos AASHTO - SUCS [29].....	33
Tabla 4: Clasificación de suelos de acuerdo al tamaño de partícula [2].....	34
Tabla 5: Rango de cemento requerido en Estabilización suelo-cemento [29].....	40
Tabla 6: Contenido de asfalto para estabilizar [29]. .....	41
Tabla 7: Alternativas de estabilización en función del tipo de suelo [27].....	42
Tabla 8: Estructura tradicional de pavimento rígido [29].....	49
Tabla 9: Número mínimo de puntos de investigación [31] .....	52
Tabla 10: Resumen de literatura de referencia usada para esta investigación.....	56
Tabla 11: Variables y objeto de estudio.....	57
Tabla 12: Operacionalización de variable independiente .....	57
Tabla 13: Operacionalización de variable dependiente .....	58
Tabla 14: Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	59
Tabla 15: Coordenadas de ubicación de puntos de investigación .....	61
Tabla 16: Zona de extracción de calicata N° 02 en Urb. Ciudad del Chofer.....	63
Tabla 17: Proporción de combinación de suelo arcilloso y vidrio molido .....	69
Tabla 14: Matriz de consistencia .....	72
Tabla 19: Resumen de resultados de ensayo de contenido de humedad en suelo natural .....	74
Tabla 20: Distribución granulométrica del suelo natural de la calicata N° 01 y sus combinaciones con vidrio en polvo de tamaño 75 - 300 $\mu\text{m}$ .....	76
Tabla 21: Distribución granulométrica del suelo natural de la calicata N° 02 y sus combinaciones con vidrio en polvo de tamaño 75 - 300 $\mu\text{m}$ .....	76
Tabla 22: Distribución granulométrica del suelo natural de la calicata N° 01 y sus combinaciones con vidrio en polvo de tamaño < 75 $\mu\text{m}$ .....	78
Tabla 23: Distribución granulométrica del suelo natural de la calicata N° 02 y sus combinaciones con vidrio en polvo de tamaño < 75 $\mu\text{m}$ .....	78
Tabla 24: Resumen de clasificación SUCS y AASHTO del suelo de la calicata N° 01 y su combinación con los diferentes porcentajes de vidrio en polvo.....	84

Tabla 25: Resumen de clasificación SUCS y AASHTO del suelo de la calicata N° 02 y su combinación con los diferentes porcentajes de vidrio en polvo.....	85
Tabla 26: Resumen de resultados de ensayos químicos al suelo natural y adicionado con vidrio en polvo .....	86
Tabla 27: Resumen de resultados de ensayos químicos al suelo natural y adicionado con vidrio en polvo .....	87
Tabla 28: Resumen de resultados de ensayo Proctor modificado a suelo natural y suelo adicionado con vidrio en polvo – calicata N° 01 .....	88
Tabla 29: Resumen de resultados de ensayo Proctor modificado a suelo natural y suelo adicionado con vidrio en polvo – calicata N° 02 .....	91
Tabla 30: Resumen de resultados de ensayo CBR para suelo natural de la calicata N° 01 y las combinaciones de suelo y vidrio en polvo .....	94
Tabla 31: Resumen de resultados de ensayo CBR para suelo natural de la calicata N° 02 y las combinaciones de suelo y vidrio en polvo .....	96
Tabla 32: Porcentaje de agente estabilizante de acuerdo con recomendaciones del Manual de Carreteras: Suelos y Pavimentos 2014.....	99
Tabla 33: Análisis de costos de estabilización con cal, cemento y vidrio para 1 km de carretera. ....	99
Tabla 34: Comparación entre tamaños de partícula de cemento, cal y vidrio triturado	101
Tabla 35: Diámetro promedio de la partícula de cemento en función de la superficie específica y el peso específico del material .....	102
Tabla 36: Diámetro promedio de la partícula de cemento en función de la superficie específica y el peso específico del material [39] .....	106
Tabla 37: Requisitos mínimo de calidad para materiales de subrasante [40].....	110

## Lista de gráficos

Gráfico 1: Variación de la curva granulométrica por tamizado para el suelo de la calicata N° 01 con combinaciones de vidrio en polvo de tamaño 75 - 300 $\mu\text{m}$ .....	75
Gráfico 2: Variación de la curva granulométrica por tamizado para el suelo de la calicata N° 02 con combinaciones de vidrio en polvo de tamaño 75 - 300 $\mu\text{m}$ .....	75
Gráfico 3: Variación de la curva granulométrica por tamizado para el suelo de la calicata N° 01 con combinaciones de vidrio en polvo de tamaño < 75 $\mu\text{m}$ .....	77
Gráfico 4: Variación de la curva granulométrica por tamizado para el suelo de la calicata N° 02 con combinaciones de vidrio en polvo de tamaño < 75 $\mu\text{m}$ .....	77
Gráfico 5: Variación de la curva granulométrica por hidrometría para suelo de la calicata N° 01 y sus combinaciones con vidrio en polvo.....	79
Gráfico 6: Variación de la curva granulométrica por hidrometría para suelo de la calicata N° 02 y sus combinaciones con vidrio en polvo.....	79
Gráfico 7: Variación del límite líquido (LL) del suelo de la calicata N° 01 y sus combinaciones con polvo de vidrio en las dos granulometrías propuestas. ....	80
Gráfico 8: Variación del límite líquido (LL) del suelo de la calicata N° 02 y sus combinaciones con polvo de vidrio en las dos granulometrías propuestas. ....	81
Gráfico 9: Variación del límite plástico (LP) del suelo de la calicata N° 01 y sus combinaciones con polvo de vidrio en las dos granulometrías propuestas. ....	82
Gráfico 10: Variación del límite plástico (LP) del suelo de la calicata N° 02 y sus combinaciones con polvo de vidrio en las dos granulometrías propuestas. ....	82
Gráfico 11: Variación del índice de plasticidad (IP) del suelo de la calicata N° 01 y sus combinaciones con polvo de vidrio en las dos granulometrías propuestas. ....	83
Gráfico 12: Variación del índice de plasticidad (IP) del suelo de la calicata N° 02 y sus combinaciones con polvo de vidrio en las dos granulometrías propuestas. ....	83
Gráfico 13: Variación de la curva de compactación del suelo respecto a la combinación suelo arcilloso – vidrio en polvo 75 a 300 $\mu\text{m}$ .....	88
Gráfico 14: Variación de la curva de compactación del suelo respecto a la combinación suelo arcilloso – vidrio en polvo < 75 $\mu\text{m}$ .....	89
Gráfico 15: Variación de la máxima densidad seca del suelo de la calicata N° 01 respecto del contenido de vidrio en polvo.....	90

Gráfico 16: Variación del óptimo contenido de humedad del suelo de la calicata N° 01 respecto del contenido de vidrio en polvo .....	90
Gráfico 17: Variación de la curva de compactación del suelo respecto a la combinación suelo arcilloso – vidrio en polvo 75 a 300 $\mu\text{m}$ .....	91
Gráfico 18: Variación de la curva de compactación del suelo respecto a la combinación suelo arcilloso – vidrio en polvo 75 a 300 $\mu\text{m}$ .....	92
Gráfico 19: Variación de la máxima densidad seca del suelo de la calicata N° 02 respecto del contenido de vidrio en polvo.....	93
Gráfico 20: Variación del óptimo contenido de humedad del suelo de la calicata N° 02 respecto del contenido de vidrio en polvo .....	93
Gráfico 21: Variación del CBR del suelo de la calicata N° 01 respecto al contenido de vidrio .....	95
Gráfico 22: Variación de la expansión a las 96 horas del suelo de la calicata N° 01 respecto al contenido de vidrio en polvo.....	95
Gráfico 23: Variación del CBR del suelo de la calicata N° 02 respecto al contenido de vidrio .....	97
Gráfico 24: Variación de la expansión a las 96 horas del suelo de la calicata N° 02 respecto al contenido de vidrio en polvo.....	97
Gráfico 25: Comparación de costes de estabilización con vidrio triturado vs estabilización con Cal vs estabilización con Cemento. ....	100
Gráfico 26: Comparación de tamaños entre el vidrio y la cal viva.....	102
Gráfico 27: Comparación de tamaños entre el vidrio y el cemento portland .....	103

## Resumen

En la presente investigación se estudia el efecto estabilizador del vidrio en polvo sobre las propiedades geotécnicas del suelo arcilloso de la Urbanización Ciudad del Chofer de Chiclayo. El objetivo principal de este estudio es determinar el contenido y tamaño óptimo de vidrio molido para estabilizar subrasantes con fines de pavimentación urbana. Para ello se evalúan contenidos de vidrio del 3, 6, 9 y 14% en peso seco del suelo, en granulometrías de 75 y 300  $\mu\text{m}$ . El suelo en estado natural se clasificó de acuerdo a SUCS y AASHTO, y las combinaciones de suelo y vidrio se ensayaron de acuerdo a la normativa vigente del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Los ensayos de laboratorio más importantes que se llevaron a cabo fueron: granulometría por tamizado, granulometría mediante el hidrómetro, límites de Atterberg, proctor modificado, CBR. Los resultados de los ensayos mostraron una mejora en las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso debido a la presencia de vidrio en polvo. Los incrementos más altos de la capacidad de soporte CBR y la máxima densidad seca del suelo se obtuvieron con un 14% de vidrio. Sin embargo, las mejores propiedades de consistencia del suelo se obtuvieron para un 9% de vidrio. De acuerdo con ello, el contenido óptimo de vidrio triturado está en la cercanía al 9% y el tamaño más adecuado es la granulometría de tamaño 300 – 75  $\mu\text{m}$ . Del estudio económico se concluye que estabilizar con vidrio resulta más económico que hacerlo con cemento portland o cal viva.

**Palabras clave:** vidrio en polvo, estabilización de suelos, suelo arcilloso, máxima densidad seca, CBR.

### **Abstract**

The present investigation studies the stabilizing effect of powdered glass on the geotechnical properties of the clayey soil of the Ciudad del Chofer Urbanization in Chiclayo. The main objective of this study is to determine the optimum content and size of ground glass to stabilize subgrade for urban paving purposes. For this purpose, glass contents of 3, 6, 9 and 14% in dry weight of the soil are evaluated, in granulometries of 75 and 300  $\mu\text{m}$ . The soil in its natural state was classified according to SUCS and AASHTO, and the soil-glass combinations were tested according to the current regulations of the Ministry of Transport and Communications. The most important laboratory tests carried out were: sieve granulometry, hydrometer granulometry, Atterberg limits, modified proctor, CBR. The results of the tests showed an improvement in the physical and mechanical properties of the clayey soil due to the presence of powdered glass. The highest increases in CBR bearing capacity and maximum soil dry density were obtained with 14% glass. However, the best soil consistency properties were obtained for 9% glass. Accordingly, the optimum content of crushed glass is in the vicinity of 9% and the most suitable size is the particle size 300 - 75  $\mu\text{m}$ . From the economic study it is concluded that stabilizing with glass is more economical than stabilizing with Portland cement or quicklime.

**Keywords:** powdered glass, soil stabilization, clay soil, maximum dry density, CBR

## Introducción

Como bien es sabido, los suelos finos (limos y arcillas) son por lo general materiales pobres para cimentación, por las indeseables propiedades geotécnicas que éstos muestran. Si hablamos específicamente de los suelos arcillosos, éstos poseen baja capacidad portante, por lo que son bastante compresibles, generando problemas de asentamientos diferenciales cuando se usan como suelo de fundación; poseen baja resistencia al corte por lo que en taludes o terrenos con elevada pendiente es común que existan deslizamientos; son también impermeables, generando problemas de drenaje (teniendo que recurrirse a métodos no convencionales para desaguar) y cuando están húmedos son plásticos (de alta o baja plasticidad de acuerdo al mineral predominante).

A pesar de todos estos inconvenientes, el principal enemigo de los suelos arcillosos es la humedad, pues cuando éstos entran en contacto con el agua (subterránea o de lluvia) sus propiedades mecánicas se alteran y las características físicas que muestran son desfavorables, así por ejemplo: la capacidad portante disminuye drásticamente, cuando está saturado es difícil de compactar (fenómeno de consolidación), sumado a ello, presentan problemas de expansión y contracción cuando se mojan y secan respectivamente, lo que daña peligrosamente las estructuras cimentadas sobre ellas. Por todas estas condiciones es que muchos de estos suelos arcillosos no pueden ser utilizados como subrasante en la construcción de vías, puesto que no cumplen con los requisitos mínimos establecidos por la normatividad vigente nacional, por lo que es necesario (en la mayoría de casos) recurrir a procesos de mejoramiento de suelos [1].

Ejemplos tangibles de lo anteriormente dicho son: la famosa Torre inclinada de Pisa, la Torre Garisenda y la Torre Asinelli, todas ellas en Italia y cimentadas sobre débiles capas de arcilla que cedieron ante el elevado tonelaje de dichas estructuras [2]. Pruebas de este fenómeno en carreteras se observan todos los días y en cualquier parte del mundo, así tenemos a la carretera de la Ruta Transchaco en el país vecino de Paraguay, a la que periódicamente se le destina dinero para reparar determinados tramos de ella que se ven dañados por los esfuerzos que genera el hinchamiento y hundimiento de sus terraplenes base construidos sobre una subrasante arcillosa [3].

En el ámbito local, el Instituto Nacional de Defensa Civil [4] nos dice que Chiclayo, por estar ubicado sobre el Valle Chancay, tiene un suelo predominante en suelos finos (arcillas y limos inorgánicos), además tener un nivel freático próximo a la superficie (1.50 m aproximadamente). En cuanto al área en estudio específica, la Urbanización Ciudad de Chofer,

por ubicarse en el Sector I de la Microzonificación que hace INDECI y por encontrarse cerca de la acequia Cois, ésta constituye un depósito aluvial formado por arcillas de baja a media plasticidad (Ver anexo N° 01). Los problemas en esa zona son notorios, sus calles presentan hundimientos, deformaciones y charcos que dificultan el tránsito vehicular y de personas; en pocas palabras, el suelo es bastante compresible y expansivo, siendo por consiguiente un suelo de mala calidad para ser usado como fundación en proyectos viales o de edificación (Ver anexo N° 01).

El otro punto problema que busca solucionar esta investigación es el derivado de la mala gestión y enorme tasa de generación de residuos sólidos en los países industrializados, especialmente de aquellos residuos no biodegradables, como el caso del vidrio. El vidrio representa el 7% de los residuos sólidos depositados en los botadores [5], a pesar de ello, el vidrio en sí mismo no es un material que contamine el medio ambiente, la razón por la que representa un problema para la sociedad es porque el hombre no le da la disposición final adecuada. El vidrio es 100% reciclable un número indeterminado de veces, sin embargo, se prefiere importar o generar tasas elevadas de envases de vidrio en lugar de reutilizar (consumiéndose altísimas cantidades de energía, extrayéndose cantidades mayúsculas de materia prima y generando emisiones de CO<sub>2</sub>), que contribuye al crecimiento de vertederos, lo que provoca problemas visuales, alterando el ornato del lugar [6]. Ejemplo de ello es lo que afirma Nassar [7] que solo en 2010 los estadounidenses produjeron 11.5 millones de toneladas de vidrio, y que solo el 27% fue recuperado para su reciclaje; este dato da muestra clara de que se está produciendo más de lo que se puede gestionar. En los últimos años se ha impulsado la idea de reciclar los residuos sólidos reaprovechables para usarlos como materiales alternativos en diferentes facetas de la construcción, sin embargo, a pesar de que Ecovidrio [8] indica que desde el año 1980 hasta la actualidad se han reciclado más de 12 millones de toneladas de vidrio en el mundo; y que en España, país impulsor del reciclado, el porcentaje de reciclaje va en aumento (8.3% en los primeros seis meses del 2018) [9]; en países como el nuestro, los problemas de gestión de disposición final de residuos sólidos como el vidrio, el papel o el plástico va de mal en peor.

En el ámbito nacional, el Ministerio del Ambiente [10] indica que “en el Perú... solo se recicla el 1.9% del total de residuos sólidos reaprovechables que se generan”; cifra decepcionante, pues en el Perú solo en el año 2016 se generaron 7'005,576 toneladas de residuos de todo tipo, siendo ellos en su mayoría reaprovechables. En ese sentido, la fuente RPP Noticias [11] indica que “en nuestro país se producen un promedio de 23 mil toneladas de

basura diariamente”, de igual modo cita a la anterior ministra del ambiente Fabiola Muñoz al decir que se debería separar los residuos en reaproechables y no reaproechables para después reciclarlos. Esta idea se apoya en la Nueva ley de gestión integral de residuos sólidos D.L. N°1278 publicada en 2017 por el MINAM, sin embargo la realidad es otra, los problemas de acumulación de basura y de todo tipo de residuos municipales en Lima y el resto del país es más que evidente. A nivel local, la situación es aún más crítica, se puede “encontrar residuos acumulados en cualquier esquina, calle, plaza, mercado o acequia, contaminando el medio ambiente, el agua, el aire, etc., dando a la ciudad un aspecto sucio, desordenado” [12]; es por ello que el MINAM a través de la Resolución Ministerial N° 145-2019 declaró en emergencia la gestión y manejo de los residuos sólidos en los distritos de Chiclayo, José Leonardo Ortiz, La Victoria, Reque y Saña [13]. La Municipalidad Provincial de Chiclayo [14] indica que, de los 20 distritos de la provincia de Chiclayo, es Chiclayo misma la que más residuos municipales genera al día (Ver anexo N° 01); de las 202.24 ton/día de residuos sólidos que se generan, el 2.095% está formado por residuos a base de vidrio (Ver anexo N° 01); la tercera más abundante de los residuos reciclables posibles, solo después del plástico y el papel.

Frente a lo descrito anteriormente surge la interrogante ¿cuál es el contenido óptimo y granulometría más adecuada del vidrio reciclado molido como agente estabilizador de un suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer en Chiclayo para su uso como subrasante en pavimentos asfálticos urbanos? Se planteó como objetivo general determinar el tamaño y contenido óptimo de vidrio reciclado molido en la estabilización de suelos arcillosos para su uso como subrasante de pavimentos urbanos en la Urb. Ciudad de Chofer en Chiclayo. Como objetivos específicos se establecieron: (1) determinar y comparar las características físicas del suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer en estado virgen y con adiciones variables de vidrio molido (3%, 6% y 9%) y en diferentes granulometrías (300  $\mu\text{m}$  – 75  $\mu\text{m}$ ) mediante ensayos normalizados por el Manual de ensayos de laboratorio del MTC 2014; (2) determinar y comparar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer en estado virgen y con adiciones variables de vidrio molido (3%, 6% y 9%) y en diferentes granulometrías (300  $\mu\text{m}$  – 75  $\mu\text{m}$ ) mediante ensayos normalizados por el Manual de ensayos de laboratorio del MTC 2014, y (3) realizar un estudio de factibilidad para determinar qué tan viable es económica y constructivamente el desarrollo de esta investigación en un proyecto real de construcción vial.

La justificación de este trabajo viene enmarcada en los siguientes puntos: en el aspecto científico, se encontró necesario la realización de este proyecto puesto que a nivel local no se cuentan con investigaciones acerca del reaprovechamiento de residuos de vidrio para mejorar

los suelos arcillosos con fines de pavimentación flexible. Esta investigación busca brindar una alternativa de solución respecto a los suelos no aptos para la construcción, como el caso de las arcillas. En el aspecto social, se contribuye a mejorar la gestión de residuos sólidos, impulsando el reciclaje y reutilización, reduciendo así el perjudicial impacto visual y alteración del ornato de la ciudad, dando así una nueva y mejor imagen de Chiclayo.

En el aspecto económico, este proyecto podría llegar a ser muy beneficioso por tres razones, la primera, porque que el costo de reciclar y pulverizar vidrio para aplicarlo como un agente estabilizador, resulta más barato que usar cemento, cal u otros aditivos presentes en el mercado que también buscan mejorar las propiedades de un suelo arcilloso. Segundo, al usarse subrasantes estabilizadas, es claro que la vida útil del pavimento será mayor, reduciéndose así los costos de mantenimiento e incluso de reparación. Tercero, al usarse el terreno de la zona, se evitan los gastos de compra y transporte de material de préstamo. En el aspecto ambiental, al reciclar el vidrio y reutilizarlo como material de construcción se reducen los problemas ambientales generados por este material. Se impulsa así el desarrollo sostenible del país. En el aspecto técnico, esta investigación queda justificada puesto que el vidrio molido posee propiedades físicas y mecánicas similares a los de un árido fino, pudiendo contribuir a mejorar las propiedades de un suelo arcilloso.

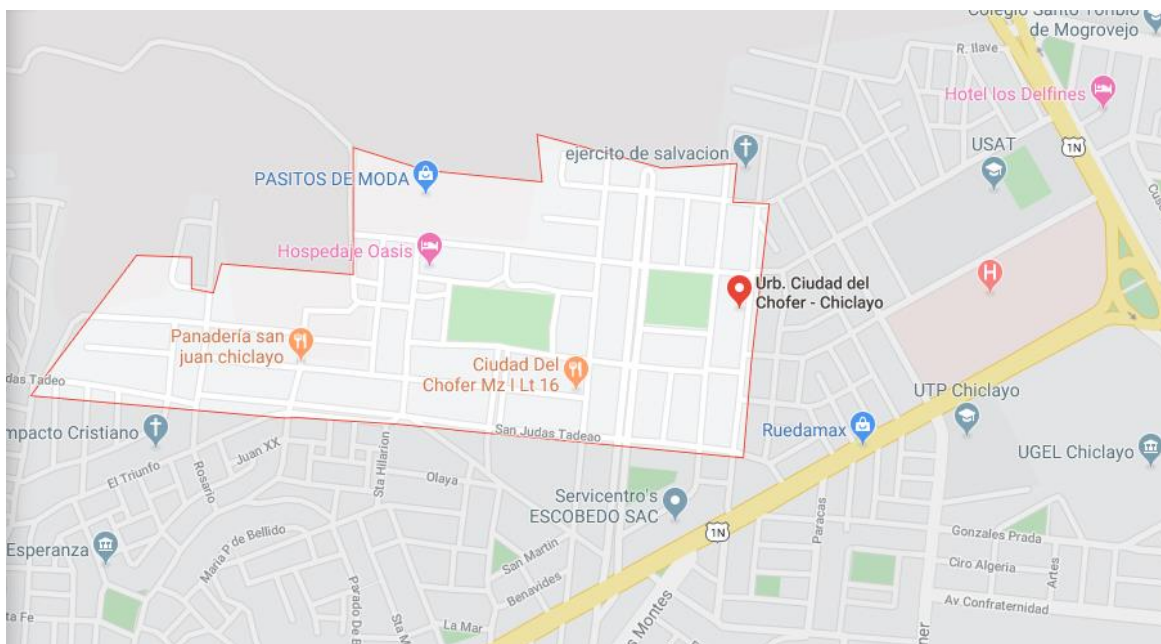
La presente investigación se limita al estudio del suelo arcilloso de la Urb. Ciudad de Chofer en Chiclayo. Se limita además exclusivamente a suelos de baja a mediana plasticidad, que no cumplen con los requisitos mínimos establecidos por la normativa vigente del MTC. Los suelos de elevada plasticidad no serán abarcados por este estudio, puesto que son suelos altamente expansivos y por ende no aptos para ser usados como subrasante (en estos casos es mejor optar por sustituir el material).

## 1.1. ZONA EN ESTUDIO

### 1.1.1. Ubicación de zona en estudio:

- Área de estudio: Urb. Ciudad del Chofer
- Distrito: Chiclayo
- Provincia: Chiclayo
- Departamento: Lambayeque
- País: Perú
- Coordenadas: 624703.2 E (6°45'43.8"S) - 9252397.2 N (79°52'17.8"W)

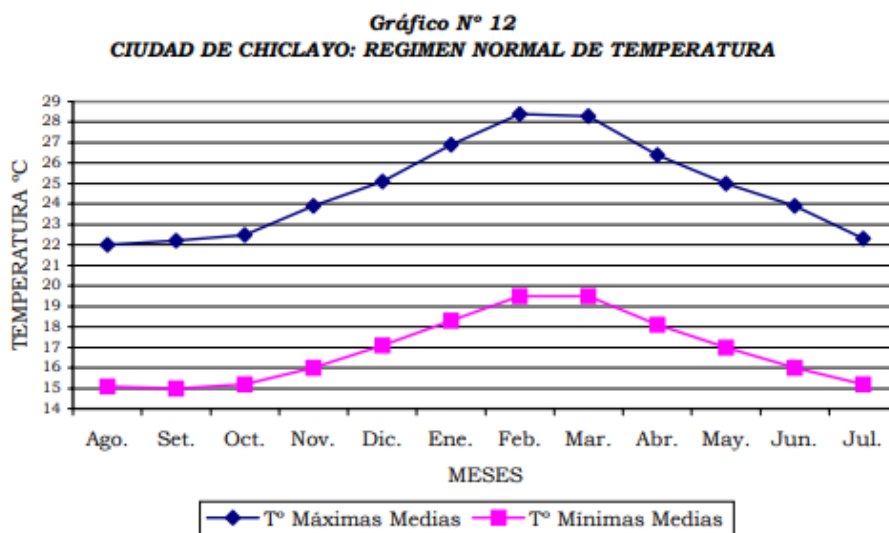
- Referencia: A espaldas del campus universitario Usat, frente a la zona de emergencias del Hospital Regional, a 100 metros de la Vía de Evitamiento.



*Ilustración 1: Ubicación de Urb. Ciudad del Chofer  
Fuente: Google maps*

#### 1.1.2. Clima:

- Clima: tipo desértico sub-tropical, templado durante las estaciones de primavera, otoño e invierno y caluroso en época de verano.
- Temperatura: la temperatura media anual es 22.3 ° C
- Humedad: La Humedad Relativa en la ciudad de Chiclayo, es alta con un promedio anual de 82%, con un mínimo de 61% y un máximo de 85%.
- Precipitaciones: precipitación pluvial promedio anual que varía entre 0.5 mm. y 24 mm.



*Ilustración 2: Temperatura en Chiclayo [4]*

### 1.1.3. Geomorfología:

- Topografía: Chiclayo presenta una topografía suave con ligeras elevaciones en la zona cercana a la Cruz de la Esperanza, sus cotas fluctúan entre los 24 y 30 m.s.n.m. Altitud media de 27 m.s.n.m.
- Geomorfología local: La zona en estudio está asentada sobre el Valle Chancay. Toda la zona en estudio, así como el resto de Chiclayo está emplazado sobre depósitos de suelos sedimentarios finos, heterogéneos y de unidades estratigráficas recientes.

### 1.1.4. Geotecnia:

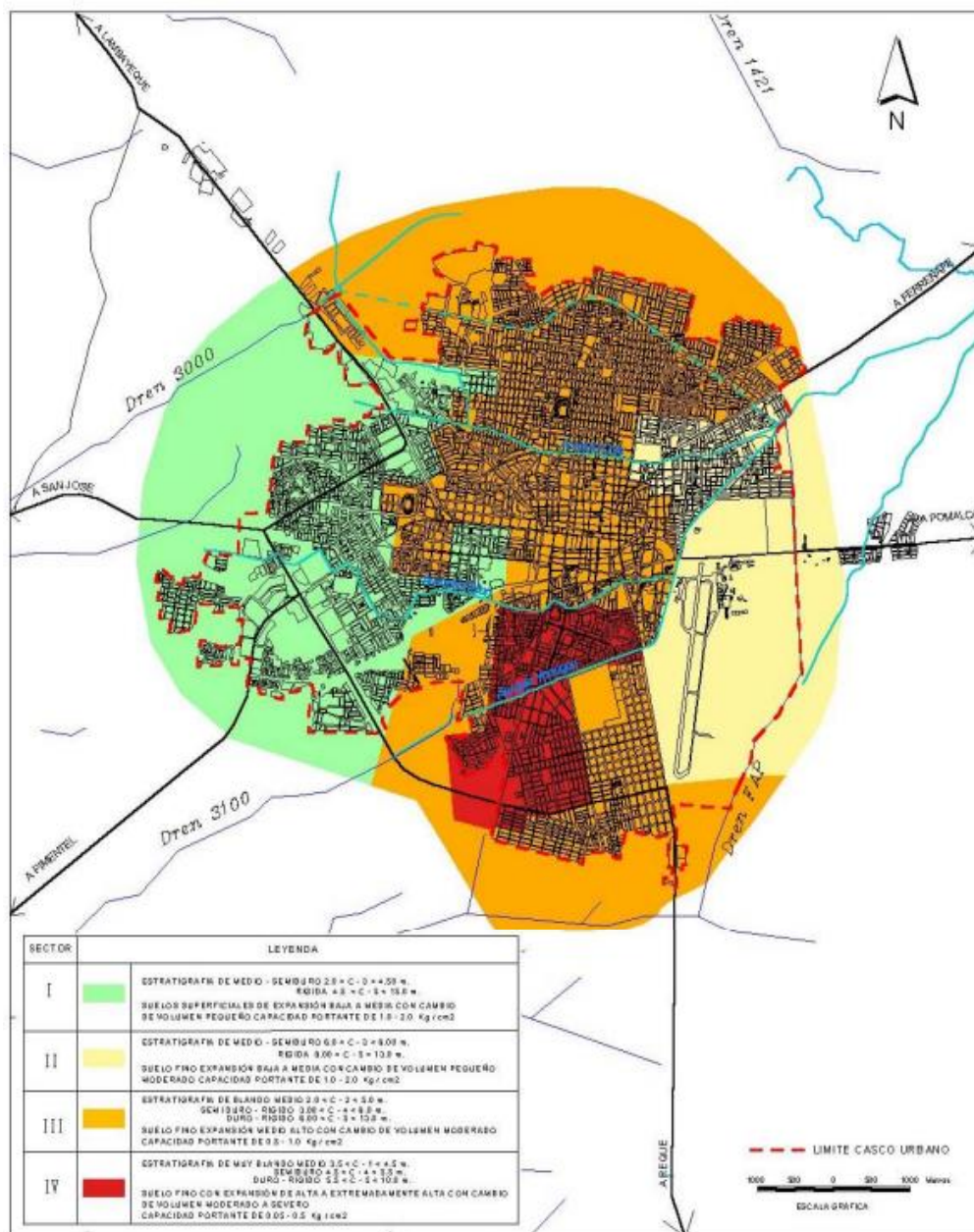


Ilustración 3: Microzonificación de Chiclayo [4]

La urbanización Ciudad del Chofer pertenece al Sector I de la microzonificación de INDECI (ver imagen N° 03), por ende presenta una estratigrafía de Medio a Semiduro hasta una profundidad de 2.0 - 4.5 m. seguido por un suelo rígido de 4.5 - 15.0 m de profundidad. Los suelos superficiales presentan expansión baja a media con cambio de volumen pequeño. La capacidad portante del suelo en este sector es de 1.0 – 2.0 kg/cm<sup>2</sup> (las viviendas típicas de 2 a 4 niveles, requieren una profundidad de cimentación de 1.50 m).

El tipo de suelo predominante en este sector son las arcillas del tipo CL y CH. El nivel freático en esta zonas varia entre los 2.00 a 7.00 m.

## **Revisión de literatura**

### *Antecedentes*

**Syed Aaqib Javed y Sudipta Chakraborty (2020)** en su investigación *“Effects of waste glass powder on subgrade soil improvement”* [15] realizada por Universidad de Ciencia y Tecnología de Ahsanullah y publicada en la revista World Scientific News, propone estabilizar suelos cohesivos usando vidrio residual en polvo en porcentajes 2%, 4%, 6%, 8% y 10% del peso seco del suelo. La muestra de suelo cohesivo se obtuvo mediante una calicata de 1.50 m de profundidad. Los residuos de vidrio se obtuvieron de una planta de procesamiento, se lavaron, secaron y trituraron; posterior a ello se pasó por el tamiz N° 200 (75 µm). Los ensayos de laboratorio realizados fueron: análisis granulométrico, límites de Atterberg, proctor modificado, CBR, corte directo y compresión no confinada. La normatividad seguida fue la ASTM (American Society for Testing and Materials).

Los resultados obtenidos fueron los siguientes: (1) el límite líquido (LL) y límite plástico (LP) disminuyeron continuamente y conforme el aumento de polvo de vidrio, de 49.52% a 33.9% y de 28% al 18.4%, respectivamente; (2) el índice de plasticidad (IP) decreció para todos los % de vidrio en polvo, reduciéndose en un 28% para el 10% de vidrio; (3) la máxima densidad seca (MDD) del suelo mejoró continuamente hasta un 8%, a partir de ahí se mantiene constante; (4) el contenido óptimo de humedad (OMC) disminuyó hasta un 67% para el 10% de polvo de vidrio; (5) el CBR para la condición no remojada y empapada aumentan significativamente conforme el aumento de vidrio en polvo hasta un 9.70 y un 6.70 veces, respectivamente; (6) la resistencia a la compresión no confinada (UCS) se incrementó de 63.2 KN/m<sup>2</sup> a 133.5 KN/m<sup>2</sup> con el aumento de polvo de vidrio hasta 8%, y luego disminuyó a 110.7 KN/m<sup>2</sup> cuando se agrega 10 % de vidrio en polvo; (7) la cohesión y el ángulo de fricción interna aumentan de manera continua con la adición de polvo de vidrio, de 42.7 KN/m<sup>2</sup> a

106.4 KN/m<sup>2</sup> y de 27.4 a 43.5, respectivamente. Esta investigación concluye que el porcentaje óptimo de polvo de vidrio residual para mejorar el suelo de subrasante es del 8%. No sugieren recomendaciones.

**Babatunde O.A., Sani J.E. y Sambo A.H. (2019)** en su investigación *“Black Cotton soil stabilization using glass powder”* [16] realizada por el Departamento de Ingeniería Civil de la Academia de Defensa de Nigeria, Kadura y publicada en la International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET), plantean el uso de polvo de vidrio como estabilizante de BCS (Black cotton soil) o suelos de algodón negro. Los BCS son un tipo de suelo arcilloso pesado, susceptible de ser expansiva por la presencia de montmorillonita en su mineralogía. Los autores utilizaron porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% (en peso seco del BCS) de vidrio en polvo. El suelo fue de color gris oscuro, obtenido mediante una excavación de 7 m de profundidad. El vidrio se obtuvo mediante reciclaje de botellas de gaseosa u otras bebidas; fue triturado manualmente y tamizado por la malla N° 200. Los ensayos realizados fueron: análisis granulométrico, límites de Atterberg, proctor modificado, CBR, compresión no confinada. Estas pruebas se realizaron de acuerdo al estándar británico.

Los resultados de la investigación fueron: (1) el límite líquido y límite plástico disminuyeron para todos los porcentajes de polvo de vidrio; el resultado más bajo de LL se dio para un 6% de vidrio en polvo y el de LP para un 8%; (2) el índice de plasticidad aumentó conforme el porcentaje de vidrio en polvo con un pico máximo para una adición del 8%; (3) la máxima densidad seca varió de acuerdo al % de polvo de vidrio, teniendo un aumento del 5% para una adición del 4% y una disminución del 1% para una adición del 6%; (4) el óptimo contenido de humedad disminuyó para 4%, 6% y 8% de polvo de vidrio, y aumentó para un 2%; (5) la resistencia a compresión no confinada mejoró para todos los casos, dando el valor más alto para una adición del 4% de polvo de vidrio, donde el aumento es de casi el 350%; (6) el CBR del suelo aumentó únicamente para un 6% de polvo de vidrio de 2% a 3.9%. Los autores sugieren hacer investigaciones respecto a la estabilización de BCS con cal además de usar polvo de vidrio.

**Zahra Mahdi y Al-Hassnawi (2018)** en su investigación *“Assessment of subgrade soil improvement by waste glass powder”* [17] realizada por el Departamento de Ingeniería de Carreteras y Transporte de la Universidad de Al-Qadisiyah en Iraq y publicada en la International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET), plantean el uso de CWG o Vidrio Residual Triturado (Crushed Waste Glass) como material estabilizante de suelos débiles. La dosificación propuesta fue de 3, 5, 7 y 9% (en peso de suelo seco) de vidrio

triturado que pase la malle N° 200 (75  $\mu$ m). El vidrio se obtuvo de botellas de vidrio, y fueron trituradas manualmente. Se trabajó con un suelo cohesivo pobre obtenido mediante calicatas, el cual se clasificó como A-7-5 (arcilla de baja plasticidad) de acuerdo con AASHTO o ML (limo de baja plasticidad) de acuerdo con SUCS. Los ensayos de laboratorio realizados fueron: análisis granulométrico, límites de Atterberg, CBR, resistencia al corte y resistencia a compresión confinada. La normatividad usada fue la ASTM (American Society for Testing and Materials).

Los resultados obtenidos fueron: (1) el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad disminuyeron conforme el porcentaje de CWG aumentaba, para un 9% de CWG el LL, LP e IP decrecieron en 48%, 40% y 71% respecto al suelo virgen; (2) la resistencia a compresión y corte del suelo mejoraron conforme el aumento de CWG, obteniéndose mejores resultados para el 7% de CWG, donde se obtuvo un aumento del 88% y 84.6% para la resistencia a compresión y resistencia a corte respectivamente; (3) los valores de CBR aumentaron 2.5, 3.3, 5.2 y 9.4 veces el soporte del suelo original cuando se agrega 3, 5, 7, 9% de CWG. Los autores concluyen que el porcentaje óptimo de CWG fue del 7% en peso de suelo seco. Recomiendan el uso de cal o cemento en adición a CWG para futuras investigaciones.

**Siyab Khan, Tufail y Mateeullah (2018)** en su investigación “*Effects of waste glass powder on the geotechnical properties of loose subsoils*” [18] realizada por la Universidad Sarhad de Ciencia y Tecnología de la Información en Pakistán y publicada en la Civil Engineering Journal (CEJ), proponen usar vidrio pulverizado, proveniente del reciclado, en proporciones de 4%, 8% y 12% en peso seco del suelo, como agente estabilizador. El vidrio fue tomado de la planta de procesamiento de vidrio en Hayatabad, Peshawar; se trituró manualmente para después ser pulverizado por la máquina de los Ángeles; se pasó luego por el tamiz N° 200 (75  $\mu$ m). La muestra se recolectó mediante calicatas y se clasificó de acuerdo con SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) como de tipo CL-ML (arcilla limosa de baja plasticidad). La investigación queda justificada puesto que el suelo se clasificó como de regular a mala calidad. Se realizaron ensayos de análisis granulométrico, gravedad específica, proctor estándar, límites de Atterberg, corte directo y CBR tanto al suelo virgen como al suelo estabilizado. La normativa utilizada fue la ASTM (American Society for Testing and Materials).

Los resultados fueron: (1) la máxima densidad seca (MDD) del suelo aumentó de manera continua hasta un 8% de polvo de vidrio, a partir de ahí se mantiene constante hasta

el 12% de adición; (2) el contenido óptimo de humedad (OMC) decreció continuamente con la adición de vidrio el polvo; (3) el límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) disminuyeron conforme el aumento de vidrio el polvo, con valores mínimos para el 12% de polvo de vidrio; (4) la gravedad específica (Gs) aumentó de manera continua con la adición de vidrio, con un valor máximo para el 12% de polvo de vidrio; (5) la cohesión del suelo decrece hasta un 8% de adición, a partir de ahí aumenta; (6) el ángulo de fricción del suelo aumenta hasta un pico de 8% de polvo de vidrio, a partir de ahí decrece; (7) el CBR del suelo aumenta de manera directa con la adición de vidrio en polvo. El incremento de la tasa en CBR fue de 11.56%, 8.97% y 5.98% a 4%, 8% y 12% de contenido de vidrio respectivamente. Se concluyó que la cantidad óptima de polvo de vidrio para mejorar suelos sueltos está en la vecindad al 8%. No se mencionan investigaciones futuras.

**Rose Benny et al. (2017)** en su investigación “*Effect of Glass Powder on Engineering Properties of Clayey Soil*” [19] realizada por el Departamento de Ingeniería Civil del Colegio de Ingeniería Amal Jyothi en la India y publicada en la International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), buscan solucionar la compresibilidad y expansibilidad de los suelos arcillosos y el problema de los residuos industriales no biodegradables (como el vidrio) en Kerala, India. La solución propuesta es realizar un estudio comparativo entre un suelo arcilloso en su estado natural (no estabilizado) y tratado con porcentajes variables de polvo de vidrio (2%, 4%, 6%, 8% y 10% en peso seco del suelo). El vidrio se obtuvo de botellas, vasos y ventanas, se lavó, trituró y se pasó por la malla N° 200 (75  $\mu$ m). El suelo arcilloso se recolectó mediante calicatas de 0.70 m de profundidad. Los ensayos realizados para caracterizar al suelo fueron: análisis granulométrico (por tamizado y con hidrómetro), límites de Atterberg, gravedad específica, proctor estándar, compresión no confinada, corte directo y CBR. La normativa de referencia fue la IS 2720 (Indian Standard: Methods of test for soils).

Los resultados fueron: (1) la máxima densidad seca (MDD) aumenta continuamente hasta un máximo de 6% de polvo de vidrio, a partir de ahí la curva decrece; (2) el contenido óptimo de humedad (OMC) se reduce para todos los casos, con un valor más bajo para el 6% de vidrio en polvo; (3) la cohesión y el ángulo de fricción del suelo aumentan conforme la adición de vidrio; (4) la resistencia a corte aumenta continuamente con la adición de vidrio en polvo; (5) el CBR del suelo aumentó para todos los casos, con un valor más alto para el 6% de adición de polvo de vidrio. Se concluyó que el contenido óptimo de vidrio en polvo se encuentra entre 6% y 8% del peso seco del suelo. No se mencionan investigaciones futuras.

**Nirmala R. y Shanmugapriya M. (2017)** en su investigación “*Feasibility study on enhancing the properties of subgrade material using waste glass*” [20] realizada por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Sathyabama en la India y publicada en la International Journal of Chemical Sciences, buscan específicamente mejorar la capacidad de carga y la resistencia al corte de subrasantes débiles, para ellos se adoptó 6 muestras posibles de vidrio - suelo (20% - 80%, 25% - 75%, 30% - 70%, 35% - 65%, 40% - 60% y 45% - 55%). La muestra de suelo se obtuvo mediante calicatas, fue de naturaleza arcillosa y se obtuvo en condición semi seca; el vidrio se obtuvo del reciclado de botellas de tiendas, se trituraron y se pasaron por el tamiz N° 50 (300  $\mu\text{m}$ ). Los ensayos realizados fueron: Proctor modificado, CBR y Corte directo.

Los resultados obtenidos fueron: (1) la máxima densidad seca del suelo (MDD) mejoró continuamente hasta un 40% de vidrio triturado, a partir de ahí este valor disminuye; (2) el contenido óptimo de humedad (OMC) disminuye conforme la adición de vidrio; (3) la relación de vacíos y la porosidad aumentaron de manera continua con la adición de vidrio molido; (4) el CBR del suelo para ambas condiciones (sumergida y no sumergida) mejora continuamente con la adición hasta de 40% de vidrio triturado, a partir de ahí los valores decrecen; (5) los mejores resultados de CBR se obtienen para la condición no sumergida; (6) la resistencia al corte del suelo mejora gradualmente con la adición de vidrio, el valor más alto se obtiene para un 40% de adición. Se concluyó que se puede reemplazar hasta un 40% de suelo arcilloso por vidrio pulverizado, pues para ese valor se obtienen los valores más altos de soporte (empapado y sin empapar) y resistencia al corte. No se mencionan investigaciones futuras

**Hanifi Canakci et al. (2016)** en su investigación “*Stabilization of clay with waste soda lime glass powder*” [21] realizada por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Gaziantep en Turquía, y publicada en el Simposio Mundial Multidisciplinario de Ingeniería Civil – Arquitectura – Planificación Urbana 2016, WMCAUS 2016; buscan impulsar el uso de materiales alternativos en la construcción. Para ello plantean el uso de residuos de polvo de vidrio de cal sodada (waste soda lime glass powder - WSLGP) en proporciones de 3%, 6%, 9% y 12% en peso seco del suelo para estabilizar un terreno arcilloso. La muestra de suelo arcilloso se obtuvo mediante la excavación de una calicata de 1.00 metro por debajo del nivel de suelo no orgánico. La investigación queda justificada pues el suelo natural se clasificó como arcilla de baja plasticidad (tipo CL según SUCS y tipo A-7 según clasificación AASHTO), cuyo CBR es 2.5%. El vidrio se obtuvo de botellas de agua disponibles en el mercado de Iraq; dichas botellas se lavaron, secaron y luego rompieron manualmente con

martillo y mortero, para después pasarla por el tamiz N° 200 (75  $\mu\text{m}$ ). La caracterización mineralógica arrojó que el vidrio estaba compuesto por un 74% de sílice. A las diferentes muestras de suelo tratado se le realizaron ensayos de: análisis granulométrico, gravedad específica, límites de Atterberg, proctor modificado, CBR, compresión no confinada y la prueba de hinchamiento. Se utilizó tanto la ASTM (American Society for Testing and Materials) como la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

Los resultados fueron: (1) la máxima densidad seca (MDD) del suelo aumentó de manera continua con la adición de polvo de vidrio, aumentando en 5.49% para un 12% de WSLGP; (2) el óptimo contenido de humedad (OMC) por el contrario, disminuyó conforme el aumento de vidrio en polvo, para un 12% de WSLGP se redujo en 21.6%; (3) El índice de plasticidad (IP) tuvo una disminución máxima del 44.05% para un porcentaje del 12% de WSLGP; (4) el CBR del suelo aumentó en un 140% para un contenido de WSLGP del 12%; (5) el porcentaje de hinchamiento del suelo disminuyó continuamente con la adición de WSLGP, dando el valor más bajo para el 12%; (6) los valores más altos de resistencia a la compresión no confinada (UCS) se obtuvieron para el 6% de polvo de vidrio y para tiempos de curado de 3, 7 y 28 días. No se mencionan sugerencias sobre investigaciones futuras.

**Ikara, Kundiri y Mohammed (2015)** en su investigación *“Effects of waste glass (WG) on the strength characteristics of cement stabilized expansive soil”* [22] realizada por la Universidad Abubakar Tafawa Balewa, Bauchi en Nigeria y publicada en la American Journal of Engineering Research (AJER), plantean el uso de WG (waste glass) o vidrio residual como estabilizante secundario, junto con cemento portland, para mejorar un suelo de algodón negro (BCS). Para ellos proponen el uso de 2, 4, 6 y 8% de cemento y 5, 10, 15 y 20% de WG en peso del suelo seco. El suelo se clasificó como A-7-5 (arcilla de baja plasticidad) y CH (arcilla de alta plasticidad) de acuerdo con AASHTO y UCS respectivamente. El vidrio fue obtenido mediante reciclaje; se trituró manualmente y se tamizó por la malla N° 50 (300  $\mu\text{m}$ ). Los ensayos de laboratorio realizados fueron: análisis granulométrico, límites de Atterberg, proctor estándar, CBR y resistencia a compresión no confinada. Siguió los estándares de las normas BS (British standard). En laboratorio se evaluaron una combinación de todos los porcentajes de cemento portland y vidrio residual.

Los resultados obtenidos fueron: (1) el índice de plasticidad (IP) decreció conforme el aumento de cemento y vidrio residual triturado, el valor más bajo se dio para un 8% de cemento y 20% de vidrio residual (de 30.6 a 10.8%); (2) la máxima densidad seca (MDD) del

suelo mejoró para todas las combinaciones de cemento y vidrio, teniendo un valor pico para un 8% de cemento y 20% de vidrio residual (de 1.40 a 1.63 g/cm<sup>3</sup>); (3) el contenido óptimo de humedad (OMC) disminuyó continuamente con el contenido de cemento y vidrio; (4) la resistencia a compresión no confinada (UCS) obtuvo su valor más alto a los 7 días de curado al 8% de cemento y 20% de vidrio residual, a los 14 días de curado al 8% de cemento y 10% de vidrio residual, y a los 28 días de curado al 8% de cemento y 5% de vidrio residual; (5) el CBR para ambas condiciones (sumergida y no sumergida) mejoró continuamente con la adición de cemento y vidrio residual, dando un mejor valor para un 8% de cemento y 20% de vidrio residual para ambas condiciones. Los autores no concluyen con un contenido óptimo de cemento portland y vidrio residual triturado. No sugieren recomendaciones.

**Nuruzzaman y Akhtar Hossain (2014)** en su investigación *“Effect of soda lime glass dust on the properties of clayey soil”* [23] realizado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Ingeniería y Tecnología de Rajshahi, Bangladés y publicada en la Global Journal of Researches Engineering, propone el uso de polvo de vidrio de cal sodada como agente estabilizante de un suelo arcilloso. Para ellos proponen el uso de 3%, 6%, 9% y 12% de polvo de vidrio. La muestra de suelo se obtuvo mediante una calicata de 2 pies de profundidad (0.60 m); y de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), fue de tipo CL o arcilloso de baja plasticidad. El vidrio fue reciclado, se trituró de manera manual y se tamizó a través de la malla N° 50 (300 µm). Los ensayos de laboratorio realizados fueron: análisis granulométrico, gravedad específica, límites de Atterberg, proctor estándar, consolidación y compresión no confinada. La normatividad seguida fue la ASTM (American Society for Testing and Materials).

Los resultados fueron los siguientes: (1) la máxima densidad seca del suelo aumentó conforme el contenido de polvo de vidrio, dando un valor de 1.84 g/cm<sup>3</sup> para un 12% de adición de vidrio en polvo; (2) el contenido óptimo de humedad disminuyó con el aumento de los porcentajes de vidrio en polvo, dando un mínimo de 12.7% para un 12% de polvo de vidrio; (3) el índice de plasticidad decreció con el aumento de vidrio en polvo, reduciéndose hasta un 37% (12% de vidrio en polvo) respecto al suelo original; (4) los índices de compresión e hinchamiento disminuyen conforme el aumento de polvo de vidrio, teniendo sus valores mínimo para un 12% de adición de vidrio; (5) la resistencia a compresión no confinada decrece con el aumento de polvo de vidrio. Los autores sugieren calentar las muestras de suelo con vidrio triturado hasta alcanzar el punto de fusión del vidrio, y también realizar estudios de viabilidad económica respecto a estabilizar suelos con vidrio triturado.

**J. Olufowobi et al. (2014)** en su investigación “*Clay soil stabilisation using powdered glass*” [24] realizada por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Federal de Tecnología Akure en Nigeria y publicada en la Journal of Engineering Science and Technology, buscan mejorar la mala calidad de las arcillas como suelo de fundación usando vidrio triturado proveniente del reciclado de botellas, agregado en porcentajes de 1%, 2%, 5%, 10% y 15% en peso seco del suelo junto con un porcentaje de cemento base del 15%. El vidrio se recogió de embotelladoras locales, se lavaron, secaron y luego trituraron manualmente con un martillo y para luego ser tamizado por la malla N° 400 (38  $\mu\text{m}$ ). La muestra de suelo se obtuvo de una calicata de 0.70 m de profundidad. Se realizaron ensayos en el suelo virgen y en el suelo tratado de: análisis granulométrico, gravedad específica, límites de Atterberg, proctor modificado, corte directo y CBR. La normativa usada fue la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y de acuerdo a ella el suelo se clasificó como perteneciente al grupo A-6 (arcillas plásticas).

Los resultados obtenidos fueron: (1) la máxima densidad seca del suelo (MDD) aumentó de manera continua hasta un 5% de vidrio triturado y 15% de cemento base, a partir de ahí la curva decrece; (2) el contenido óptimo de humedad (OMC) disminuyó de manera continua y para todos los casos de adición de vidrio y cemento; (3) el CBR para las condiciones sumergida y no sumergida, aumentaron para todos los casos, con valores más altos para un 5% de vidrio triturado y 15% de cemento base; (4) la cohesión y ángulo de fricción del suelo aumentaron para todos los casos, teniendo valores más altos para un 10% de vidrio triturado y 15% de cemento base. Concluyeron que la cantidad óptima de vidrio triturado se encuentra entre 5% y 10%. Sugieren investigaciones futuras para determinar la cantidad óptima de polvo de vidrio que aparentemente parece estar entre el 5% y 10%.

## **Bases teóricas**

### **Suelos**

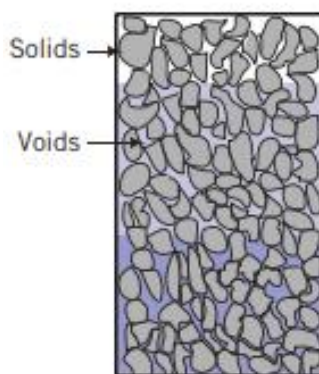
#### **1. Definición:**

El suelo es el material de construcción más abundante y de mayor uso a nivel global. Su definición depende de la rama científica desde la que se vea; así por ejemplo, para el agrónomo el suelo será “la parte superficial de la corteza capaz de sustentar vida vegetal” [25]; para el geólogo, “es todo material intemperizado en el lugar en que ahora se encuentra y con contenido de materia orgánica cerca de la superficie” [25]. Desde el punto

de vista geotécnico, estas definiciones se quedan cortas, puesto que no consideran muchas de las situaciones que son de interés en la ingeniería civil.

Desde un punto de vista general, el suelo se podría definir como “la cubierta superficial de la tierra donde el hombre edifica sus viviendas, infraestructuras y otras obras buscando su bienestar y desarrollo” [26]. En un sentido más estrictamente geotécnico, el suelo se define como “todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves... quedan excluidas de la definición las rocas... y los depósitos sedimentarios altamente cementados...” [25].

En esa misma línea, Braja, M. Das define al suelo como “el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) con líquido y gas en los espacios vacíos entre las partículas sólidas” [2]. La norma CE.020 de Suelos y taludes define la palabra suelo como aquellos “agregados naturales de partículas minerales granulares y cohesivas separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación de agua” [27]. Budhu plantea la siguiente definición “Los suelos son materiales que se derivan de la erosión de las rocas” [28].



(a) Soil

*Ilustración 4: Estructura del suelo [28]*

## 2. Propiedades de los suelos:

Los suelos tienen propiedades físicas y mecánicas en función de los materiales predominantes en su constitución, así como del tamaño, forma, textura, color y peso de sus partículas [26]. Es por ello que para la construcción de vías la normativa nacional obliga conocer ciertas propiedades del suelo de fundación, entre ellas tenemos:

- A) Granulometría: de acuerdo con el MTC 2014, “representa la distribución de los tamaños que posee el suelo mediante el tamizado... tiene por finalidad determinar la proporción

de sus diferentes elementos constituyentes, clasificados en función de su tamaño”. En ese sentido, el suelo se puede clasificar de acuerdo al siguiente cuadro:

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

Tabla 1: Clasificación de suelos de acuerdo al tamaño de las partículas de suelo [29]

Según el Manual de ensayo de materiales del MTC, este ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas de un suelo. La Municipalidad provincial de Mariscal Nieto dice sobre la granulometría que “se refiere al tamaño de los elementos que componen el suelo... según el tamaño de los componentes podemos distinguir suelos finos o gruesos”. Para conocer la distribución de grano de un suelo es necesario obtener la curva granulométrica, ello se realiza el ensayo de granulometría por tamizado o por medio del hidrómetro (MTC E107 y MTC E109 respectivamente). La forma de la curva granulométrica determina si un suelo está bien o mal graduado, o si tiene una distribución continua o discontinua (Ver ilustración N° 05).

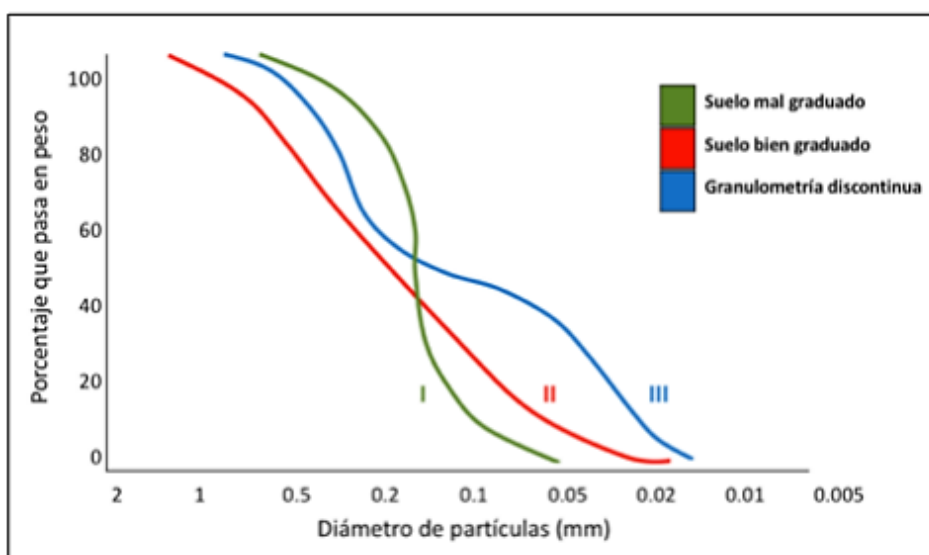


Ilustración 5: Formas de la curva de distribución granulométrica [30]

B) La Plasticidad: es una propiedad física en la que la fracción fina de un suelo (o el total de un suelo cohesivo) al entrar en contacto con un determinado contenido de agua, se

comporta como un sólido o incluso hasta como un líquido [26]. Con un contenido de humedad muy bajo, la masa de suelo se comporta más como un “sólido quebradizo”, al aumentar drásticamente la humedad el suelo pierde totalmente su resistencia mecánica y se comporta como un líquido [2]. El análisis granulométrico no permite apreciar esta característica, por lo que es necesario determinar los límites de Atterberg (Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) [29].

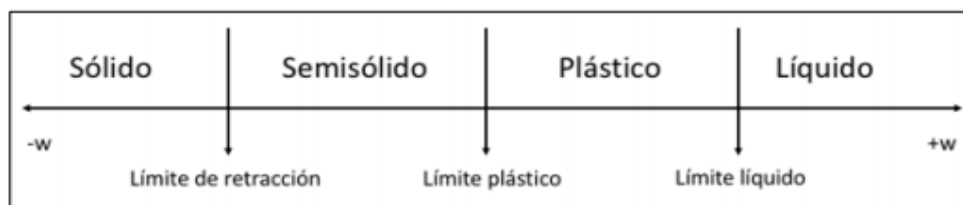


Ilustración 6: Comportamiento del suelo según su humedad [30]

Los límites de Atterberg permiten saber “cuán sensible es el comportamiento de un suelo en relación con su contenido de humedad (agua); definiéndose los límites correspondientes a los tres estados de consistencia según su humedad... líquido, plástico o sólido” [29].

- Límite líquido (LL), cuando el suelo pasa del estado semilíquido a un estado plástico y puede moldearse [29]. Se determina mediante la cuchara de Casagrande.
- Límite plástico (LP), cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido y se rompe [29].
- Límite de contracción (retracción), cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y deja de contraerse al perder humedad [29].

El índice plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y límite plástico de un suelo. Cuanto mayor es el índice de plasticidad, mayor es el rango de humedades para la cual el suelo se comporta de manera plástica.

$$PI = LL - PL$$

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

Tabla 2: Clasificación de suelos de acuerdo al índice de plasticidad IP [29]

Los suelos que presentan rasgos elevados de plasticidad son considerados como inadecuados para construcción. Reconocer este tipo de suelos in situ es sencillo, solo se necesita humedecerlos y manipularlos, un suelo plástico se comporta como plastilina, mientras que si se desmorona se trata de un suelo no plástico.

Cabe resaltar que un suelo plástico es menos permeable que un suelo no plástico (caso de arcillas y limos, ambos son suelos finos, sin embargo, las arcillas son totalmente impermeables, mientras que los limos son semi-impermeables). La permeabilidad se podría como “la facilidad con que el agua puede fluir a través de los poros y discontinuidades de un suelo o macizo rocoso” [27]. Un suelo poco permeable genera problemas de drenaje, obligando a recurrir a métodos poco convencionales para desaguar.

- C) Humedad natural: es una característica muy importante, según el MTC 2014 indica que la resistencia de los suelos de subrasante (especialmente finos) se encuentra asociada con las condiciones de humedad y densidad que éstos presentan. Conocer la humedad natural del suelo permitirá comparar ésta con la humedad óptima que se obtiene del ensayo de Proctor modificado. Si la humedad natural resulta igual o inferior a la humedad óptima, se propone la compactación normal del suelo y el aporte conveniente de agua. Si la humedad fuera superior a la óptima, es necesario aumentar la energía de compactación, airear el suelo o reemplazar el material saturado [29].
- D) Capacidad de soporte: De acuerdo con la CE.020 del RNE, la capacidad de soporte es “la resistencia que presenta el material subrasante con fines de diseño de pavimentos” [27]. La capacidad de soporte o nivel de rigidez de un suelo se determina por el módulo elástico o resiliente del material de fundación. Es un parámetro estandarizado para el diseño de pavimentos. El módulo de resiliencia es “una medida de la propiedad elástica del suelo... se puede usar directamente en el diseño de pavimentos flexibles, pero debe convertirse a módulo de reacción de la subrasante (valor k), para el diseño de pavimentos rígidos o compuestos” [31].

A pesar de ello, es común en nuestro medio realizar el ensayo de CBR (California Bearing Ratio), y mediante fórmulas de correlación se determina el módulo resiliente del suelo. El valor de CBR es el valor de soporte o resistencia del suelo y está referido al 95% de la Máxima densidad seca y a una penetración de 2.54 mm (0.1”).

### 3. Clasificación de suelos:

Después de determinar las características antes mencionadas, es posible estimar acertadamente el comportamiento de los suelos y clasificarlos de acuerdo a su granulometría y a su consistencia. El MTC 2014 en su Manual de carreteras plantea los sistemas de clasificación de suelos en base a la normativa AASHTO y SUCS. Esta clasificación tiene por objeto “predecir el comportamiento aproximado de los suelos, que contribuirá a delimitar los sectores homogéneos desde el punto de vista geotécnico” [29].

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

Tabla 3: Correlación entre clasificación de suelos AASHTO - SUCS [29]

### Suelos arcillosos

#### 1. Definición:

Las arcillas son “en su mayoría partículas en forma de láminas microscópicas y sub-microscópicas de mica, minerales de arcilla y otros minerales... las arcillas se definen generalmente como partículas menores de 0.002 mm” [2]. En ese sentido, un suelo arcilloso es clasificado así en base al tamaño de su grano y a su plasticidad y no necesariamente por los minerales que contenga. Braja M. Das citando a Grim (1953) dice que las arcillas se definen como aquellas partículas “que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua” [2]. La plasticidad es la propiedad de las arcillas por la que al entrar en contacto con ésta, se comportan como masilla o plastilina. Esta propiedad está íntimamente ligada con la resistencia del suelo y su nivel de expansión.

**Tabla 2.3** Límites de separación de tamaño de suelo

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

*Tabla 4: Clasificación de suelos de acuerdo al tamaño de partícula [2]*

## 2. Características:

- A) **Plasticidad:** es una de las propiedades características de los suelos arcillosos (y finos en general). Es gracias a esta propiedad que dichos suelos pueden modificar su consistencia (resistencia al corte) en función a la humedad. Esta propiedad se da cuando se forman películas de agua alrededor de las partículas de arcilla, los cuales tienen un efecto lubricante que hace que el suelo húmedo no resista esfuerzos cortantes conforme aumente el espesor de la lámina de agua. La plasticidad se ve afectada por ciertos factores como: el contenido de agua, el tamaño de las partículas, forma y estructura de las partículas, presencia de materia orgánica, disposición de las partículas, etc.
- B) **Hinchamiento:** o expansividad, es el aumento de volumen del material de suelo causado por la absorción de agua (retención de agua en los poros). Este fenómeno es característico de arcillas esmectitas y principalmente de las montmorillonitas. Se da cuando el agua ingresa en los poros del suelo, haciendo que las láminas se separen, originando fuerzas electrostáticas de repulsión entre las láminas, lo que contribuye al proceso de hinchamiento llegando a separar completamente unas láminas de otras. La retracción es el fenómeno contrario, disminución de volumen producto de la expulsión de agua.
- C) **Superficie específica:** la superficie específica es la relación entre la superficie de una partícula de suelo y su masa. Los suelos arcillosos al tener partículas bastante finas tienen una superficie específica alta (a comparación de suelos granulares). Es un parámetro de

suma importancia cuando se quiere estimar la interacción de las partículas de arcilla con el entorno.

- D) Tixotropía: es un fenómeno por el que las arcillas (denominadas tixotrópicas) pierden sus propiedades mecánicas al ser amasados, llegando a comportarse como líquidos; si embargo, recuperan dichas propiedades al dejárseles en reposo. Esta propiedad es característico de las arcillas; en el caso de las arenas es común el fenómeno de colapso. La tixotropía de un material está en función del tiempo de reposo del material, de lo difícil de su condiciones originales, su contenido de agua y la porosidad del material

### **Estabilización de suelos**

#### **1. Definición:**

De acuerdo con la CE.010 del RNE, la estabilización de suelos es aquel “proceso físico y/o químico por el que se mejoran las propiedades físico-mecánicas del suelo natural en corte o de los materiales de préstamos en relleno, con el objeto de hacerlos estables” [31]. Para estabilizar un suelo a nivel de subrasante es necesario hacer uso de un agente estabilizador, que es el “producto adicional diferente al suelo que se le añade con la finalidad de mejorar sus propiedades físico-mecánicas” [31].

Para el Manual de carreteras del MTC 2014, la estabilización de suelos es “el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos” [29]. Los procesos de estabilización se realizan sobre suelos de subrasante calificados como inadecuados o pobres en base a su CBR. Los más conocidos procesos de mejoramiento de suelos son los que usan cemento, cal y asfalto, seguido siempre de un proceso de compactación. Lo que se busca en un suelo estabilizado o tratado es una buena resistencia mecánica, y que ésta se mantenga en el tiempo.

#### **2. Criterios normativos para estabilizar un suelo:**

El Manual de carreteras: suelos y pavimentos del MTC 2014 plantea 6 criterios geotécnicos para definir si es necesario estabilizar o no un suelo de subrasante, éstos son:

- Será necesario estabilizar los suelos de subrasante cuyo valor de CBR sea inferior al 6% (subrasante considerada como pobre o inadecuada); también aquellos que presenten zonas húmedas locales o áreas blandas. Será materia de estudio el determinar

la técnica de mejoramiento óptimo en base al tipo de suelo y en favor de la economía de la obra.

- Cuando la subrasante sea arcillosa o limosa y exista peligro de que las capas granulares del pavimento se contaminen con sus partículas finas, deberá proyectarse una capa de material anticontaminante de espesor mínimo de 10 cm o un geotextil (a criterio del ingeniero).
- La superficie de la subrasante debe estar por encima del nivel freático como mínimo: 0.60 m para una subrasante extraordinaria o excelente ( $CBR > 20\%$ ); 0.80 m para una subrasante buena y regular ( $6\% < CBR < 20\%$ ), 1.00 m y 1.20 m para subrasantes calificadas como pobre e inadecuada respectivamente ( $CBR < 6\%$ ).
- En zonas por encima de los 4000 msnm, se evaluará la susceptibilidad a congelamiento del suelo, la cual está influenciada por la profundidad del nivel freático. Son susceptibles al congelamiento los suelos limosos y aquellos que contienen más del 3% de su peso de un material de tamaño inferior a 0.02 mm.
- Para definir el tipo de estabilización es necesario determinar el tipo de suelo existente. Los suelos que en general se encuentran en este ámbito son los limosos y arcillosos, también las arenas limosas o arcillosas.
- Los factores a tomar en cuenta para seleccionar el método de estabilización más óptimo son: el uso y tipo de suelo a estabilizar, tipo de aditivo estabilizador, experiencia con el aditivo estabilizador, disponibilidad del aditivo estabilizador y el equipo adecuado, economía. El MTC presenta el siguiente diagrama para determinar el método apropiado de mejoramiento:

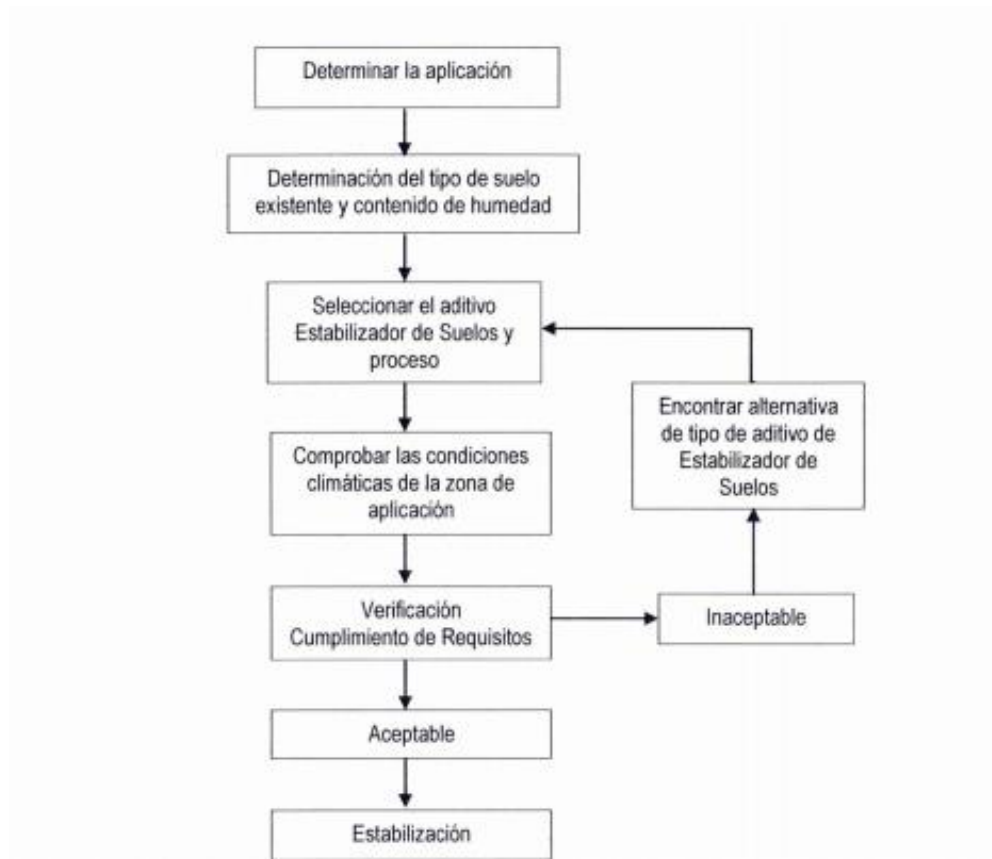


Ilustración 7: Proceso de selección del Tipo de estabilización [29]

### 3. Tipos de estabilización:

A) Estabilización mecánica: Este tipo de estabilización mejora el material de subrasante sin cambiar la estructura y composición básica de la misma. Busca aumentar la resistencia al corte del suelo (mejorando así su estabilidad), disminuir la compresibilidad, permeabilidad y potencial de expansión-contracción (reduciendo asentamientos y evitando congelamiento) [27]. Usa como herramienta de estabilización la compactación, que es el proceso por el que se reduce el volumen de vacíos presentes en el suelo [29]. Para ello es necesario determinar la energía de compactación óptima (además de la humedad óptima de compactación con la que se obtiene la máxima densidad seca del suelo), obtenido por correlación de datos del ensayo de Proctor modificado o estandar. La fórmula de correlación es:

$$E = (N. n. P. h) / V$$

Donde:

E = Energía de compactación  
 N = Número de golpes por capa  
 n = Número de capas de suelo  
 P = Peso del pisón  
 h = Altura de caída libre del pisón  
 V = Volumen de suelo compactado

*Ilustración 8: Fórmula para determinar energía de compactación [27]*



*Ilustración 9: Estabilización mecánica en campo*

*Fuente: Google imágenes*

- B) Estabilización por combinación de suelos: considera la combinación o mezcla de los materiales del suelo existente con materiales de préstamo. El procedimiento sugerido por la MTC 2014 es el siguiente: El suelo existente se disgregará en una profundidad de 15 cm y luego se colocará el material de préstamo, ambos se humedecerán o airearán hasta alcanzar la humedad apropiada de compactación y previa eliminación de partículas de 75 mm. Se procederá luego al mezclado de ambos suelos y finalmente se compactará hasta el nivel de subrasante fijado.
- C) Estabilización con cal: se obtiene por mezcla íntima de suelo y cal. La cal usada es la cal viva o anhídrica (óxido cálcico), o bien la apagada o hidratada (hidróxido cálcico); ambas calces son aéreas, pues se endurecen en el aire una vez mezcladas con agua. Como la mayoría de suelos contienen sílice y aluminio silicatos, la incorporación de cal viva o apagada y agua en cantidad determinada permite obtener propiedades de suelo deseadas [29].

El Manual de Carreteras del MTC 2014 indica que uno de los efectos más importantes de la cal en el suelo, es el de cambiar apreciablemente su plasticidad. También aumenta la humedad óptima de compactación, lo que permite la densificación de suelos de elevada humedad natural. Los suelos más apropiados para estabilizar con cal

son los de granulometría fina de cierta plasticidad, pues así se vuelve más friable y granular. Es de vital importancia el curado durante el proceso de colocación de capas, pues un descuido en ellos puede generar problemas de fisuramiento de las bases tratadas [29].

La dosificación depende del tipo de suelo. Según la CE.020 indica que es común agregar porcentajes entre el 2% y 8% de cal por peso seco del suelo. Además indica que “por ningún motivo se debe emplear más del 8% de cal en el suelo, ya que se aumenta la resistencia pero también su plasticidad” [27]. Recomendado para suelos con un índice de plasticidad comprendido entre 10 y 50.



*Ilustración 10: Estabilización con cal en campo*

*Fuente: Google imágenes*

- D) Estabilización con cemento: “se obtiene por la mezcla íntima de un suelo suficientemente disgregado con cemento, agua y otras eventuales adiciones, seguida de una compactación y un curado adecuados” [29]. Con este proceso se logra que el suelo suelto quede más endurecido. Cabe resaltar que la masa de suelo-cemento tiene una resistencia inferior y un módulo de elasticidad más bajo que la del concreto, esto se debe a que las partículas de suelo no están envueltos en pasta de cemento, sino que están “puntualmente unidos entre sí”.

El contenido óptimo de agua se determina mediante el ensayo de Proctor modificado. Esta técnica de estabilización es aplicable a suelos granulares con finos de baja a media plasticidad ( $IP < 18$ ). Cabe señalar que la resistencia de la masa suelo-cemento aumenta con el contenido de cemento y la edad de la mezcla. El Manual de

carreteras del MTC 2014 plantea el siguiente cuadro de rango de dosificaciones de cemento en función del tipo de suelo:

Clasificación de suelos AASHTO	Rango usual de cemento requerido Porcentaje del peso de los suelos
A-1-a	3-5
A-1-b	5-8
A-2	5-9
A-3	7-11
A-4	7-12
A-5	8-13
A-6	9-15
A-7	10-16

Tabla 5: Rango de cemento requerido en Estabilización suelo-cemento [29].

Al igual que en la estabilización con cal, un curado inadecuado de la capa tratada en el período previo a la colocación de la siguiente capa genera problemas de fisuramiento de las bases tratadas. Este fenómeno se agrava en lugares caluroso. La norma CE.020 indica que se debe verificar que el contenido de finos (que pasan el tamiz N° 200) se encuentre entre el 5% y 35%.

La normativa indica que se puede usar cualquier tipo de cemento; para zonas con bajas temperaturas, el cemento usado serpa de fraguado rápido o con cloruro de calcio como aditivo. Además, el espesor mínimo de la capa estabilizada será de 10 cm [29]. De acuerdo con la CE.020 [29] si se quiere obtener una estabilización tipo flexible, el porcentaje entre 1% y 4%; para el caso de estabilización tipo rígida, el porcentaje aumenta a un rango entre el 6% y 14%.



Ilustración 11: Estabilización con cemento en campo

Fuente: Google imágenes

- E) Estabilización con cloruro de sodio: “la sal es un estabilizante natural... cuya propiedad fundamental es absorber la humedad del aire y de los materiales que le rodean... mejorando la cohesión del suelo” [29]. En construcción, el principal uso de la sal es como controlador de polvo en bases y superficies de rodadura para tránsito ligero.

Este método de mejoramiento de suelos es adecuado para suelos con un índice de plasticidad mayor a 8%, con un tamaño máximo de agregado grueso menor a 1/3 del espesor de la capa a compactar. La cantidad óptima de sal para estabilizar un suelo se determina mediante pruebas de laboratorio, sin embargo, dicha cantidad generalmente está comprendida entre 50 y 80 kg/m<sup>3</sup> de suelo a mejorar [29].



*Ilustración 12: Estabilización con cloruro de sodio en campo*

**Fuente:** Google imágenes

- F) Estabilización con asfalto: “se empleará asfalto o bitumen para lograr propiedades impermeabilizantes, adhesivas y de preservación en el suelo” [27]. El contenido de asfalto depende de la granulometría, plasticidad, densidad y otras propiedades del suelo. Así por ejemplo se presenta el siguiente cuadro para estimar el porcentaje de asfalto a usar de acuerdo al peso específico del material:

Contenido de asfalto (%)	0	2	4	6	8	10
Peso Específico del Material (gr/cm <sup>3</sup> )	1.75	1.71	1.68	1.66	1.64	1.64

*Tabla 6: Contenido de asfalto para estabilizar [29].*

El Manual de Carreteras de la MTC 2014 afirma que la dosificación depende de la granulometría del suelo, suelos finos requieren mayor cantidad de asfalto, siendo para los suelos plásticos muy finos un método poco económico. Por ello, los suelos más adecuados para ser estabilizados con este método son los granulares con pocos finos (porcentaje de partículas que pasan la malla N° 200 menor al 20%) y de reducida plasticidad (IP < 10). En general la cantidad de asfalto varía entre un 4% y 7%.

La norma CE.020 del RNE plantea el siguiente cuadro resumen sobre los métodos de estabilización más adecuados de acuerdo al tipo de suelo de la subrasante:

MATERIAL	TIPOS DE ESTABILIZACIÓN			
	MECÁNICA	CON CEMENTO	CON CAL	CON EMULSIÓN
<b>Grava</b>	Puede ser necesaria la adición de finos para prevenir desprendimiento.	Probablemente no es necesaria, salvo si hay finos plásticos. Cantidad de 2 a 4%.	No es necesaria, salvo que los finos sean plásticos. Cantidad de 2 a 4%.	Apropiada si hay deficiencia de finos. Aproximadamente 3% de asfalto residual.
<b>Arena limpia</b>	Adición de gruesos para dar la estabilidad y de finos para prevenir desprendimientos.	Inadecuada: produce material quebradizo.	Inadecuada: no hay reacción.	Muy adecuada: De 3 a 5% de asfalto residual.
<b>Arena arcillosa</b>	Adición de gruesos para mejorar resistencia.	Recomendable 4 - 8%	Es factible dependiendo del contenido de arcilla.	Se puede emplear de 3 a 4% de asfalto residual.
<b>Arcilla arenosa</b>	Usualmente no es aconsejable	Recomendable 4 - 12%	4 a 8% dependiendo del contenido de arcilla.	Se puede emplear pero no es muy aconsejable.
<b>Arcilla</b>	Inadecuada	No es muy aconsejable. La mezcla puede favorecerse con un mezcla con 2% de cal y luego entre 8 y 15% de cemento.	Muy adecuada. Entre 4 y 8% dependiendo de la arcilla.	Inadecuada.

Tabla 7: Alternativas de estabilización en función del tipo de suelo [27]



Ilustración 13: Estabilización con asfalto en campo

Fuente: Google imágenes

## Vidrio

### 1. Definición:

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018) define al vidrio como “una sustancia sólida, sobrefundida, amorfa, dura, frágil, que es un complejo químico de silicatos sólidos y de cal que corresponde a la fórmula:  $\text{SiO}_2 (\text{Na}_2\text{O})^m (\text{CaO})^n$ ”. La misma institución indica que los silicatos ( $\text{SiO}_2$ ) provienen de las arenas (sílice, limpia y seca); el  $\text{Na}_2\text{O}$  del carbonato o sulfato de sodio y el  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  de la caliza natural y la dolomita; dichos elementos se funden a  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  aproximadamente para dar lugar al vidrio.

En un sentido más detallado, Morales Ortega (2017) citando a E. Mari nos dice que “los vidrios son materiales sólidos que se obtienen por enfriamiento rápido de una masa fundida, impidiendo su cristalización”. El vidrio que todos conocemos es un material transparente, frágil y duro, no biodegradable y 100% reutilizable un número infinito de veces. Está siendo más utilizado en estos últimos años debido a que posee una elevada resistencia química.

La ASTM C162 (2015) define al vidrio como “producto inorgánico fundido que se ha enfriado hasta un estado rígido sin experimentar cristalización”.

### 2. Composición del vidrio:

Morales Ortega (2017) presenta 5 grupos básicos de composición del vidrio en el orden y papel que desempeñan durante el proceso de fusión:

- A) Vitrificantes: son aquellos componentes base formadores del vidrio, constituyen el esqueleto estructural de este material. Constituyen gran parte de la masa de vidrio, determina las características y el nombre genérico de éste. Entre ellos tenemos: sílice ( $\text{SiO}_2$ ), “es el elemento principal en la fabricación de vidrio, constituye aproximadamente  $\frac{3}{4}$  partes de su composición”; trióxido de boro ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) y el Pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ).
- B) Fundentes: son aquellos componentes que facilitan y favorecen la formación de vidrio, contribuyen mejorando las condiciones de fusión (reducen la temperatura). Entre ellos tenemos: óxido de Sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), “después de la sílice es el elemento con mayor presencia en la masa total de vidrio”; óxido de Potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) y óxido de Litio ( $\text{Li}_2\text{O}$ ).

- C) Bases u óxidos: son los elementos estabilizantes y que permiten modificar las propiedades de éste en uno u otro sentido. Así tenemos: óxido de calcio (CaO), “tercer elementos con mayor presencia en la masa de vidrio común”; óxido de magnesio (MgO) y óxido de bario (BaO).
- D) Estabilizantes: también llamados óxidos indiferentes, pueden actuar tanto como Vitrificantes así como fundentes. Entre ellos están: óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), determina la resistencia mecánica del material; óxido de plomo (PbO); óxido de zinc (ZnO) y óxido de hierro (FeO).
- E) Componentes secundarios: elementos que no afecta a la estructura del vidrio pero que contribuyen a mejorar la textura y el aspecto de este material: Estos son: los afinantes, decolorantes, colorantes, pacificantes, fluidificantes, etc.



*Ilustración 14: Composición del vidrio en %*

*Fuente: Google imágenes*

### 3. Tipos de vidrio:

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018) clasifica al vidrio en dos grandes grupos, vidrio primarios (que se obtienen de manera directa del horno de fundición) y productos secundarios (resultado de un segundo proceso, que usa como materia prima el vidrio producido por industrias primarias).

En el primer grupo se encuentran: el vidrio estirado, rolado, flotado, transparente, translúcido, etc. En el segundo grupo se encuentran: el vidrio templado, laminado, curvo recocido, curvo templado y curvo laminado, vidrio insulado, opaco, translúcido, acústicos y térmicos.

### 4. Polvo de vidrio:

El vidrio reciclado y molido será utilizado como agente estabilizador de suelos de tipo arcilloso; los suelos arcillosos son finos y bastante plásticos, lo que hace el polvo de

vidrio es actuar como árido reemplazante del suelo, alterando la macro estructura de las arcillas, mejorando la gradación, reduciendo la plasticidad, permitiendo el drenaje y lo más importante para proyectos viales, aumentando los parámetros de capacidad de soporte (CBR). Esto se debe a que, como se detalló previamente, el vidrio está compuesto entre el 50% y 80% de sílice, un componente característico de ciertas rocas y que confiere resistencia; además de que si se tritura en el tamaño adecuado, éste material actuará como un árido tipo arenoso. Lo mejor del vidrio es que no reacciona químicamente, no absorbe agua y no sufre grandes alteraciones a temperatura ambiente.



*Ilustración 15: Vidrio triturado [24]*

## **Pavimento**

### **1. Definición:**

De acuerdo con el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014), el pavimento se podría definir como “una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito” [29]. Para la norma CE.010 del RNE, un pavimento es aquella “estructura compuesta por capas que apoya en toda su superficie sobre el terreno preparado para soportarla durante un lapso denominado Período de Diseño y dentro de un rango de Servicialidad” [31]. En esta última definición se incluyen las pistas, estacionamientos, veredas, pasajes peatonales y ciclovías.

Es conocido ya que las capas que conforman el paquete estructural de un pavimento son 3: la capa superficial o de rodadura, la capa de base granular y la capa de sub-base granular drenante (Ver ilustración N° 016). El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) las define de la siguiente manera:

- A) Capa de rodadura: es la parte superior de un pavimento que puede ser de tipo bituminoso (flexible) o de concreto (rígido) o de adoquines, cuya función es sostener directamente el tránsito. También se le conoce como capa asfáltica de superficie o capa de desgaste.
- B) Base: es la capa inferior a la capa de rodadura, su función principal es servir de base, distribuir y transmitir las cargas producto del tránsito a la sub-base granular. Para efectos de diseño, está normado que el material granular drenante que conforme la base deberá tener un  $\text{CBR} \geq 80\%$ .

La norma CE.010 del RNE la define como “capa generalmente granular, aunque también podría ser de suelo estabilizado, de concreto asfáltico, o de concreto hidráulico. Su función principal es servir como elemento estructural de los pavimentos, aunque en algunos casos puede servir también como capa drenante” [31].

De acuerdo con el Manual del asfalto, la capa de base se emplea como cimentación para la estructura del pavimento asfáltico, y dependiendo de su capacidad portante puede sustituir a las capas de sub-base o incluso las capas de terreno mejorado.

- C) Sub-base: es la capa que se encuentra entre la subrasante y la base granular, sirve de apoyo para la base y la carpeta de rodadura, además cumple la función de drenar el agua de la escorrentía superficial y subterránea y de evitar la ascensión del agua por capilaridad. Debe estar compuesta por material granular cuyo  $\text{CBR} \geq 40\%$ .



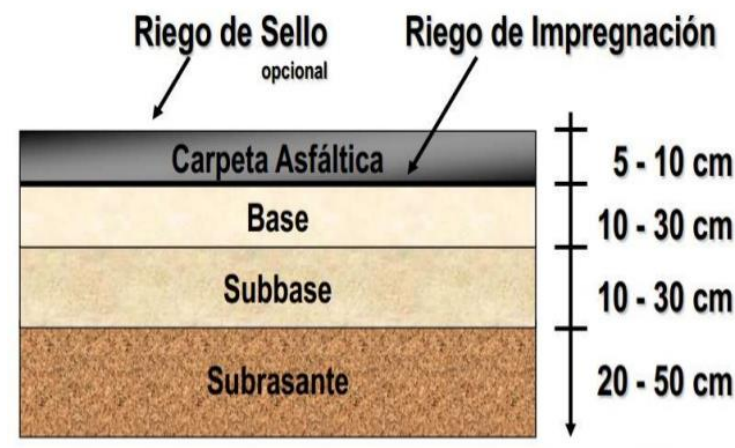
*Ilustración 16: Estructura típica de pavimentos asfálticos [32]*

## 2. Tipos de pavimentos:

El Manual de carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) establece 3 tipos de pavimentos: Pavimentos flexibles, semirígidos y rígidos.

A) Pavimentos flexibles: También llamados pavimentos asfálticos; compuesto por 2 capas granulares (base y sub-base) y una capa de rodadura a base de materiales bituminosos (Ver Ilustración N° 17). Existen también pavimentos de concreto asfáltico construidos directamente sobre la subrasante denominados “full-depth” (nombre patentado por el instituto del Asfalto). Minaya González y Ordóñez Huamán nos dice que:

*Son aquellos que tienen un revestimiento asfáltico sobre una capa base granular. La distribución de tensiones y deformaciones generadas en la estructura por las cargas de rueda del tráfico, se da de tal forma que las capas de revestimiento y base absorben las tensiones verticales de compresión del suelo de fundación por medio de la absorción de tensiones cizallantes. [32].*



*Ilustración 17: Estructura tradicional de pavimentos flexible*

*Fuente: Google imágenes*

B) Pavimentos semirrígidos: o semiflexible (intertrabado). Es una estructura de pavimento compuesta básicamente por capas asfálticas con un espesor total bituminoso (carpeta asfáltica en caliente sobre base tratada con asfalto); también se considera como pavimento semirrígido la estructura compuesta por carpeta asfáltica sobre base tratada con cemento o sobre base tratada con cal. Dentro del tipo de pavimento semirrígido se ha incluido los pavimentos adoquinados (Ver ilustración N° 18) [29]. Minaya González y Ordóñez Huamán nos dice que [32]:

*En términos amplios, un pavimento semirrígido o compuesto es aquel en el que se combinan tipos de pavimentos diferentes, es decir, pavimentos “flexibles” y pavimentos “rígidos”, normalmente la capa rígida está por debajo y la capa flexible por encima. Es usual que un pavimento compuesto*

comprenda una capa de base de concreto o tratada con cemento Portland junto con una superficie de rodadura de concreto asfáltico. [32].



Ilustración 18: Estructura tradicional de pavimento adoquinado

Fuente: Google imágenes

C) Pavimentos rígidos: es una estructura de pavimento compuesta específicamente por una capa de sub-base granular, no obstante, esta capa puede ser de base granular, o puede ser estabilizada con cemento hidráulico como aglomerante, agregados y de ser el caso aditivos (Ver ilustración N° 19). Dentro de los pavimentos rígidos existen 3 categorías:

- Pavimentos de concreto simple con juntas
- Pavimentos de concreto con juntas y refuerzo de acero en forma de fibras o mallas.
- Pavimento de concreto con refuerzo continuo [29].

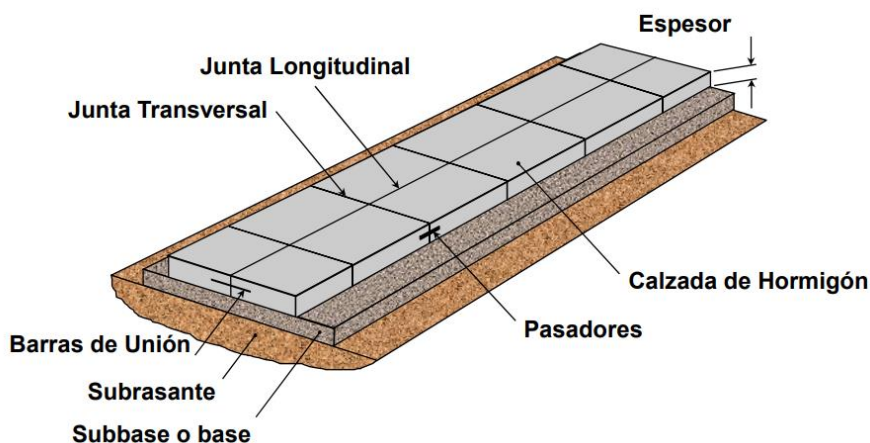


Ilustración 19: Estructura tradicional de pavimento rígido [33]

Minaya González y Ordóñez Huamán (2006) nos dice que:

*Son aquellos en los que la losa de concreto de cemento Portland (C.C.P.) es el principal componente estructural, que alivia las tensiones en las capas subyacentes por medio de su elevada resistencia a la flexión, cuando se*

*generan tensiones y deformaciones de tracción de bajo la losa producen su fisuración por fatiga, después de un cierto número de repeticiones de carga.*

### 3. Subrasante:

De acuerdo con la norma CE.010 del RNE, la capa de subrasante es aquella “porción superior del terreno natural en corte o porción superior de relleno... compactado”. El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) en su Manual de carreteras: suelos y pavimentos la define como “la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado”.

En otras palabras, es el suelo de fundación o asiento del paquete estructural del pavimento; deberá estar conformado por materiales de características aceptables, puesto que sus propiedades geotécnicas (de soporte específicamente) son las que influyen, junto con el tránsito, en el diseño y construcción de un pavimento tanto flexible como rígido. El MTC también plantea una serie de categorías de subrasante en base al CBR que pueden soportar los suelos de fundación:

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

*Tabla 8: Estructura tradicional de pavimento rígido [29].*

El criterio para estabilizar un suelo que servirá de subrasante en un pavimento cualquiera está determinado por el valor de CBR. El valor mínimo de CBR para una subrasante es del 6% de acuerdo con el Manual de carreteras: suelos y pavimentos del MTC 2014. Para valores menores al 6% de CBR, es obligatorio la estabilización de las capas de suelo, para lo cual se evaluarán alternativas de solución de acuerdo a la naturaleza del suelo. Se estabilizan además las zonas húmedas locales o áreas blandas del suelo.

## Ensayos de laboratorio

### **1. Ensayos físicos:**

- A) Determinación del contenido de humedad de un suelo – (MTC E 108 – ASTM D 2216)
- B) Análisis granulométrico de suelos por tamizado – (MTC E 107 – ASTM D 722)
- C) Análisis granulométrico por medio del hidrómetro – (MTC E 109 – ASTM D 422)
- D) Determinación del límite líquido de los suelos – (MTC E 110 – NTP 339.129)
- E) Determinación del límite plástico (L.P.) de los suelos e índice de plasticidad (I.P.) – (MTC E 111 – NTP 339.129)
- F) Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (SUCS Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) – (NTP 339.134:1999)
- G) Método para la clasificación de suelos para uso en vías de transporte – (NTP 339.135:1999)

### **2. Ensayos mecánicos:**

- A) Compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía modificada (Proctor modificado) – (MTC E 115 – ASTM D 1557 – NTP 339.141:1999)
- B) CBR de suelos (laboratorio) – (MTC E 132 – ASTM D 1883)

### **3. Ensayos químicos:**

- A) Método de ensayo normalizado para la determinación del contenido de sales solubles en suelos y aguas subterráneas – (NTP 339.152:2002)
- B) Método de ensayo para la determinación cuantitativa de cloruros solubles en suelos y agua subterránea – (NTP 339.177:2002)
- C) Método de ensayo normalizado para la determinación cuantitativa de sulfatos solubles en suelos y agua subterránea – (NTP 339.178:2002)

## **Materiales y métodos**

### ***Tipo y nivel de investigación***

#### Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo experimental, pues mediante pruebas de laboratorio, se busca medir los cambios en las propiedades del suelo arcilloso (variable dependiente) al variar el contenido porcentual y tamaño de grano del vidrio triturado (variables independientes) [34].

#### Nivel de investigación

El nivel de la investigación es correlacional, pues en ella se exponen los resultados de los ensayos de laboratorio respecto a las propiedades del suelo y sus relaciones causales con la dosificación y tamaño del vidrio triturado [35].

#### Enfoque de investigación

La presenta investigación tiene un enfoque cuantitativo, puesto que se busca cuantificar resultados y generalizarlos o proyectarlos a una muestra mayor mediante métodos estadísticos y usando magnitudes numéricas [34].

### ***Diseño de investigación***

#### Hipótesis

Si se adiciona vidrio triturado en dosificaciones variables (entre el 3% y 14% en peso seco del suelo), y un tamaño de grano que varía entre 75  $\mu\text{m}$  y 300  $\mu\text{m}$  al suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer, éste mejora sus propiedades geotécnicas obteniéndose valores de  $\text{CBR} \geq 6\%$  como lo establece el Manual de carreteras: Suelos y pavimentos de la MTC 2014.

#### Diseño de contrastación de hipótesis

- De acuerdo con el diseño de la investigación es experimental, pues mediante ensayos de laboratorio se recolectan datos para la comprobación de la hipótesis [34].
- De acuerdo con el fin que se persigue es aplicada, pues se busca plantear posibles soluciones a problemas prácticos utilizando los conocimientos obtenidos en la carrea de ingeniería civil [35].

### ***Población, muestra, muestreo***

#### **Población**

Para efectos de la presente investigación, la población de estudio está constituido por el suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer, distrito y provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque durante el período 2020 – 2021. Son también aquellos residuos sólidos de vidrio generados dentro de la ciudad de Chiclayo.

#### **Muestra**

La muestra de estudio que se tomará del suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer son 03 calicatas de profundidad mínima de 1.50 metros [31] y cuya distribución será escogida a criterio del investigador. La muestra estará conformada además por aquellos residuos de vidrio reciclados de las zonas de mayor generación de este tipo de residuos como vidrierías.

#### **Muestreo**

El muestreo considerado para el presente estudio es de tipo no probabilístico por conveniencia, ya que se encuentra justificado en el criterio del investigador y en la norma CE.010 de Pavimentos Urbanos. Dicha norma expresa las siguientes consideraciones: la profundidad mínima de exploración será de 1.50 m por debajo de la cota de rasante; el número mínimo de puntos de exploración estará regido por la siguiente tabla, pero no menos de 03.

<b>TIPO DE VÍA</b>	<b>NÚMERO MÍNIMO DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>ÁREA (m<sup>2</sup>)</b>
Expresas	1 cada	2000
Arteriales	1 cada	2400
Colectoras	1 cada	3000
Locales	1 cada	3600

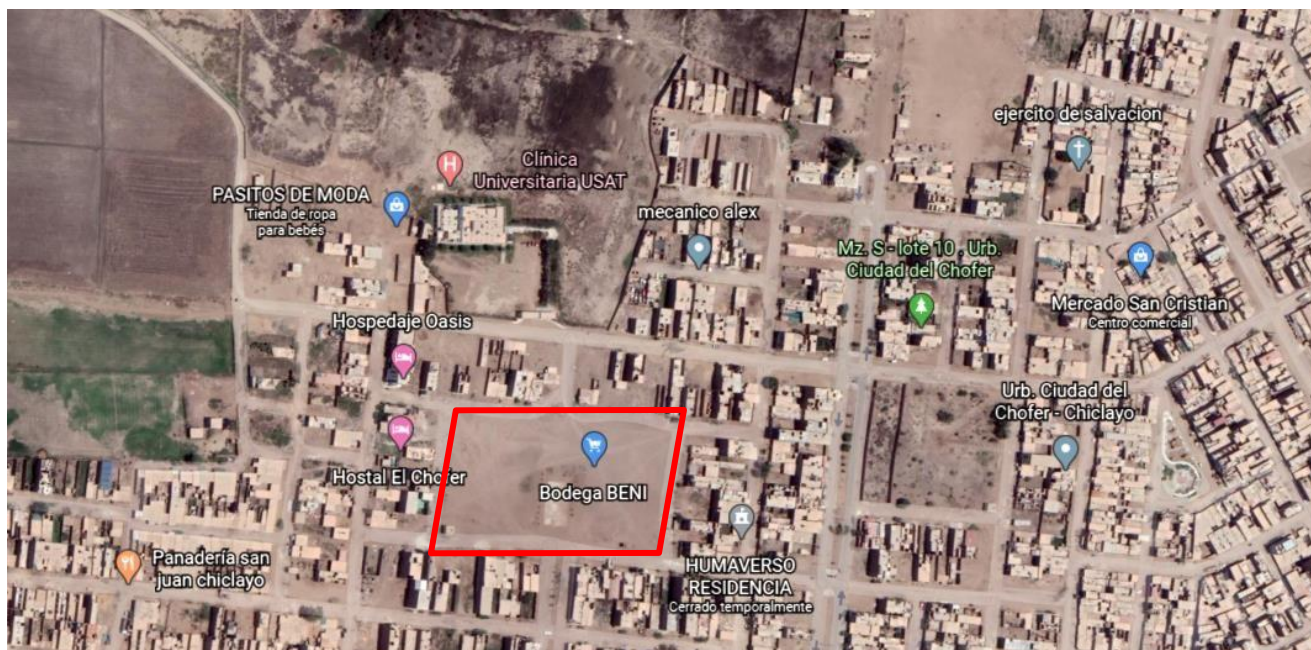
*Tabla 9: Número mínimo de puntos de investigación [31]*

Por ser una zona urbana, se considera como una vía de tipo local; entonces le corresponde 01 punto de investigación por cada 3600 m<sup>2</sup>. La urbanización en estudio posee un aproximado de 360 000 m<sup>2</sup>, en tanto que le corresponde 100 calicatas. Sin embargo, a términos de conveniencia del estudio y por el propósito investigativo de éste, se realizarán solo el mínimo de calicatas (03).

La finalidad de la investigación determina que no se tomen el total de puntos de investigación establecidos por la normativa, sino el necesario para completar el estudio, pues lo determinante es que el suelo sea arcilloso y de pobres propiedades geotécnicas. El presente estudio no es un proyecto aplicado.

Para ello se ha planteado lo siguiente, realizar los 03 puntos de investigación dentro de una zona específica de estudio correspondiente a 01 hectárea del extremo noreste de la urbanización, cerca al mercado San Cristian (Ver ilustración N° 20). La distribución de los puntos de investigación, dentro y fuera del área de estudio, también será determinada de acuerdo al criterio del investigador

De cada punto de investigación se va a extraer 01 muestra de suelo. Las 03 muestras de suelo natural serán sometidas a los respectivos ensayos de laboratorio para caracterizar el material, y en base dichos resultados se tomarán las 02 muestras de características más diferentes y/o desfavorables en términos de resistencia. Esto se hace con la finalidad de que se pueda establecer una tendencia del mejoramiento del suelo respecto del uso de vidrio como agente estabilizante. Es decir, que se pueda determinar el porcentaje y tamaño óptimo de vidrio para suelos de características similares, mas no iguales o idénticos.



*Ilustración 20: Zona específica de estudio dentro de Urb. Ciudad del Chofer*

*Fuente: Google earth*

El muestro de los residuos de vidrio se realizó también bajo juicio del investigador, anteponiendo la facilidad de obtención de dichos residuos sólidos.

### *Crterios de seleccin*

Los criterios de seleccin de los puntos de estudio se escogieron de acuerdo con lo estipulado en la norma CE. 010 de Pavimentos Urbanos. Algunos aspectos como la distribucin de las calicatas en el rea de estudio y la seleccin del estrato de muestro sern determinados bajo el criterio del investigador. Los puntos de exploracin se ubicarn de modo que sus reas de influencia cubran la mayor parte del rea de estudio (Ilustracin N° 22). La eleccin del estrato del que se tomarn las muestras ser el que se muestre constante y se encuentre a la profundidad adecuada para ser usado como subrasante.

En la presente investigacin se har uso del vidrio de soda-cal en polvo como agente estabilizante del suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer. El criterio usado para la seleccin de este material como agente estabilizante de un suelo cohesivo se basa en la composicin de este tipo de vidrio. El vidrio de soda-cal est compuesto en su mayora por silice ( $\text{SiO}_2$ ), xido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), cal ( $\text{CaO}$ ) y otros aditivos, los cuales estn presentes en la mayora de materiales de construccin como piedra, cemento, yeso, cerámica y ladrillos. Esto hace que su comportamiento sea similar al de unrido, por tanto se degrada de modo similar a una roca. El vidrio en polvo es inerte, no demanda grandes cantidades de agua, además, no tiene cohesin y posee un ngulo de friccin interna mayor que el de un suelo fino, por lo que podra contribuir a reducir el ndice de plasticidad de los suelos y aumentar su resistencia en trminos de CBR. Otro factor importante, es que el vidrio posee una gravedad especfica, por lo general, mayor que la de un suelo cohesivo, en tanto que al aadirlo al suelo arcilloso podra aumentar la densidad seca del mismo.

Las dosificaciones de vidrio en polvo a usar son 3%, 6%, 9% y 14% en peso seco del suelo, y en granulometrías de entre  $75\ \mu\text{m}$  –  $300\ \mu\text{m}$  y  $< 75\ \mu\text{m}$ . El criterio usado para la seleccin de estas dosificaciones y tamao de grano de vidrio se basó en las conclusiones de los antecedentes usados para esta investigacin. De acuerdo con dicha literatura de referencia, usando dosificaciones variables de vidrio triturado de promedio entre 2% a 15% en peso seco del suelo, y en granulometrías que van desde los  $38\ \mu\text{m}$  –  $300\ \mu\text{m}$  (Ver tabla N° 10), se obtienen mejoras considerables, en trminos de resistencia, sobre el suelo cohesivo a estabilizar. De los diez antecedentes usados como referencia, ocho de ellos establecen que el contenido ptimo de vidrio en polvo se encuentra en la cercanía del 8% en peso seco del suelo (Ver tabla N° 10). Siguiendo esa línea, he

propuesto usar cuatro dosificaciones de vidrio molido, 3%, 6%, 9% y 14% en peso seco del suelo, para evaluar su efecto estabilizador y así determinar cuál es el contenido más adecuado para mejorar el suelo en estudio. Además, se hará uso de dos gradaciones de vidrio, la primera entre 75  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$  y la segunda < 75  $\mu\text{m}$ ; con la finalidad de evaluar el efecto del tamaño de grano sobre el efecto estabilizante del vidrio en polvo sobre el suelo arcilloso.

N°	AUTOR	PROCEDENCIA	TÍTULO INVESTIGACIÓN	NOMBRE DE REVISTA	AÑO	CLASIFICACIÓN DE SUELO	GRADACIÓN	DOSIFICACIÓN	ENSAYOS REALIZADOS	CONCLUSIÓN
1	J. Olufowobi, A. Ogundaju, B. Michael y O. Aderinlewo	Akure, Nigeria	"Clay Soil Stabilisation Using Powdered Glass"	Journal of Engineering Science and Technology	2014	A-6	Tamiz N° 400 (38 µm)	1, 2, 5, 10 y 15% + (15% cemento)	Clasificación AASHTO, proctor estandar, CBR y corte directo	El contenido óptimo de vidrio se sitúa entre 5% - 10%
2	J. Rose Benny, J. Jolly K., J. Mareena Sebastian y M. Thomas	Kerala, India	"Effect of Glass Powder on Engineering Properties of Clayey Soil"	International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)	2017	Suelo expansivo (IP = 50%)	Tamiz N° 200 (75 µm)	2, 4, 6, 8 y 10%	Clasificación, proctor estandar, CBR, corte directo y compresión no confinada	El contenido óptimo es de 8%
3	M. Siyab Khan, M. Tufail y Mateeullah	Peshawar, Pakistan	"Effects of Waste Glass Powder on the Geotechnical Properties of Loose Subsoils"	Civil Engineering Journal (CEJ)	2018	CL-ML	Tamiz N° 200 (75 µm)	4%, 8% y 12%	Clasificación SUCS, proctor estandar, CBR y corte directo	El contenido óptimo está en la cercanía del 8%
4	Nirmala R. y Shanmugapriya M.	Tamil Nadu, India	"Feasibility Study on Enhancing the Properties of Subgrade Material using Waste Glass"	International Journal of Chemical Sciences	2017	Suelo cohesivo (IP = 23%)	Tamiz N° 50 (300 µm)	20%, 25%, 30%, 35%, 40% y 45%	Clasificación IS, Proctor estandar, CBR y corte directo	Se puede sustituir el suelo arcilloso hasta un valor crítico de 40%
5	H. Canakci, A. AL-Kaki y F. Celik	Gaziantep, Turquía	"Stabilization of Clay with Waste Soda Lime Glass Powder"	Procedia Engineering	2016	CL / A-7	Tamiz N° 200 (75 µm)	3, 6, 9 y 12%	Clasificación SUCS y AASHTO, proctor estandar, CBR, corte directo e hinchamiento	El contenido óptimo de vidrio se sitúa entre 6% - 12%
6	Z. A. Zahra Mahdi y N. S. Al-Hassnawi	Al-Qadisiya, Iraq	"Assessment of subgrade soil improvement by waste glass powder"	International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)	2018	ML / A-7-5	Tamiz N° 200 (75 µm)	3, 5, 7 y 9 %	Clasificación SUCS y AASHTO, proctor estandar, CBR y corte directo	El contenido óptimo de vidrio se encuentra en la cercanía de 7%
7	O. A. Babatunde, J. E. Sani y A. H. Sambo	Kaduna, Nigeria	"Black Cotton Soil Stabilization using Glass Powder"	International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)	2019	CL	Tamiz N° 200 (75 µm)	2%, 4%, 6% y 8%	Clasificación SUCS, proctor estandar, compresión no confinada y CBR	Se obtuvieron mejores resultados para contenidos de 4% - 6%
8	Nuruzzaman y Akhtar Hossain	Bangladesh	"Effect of Soda Lime Glass Dust on the Properties of Clayey Soil"	Global Journal of Researches in Engineering: Civil And Structural Engineering	2014	CL	Tamiz N° 50 (300 µm)	3%, 6%, 9% y 12%.	Clasificación SUCS, proctor estandar y consolidación	Se obtuvieron mejores resultados para un contenido del 12%
9	I. A. Ikara, A. M. Kundiri y A. Mohammed	Bauchi, Nigeria	"Effects of waste glass (WG) on the strength characteristics of cement stabilized expansive soil"	American Journal of Engineering Research (AJER)	2015	A-7-5 (13) / CH	Tamiz N° 50 (300 µm)	5%, 10%, 15% y 20% + (2%, 4%, 6% y 8% cemento)	Clasificación SUCS y AASHTO, proctor estandar, CBR y compresión no confinada	Se obtuvieron mejoras para un contenido de 20% vidrio + 8% cemento
10	S. Aaqib Javed y S. Chakraborty	Bangladesh	"Effects of Waste Glass Powder on Subgrade Soil Improvement"	World Scientific News	2020	Suelo cohesivo (IP = 21.50 %)	Tamiz N° 200 (75 µm)	2, 4, 6, 8 y 10%	Clasificación, proctor estandar, CBR, corte directo y compresión no confinada	El contenido óptimo de vidrio es de 8%

*Tabla 10: Resumen de literatura de referencia usada para esta investigación  
Fuente: Elaboración propia*

### *Operacionalización de variables*

Se identificó el objeto de estudio, la variable dependiente y la variable independiente, siendo estas de tipo cuantitativo (Ver tabla N° 11).

<b>Objeto de estudio</b>	<b>Variable independiente (Y)</b>	<b>Variable dependiente (X)</b>
Estabilización de suelos arcillosos con vidrio triturado	Vidrio pulverizado	Mezcla de suelo arcilloso con vidrio triturado
	Suelo arcilloso natural	Estudio económico

*Tabla 11: Variables y objeto de estudio*

*Fuente: Elaboración propia*

<b>VARIABLE</b>	<b>TIPO</b>	<b>DIMENSIÓN</b>	<b>INDICADOR</b>	<b>TÉCNICA</b>
Vidrio pulverizado	Independiente	Cantidad	Porcentaje en peso seco del suelo	Dosificación
		Tamaño	Tamaño de grano	Granulometría por tamizado (MTC E107)
Suelo arcilloso natural		Propiedades físicas y mecánicas	Estudio geotécnico	Experimentación

*Tabla 12: Operacionalización de variable independiente*

*Fuente: Elaboración propia*

VARIABLE	TIPO	DIMENSIÓN	INDICADOR	TÉCNICA
Mezcla de suelo arcillo con vidrio triturado	Dependiente	Propiedades físicas	Distribución granulométrica	Granulometría por tamizado (MTC E107)
				Granulometría con hidrómetro (MTC E109)
			Límites de consistencia	Límite líquido (MTC E110)
				Límite plástico (MTC E111)
			Contenido de humedad	Contenido de humedad (MTC E108)
		Propiedades químicas	Contenido de sales solubles	Contenido de sales solubles en suelos y aguas subterráneas (NTP 339.152:2002)
			Contenido de cloruros	Contenido de cloruros solubles en suelos y agua subterránea (NTP 339.177:2002)
			Contenido de sulfatos	Contenido de sulfatos solubles en suelos y agua subterránea (NTP 339.178:2002)
		Propiedades mecánicas	Capacidad de carga	CBR en suelos (MTC E132)
				Proctor modificado (MTC E115)
Estudio económico		Viabilidad económica	Costo económico directo por materiales	Análisis económico

Tabla 13: Operacionalización de variable dependiente

Fuente: Elaboración propia

### ***Técnicas e instrumentos de recolección de datos***

Se utilizará como técnica de recolección de datos la observación experimental, debido a que los datos se obtienen mediante la percepción intencionada y selectiva del objeto de estudio, y en condiciones controladas, pues es el investigador quien manipula las variables independientes. El instrumento usado para llevar a cabo esta técnica es la ficha de registro de datos en base a los protocolos normalizados por el Manual de Ensayos de Materiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. La observación experimental será aplicada a

los ensayos de laboratorio de caracterización física y mecánica del suelo antes mencionados. También se hará uso del análisis documental a fuentes primarias y secundarias de información, ayudándose de fichas de registro y de organización (Ver tabla N° 14).

<b>TÉCNICA:</b>	<b>INSTRUMENTO:</b>	<b>APLICACIÓN:</b>
Observación experimental	Fichas de registro de datos	Ensayos de laboratorio
Análisis de documentos	Fichas de registro	Fuentes de información

*Tabla 14: Técnicas e instrumentos de recolección de datos*

*Fuente: Elaboración propia*

### ***Procedimientos***

En este apartado se detallarán los materiales y el procedimiento usado para el desarrollo del programa experimental sobre el que se fundamenta esta investigación. Previo al inicio del programa experimental, se inició con la obtención de los materiales a utilizar para el desarrollo de la presente tesis. Los materiales a utilizar para este proyecto son vidrio reciclado molido y suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer.

Para la obtención del suelo arcilloso se realizó trabajo de campo. Se procedió con un reconocimiento de la zona de estudio y se definió, en base al criterio del investigador, la ubicación exacta de los puntos de investigación. Posterior a ello se realizaron las tres (03) calicatas para la toma de las muestras de suelo, que después fueron llevadas a laboratorio. La cantidad de material que se extrajo se dedujo del número de ensayos que se pretendía realizar.

El vidrio se obtuvo como parte del reciclaje de los residuos de una vidriería local, cuya razón social es “Cristal & Art”. Estos residuos corresponden a pequeños pedazos de vidrio que resultan del proceso de elaboración de trofeos, ventanas, mamparas, entre otros. Se escogió este tipo de residuos puesto que son considerados como no reutilizables, ya que al encontrarse rotos su manipulación se dificulta mucho por las lesiones que podrían causar.

Posterior a la obtención de los materiales base de esta investigación, ambos son trasladados a laboratorio para iniciar con el programa experimental. El programa experimental inició con la caracterización del material suelo arcilloso en estado virgen (sin adición) a través de los ensayos de laboratorio. Posterior a ello se realizaron las mismas pruebas en el suelo adicionado con vidrio en polvo en porcentajes de 3%, 6%, 9% y 14% en peso seco del suelo, y en dos granulometrías. El primer tamaño de grano de vidrio utilizado

se encontró entre 75  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$  (pasante del tamiz N° 50 y retenido en el N° 200), y el segundo tamaño fue de < 75  $\mu\text{m}$  (pasante del tamiz N° 200).

A continuación se describen a más detalle los materiales a usar para el programa experimental en estado virgen y en combinación, además de las pruebas de laboratorio que se realizaron para lograr los objetivos planteados.

## 1. Materiales en estado natural

### 1.1. Suelo arcilloso

El suelo a estabilizar es un suelo cohesivo procedente de la Urb. Ciudad del Chofer, distrito y provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque; entre las coordenadas 624703.2 E (6°45'43.8"S) - 9252397.2 N (79°52'17.8"W). Las muestras de suelo extraídas estuvieron constituidas por un material de textura suave, de mediana plasticidad y de un color marrón oscuro (Ver ilustración N° 21). Para su extracción se realizaron tres (03) calicatas de 1.50 metros de profundidad en promedio, para lo cual se retiró los 0.10 m superiores para evitar material orgánico. Se observó un solo estrato de material cohesivo, por lo que las muestras se tomaron de una profundidad media de 0.60 m. Se encontró nivel freático a profundidades de entre 1.30 y 1.50 m.



*Ilustración 21: Consistencia del suelo encontrado durante la exploración geotécnica*

*Fuente: propia*

En la ilustración N° 22 se aprecia gráficamente la ubicación de las calicatas realizadas en la Urb. Ciudad del Chofer. La tabla N° 15 resume las coordenadas de ubicación de las calicatas.



Ilustración 22: Ubicación exacta de puntos de investigación en zona de estudio Urb. Ciudad del Chofer

Fuente: Google earth

CUADRO DE UBICACIÓN DE CALICATAS		
CALICATA	COORDENADAS UTM ZONA 17M	
C-01	624815.30 m E	9252443.90 m S
C-02	624959.60 m E	9252437.40 m S
C-03	624806.00 m E	9252379.40 m S

Tabla 15: Coordenadas de ubicación de puntos de investigación

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran las ilustraciones N° 23, 24 y 25 donde se aprecia el lugar exacto en el que se realizó las calicatas. Las calicatas se realizaron en una zona descampada, a razón de que dicho suelo no ha sido alterado por actividades humanas como obras de saneamiento o pavimentación; por lo que dicho suelo no ha sido modificado, sino que mantiene sus características propias de un suelo cohesivo.



*Ilustración 23: Zona de extracción de calicata N° 01 en Urb. Ciudad del Chofer*

*Fuente: propia*



*Ilustración 24: Zona de extracción de calicata N° 03 en Urb. Ciudad del Chofer*

*Fuente: propia*



*Ilustración 25: Zona de extracción de calicata N° 02 en Urb. Ciudad del Chofer*

*Fuente: propia*

Las muestras extraídas de las tres (03) calicatas se caracterizaron por separado, con la finalidad de que, en caso se encuentre alguna diferencia entre éstos, se evalúe el efecto estabilizador del vidrio molido en suelos cohesivos de características diferentes. La codificación de las muestras de suelo es como sigue:

<b>Descripción</b>	<b>Codificación</b>
<b>Calicata N° 01</b>	C-01
<b>Calicata N° 01</b>	C-02
<b>Calicata N° 01</b>	C-03

*Tabla 16: Zona de extracción de calicata N° 02 en Urb. Ciudad del Chofer*

*Fuente: propia*

## **1.2. Vidrio**

La recolección del vidrio se realizó en una vidriería local, cuya razón social es “Cristal & Art”, ubicada en la Av. Fernando Belaúnde 598, Chiclayo 14006 (Ver ilustración N° 26). El vidrio se obtuvo como parte del reciclaje de los residuos generados en esta empresa. Esta

vidriería genera entre 60 y 80 kg de este tipo de residuos, los cuales son enviados a un botadero cercano a la zona, puesto que no pueden ser reciclados.



*Ilustración 26: Vidriería “Cristal & Art” de la cual se obtuvo los residuos de vidrio*

*Fuente: propia*

Este material reciclado se compone de pedazos de vidrio de diferentes espesores y colores, que resulta del proceso de elaboración de trofeos, ventanas, mamparas, etc. (Ver ilustración N° 27). La cantidad de residuos de vidrio recolectada fue de 35 kg en promedio. El tipo de vidrio que compone estos residuos es el vidrio de soda-cal o también llamado sodocálcico, y es el tipo de vidrio más común en este tipo de desechos, y fue escogido como material estabilizante porque está compuesto en su mayoría por sílice, el componente clave en esta investigación.

Estos residuos de vidrio deben añadirse en forma de polvo al suelo arcilloso seco para su estabilización, por lo que se les sometió a un proceso de lavado y posterior molienda para que el vidrio llegue al estado de polvo fino.

Previo al proceso de molienda, se procedió a lavar los residuos de vidrio con agua a presión, esto con la finalidad de eliminar posibles impurezas que puedan alterar los resultados de la investigación. Posterior a ello se deja secar al sol durante 24 horas. Cabe señalar que todo proceso de manipulación de los residuos de vidrio se debe realizar con las medidas de seguridad adecuadas, como guantes de badana, polo manga larga, pantalón jean grueso, mascarilla y guantes de seguridad.

Posterior al proceso de lavado y secado, se inicia con la etapa uno del proceso de triturado, la cual consistió en reducir de manera manual los residuos de vidrio a tamaños de entre 2 a 3 pulgadas, con la finalidad de que éstos sean más manejables. Para ello se hizo uso de herramientas como comba y martillo. Para evitar accidentes, se coloca previamente el material a ser chancado dentro de dos sacos. El material resultante se aprecia en la ilustración N° 28.



*Ilustración 27: Residuos de vidrio recolectados de vidriería "Cristal & Art"*

*Fuente: propia*



*Ilustración 28: Residuos de vidrio reducidos de manera manual a tamaños de entre 2 a 3 pulgadas*

*Fuente: propia*

Como segunda etapa del proceso de molienda, se tritura el vidrio una primera vez haciendo uso de un pequeño molino artesanal, el cual funciona con electricidad, y permite obtener tamaños de vidrio similar al de una arena gruesa, como la que se usa para la fabricación de concretos y morteros. El resultado de la molienda con esta máquina se aprecia en la ilustración N° 30.



*Ilustración 29: Triturado de vidrio usando un molino artesanal eléctrico*  
*Fuente: propia*



*Ilustración 30: Vidrio triturado por primera vez con molino artesanal eléctrico*  
*Fuente: propia*

Como tercera y última etapa, se trituró el vidrio por segunda vez en el mismo molino artesanal eléctrico, teniendo en cuenta que se retiraron con mucho cuidado los pedazos de vidrio de mayor tamaño. En esta etapa el vidrio molido resultante tuvo la apariencia de una arena fina, similar a la arena utilizada para trabajos de tarrajeo, como se puede apreciar en la ilustración N° 31. En esta etapa se procede también a tamizar el vidrio molido por la malla N° 50 y N° 200. El material pasante del tamiz N° 50 y retenido del tamiz N° 200 ( $75\ \mu\text{m}$  –  $300\ \mu\text{m}$ ), constituye el primer tamaño de grano vidrio a utilizar para el mezclado con el suelo. La segunda granulometría la constituye el vidrio molido que pasó el tamiz N° 200 ( $< 75\ \mu\text{m}$ ). Ver ilustración N° 33.



*Ilustración 31: Vidrio triturado por vez con molino artesanal eléctrico  
Fuente: propia*



*Ilustración 32: Proceso de tamizado del vidrio triturado usando la malla N° 50 y N° 200*

*Fuente: propia*



*Ilustración 33: Vidrio triturado de tamaño entre 75  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$*

*Fuente: propia*

## **2. Mezcla de materiales**

Posterior a la caracterización del suelo en estado virgen, se procede a determinar el contenido óptimo de vidrio molido y la granulometría más adecuada para estabilizar el suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer. Para ello, se usaron dosificaciones de vidrio del 3%, 6%, 9% y 14% en peso seco del suelo, y en dos granulometrías distintas, la primera está compuesta por el vidrio molido pasante del tamiz N° 50 y el retenido en el tamiz N° 200 (tamaño de grano de entre 75  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$ ) y la segunda por el material pasante del tamiz N° 200 (tamaño de grano < 75  $\mu\text{m}$ ). Por lo que existen 08 combinaciones posibles de vidrio triturado a mezclar con el suelo (Ver tabla N° 17).

Combinaciones	Suelo arcilloso (%)	Vidrio molido (%) en peso seco del suelo		
		Granulometría	Dosificación	Codificación
1	100.00%	300 $\mu$ m	3.00%	C-300-3%
2	100.00%		6.00%	C-300-6%
3	100.00%		9.00%	C-300-9%
4	100.00%		14.00%	C-300-14%
5	100.00%	75 $\mu$ m	3.00%	C-75-3%
6	100.00%		6.00%	C-75-6%
7	100.00%		9.00%	C-75-9%
8	100.00%		14.00%	C-75-14%

*Tabla 17: Proporción de combinación de suelo arcilloso y vidrio molido*

*Fuente: Elaboración propia*

El suelo arcilloso se secó en el horno hasta obtener una masa constante y se mezcló con su correspondiente dosificación de vidrio molido y en granulometría respectiva hasta obtener un material homogéneo, posterior a lo cual se almacenaron en bolsas plásticas hasta el momento de su ensayo (Ver ilustración N° 34). Las mezclas de suelo y vidrio triturado se midieron en peso seco, de acuerdo a las dosificaciones indicadas en la tabla N° 17. La codificación que aparece en la misma tabla es la que se usó para identificar las muestras.



*Ilustración 34: Dosificaciones de suelo arcilloso seco y vidrio molido previo a su mezclado*

*Fuente: propia*

Posterior al mezclado del suelo arcilloso con el vidrio molido, se ejecutan los mismos ensayos de laboratorio que se realizaron al suelo natural, con la finalidad de caracterizar a esta mezcla de materiales, y determinar, en base los parámetros de resistencia obtenidos de los ensayos de Proctor modificado (máxima densidad seca) y CBR (relación de soporte), la dosificación y la granulometría de vidrio triturado óptimo para estabilizar el suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer. Los ensayos fueron realizados en las instalaciones del laboratorio de suelos AMAZING CONSTRUCTORA Y SERVICIOS GENERALES, y se rigieron en base a la normatividad del MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones) y la NTP (Norma Técnica Peruana).

### ***Plan de procesamiento y análisis de datos***

Para el procesamiento de los datos de estudio con respecto a la influencia que genera el vidrio pulverizado en el suelo arcilloso, se usará como herramienta principal el programa de hojas de cálculo Excel, cuyos formatos contienen la información adecuada para cada uno de los ensayos realizados en la presente investigación. El análisis obtenido de los resultados de laboratorio se presentará a través de gráficos (de barra o histogramas, de líneas y de dispersión). Para el procesamiento de información obtenida de fuentes bibliográficas, se usarán cuadros resumen y fichas textuales para lograr organizar ésta de la mejor manera.

### ***Consideraciones éticas***

- Consentimiento informado: los pobladores de la Urb. Ciudad del Chofer fueron informados del presente estudio, con la finalidad de que se tenga el permiso para realizar los puntos de investigación antes definidos.
- Autenticidad: manifiesto tener conocimiento que el proyecto de tesis “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” es una investigación verídica y no ha sido ni viene siendo realizada por ninguna persona o institución.
- Honestidad: me comprometo a presentar con total veracidad los resultados obtenidos mediante los ensayos de laboratorio. También me comprometo a no plagiar de otros estudios similares al mío.
- Antecedentes: las investigaciones que se tomaron como referencia para el desarrollo de esta tesis, se encuentran descritas dentro del capítulo 2.1. del Marco Teórico de este documento. En ese acápite se describen los objetivos, la metodología y los resultados de dichos estudios.

- Código de ética: se han seguido las consideraciones éticas del Código Deontológico del Colegio de Ingenieros del Perú [36]. El art. 4 lo define como “reglamento ético de conducta, que contiene los deberes, valores y las normas morales y éticas, que rigen a los profesionales de la ingeniería en sus distintas especialidades”. Se tomaron como referencia los artículos 5, 6, 105 y 106.

## Matriz de consistencia

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES Y DIMENSIÓN	INDICADORES	METODOLOGÍA TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
¿Cuál es el contenido óptimo y granulometría más adecuada del vidrio reciclado molido como agente estabilizador de un suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer en Chiclayo para su uso como subrasante en pavimentos asfálticos urbanos?	<p><b>Objetivo General:</b></p> <p>Determinar el tamaño y contenido óptimo de vidrio reciclado molido en la estabilización de suelos arcillosos para su uso como subrasante de pavimentos urbanos en la Urb. Ciudad de Chofer, Chiclayo.</p> <p><b>Objetivos Específicos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>O<sub>1</sub>.</b> Determinar y comparar las características físicas del suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer en estado virgen y con adiciones variables de vidrio molido (5% a 15%) y en diferentes granulometrías (tamiz N° 50 – N° 200).</li> <li>- <b>O<sub>2</sub>.</b> Determinar y comparar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer en estado virgen y con adiciones variables de vidrio molido (5% a 15%) y en diferentes granulometrías (tamiz N° 50 – N° 200).</li> <li>- <b>O<sub>3</sub>.</b> Realizar un estudio de factibilidad.</li> </ul>	<p>Si se adiciona vidrio triturado en dosificaciones de 3%, 6% y 9% en peso seco del suelo, y un tamaño de grano que varía entre 75 µm y 300 µm al suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer, éste mejora sus propiedades geotécnicas obteniéndose valores de <math>CBR \geq 6\%</math> como lo establece el Manual de carreteras: Suelos y pavimentos de la MTC 2014.</p>	<p><b>VARIABLE DEPENDIENTE</b></p> <p>Propiedades del suelo arcilloso con vidrio triturado</p> <p><b>Dimensiones</b></p> <p>Propiedades físicas</p> <p>Propiedades mecánicas</p> <p><b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b></p> <p>Vidrio pulverizado Suelo arcilloso</p> <p><b>Dimensiones</b></p> <p>Cantidad Tamaño</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distribución granulométrica</li> <li>- Límites de consistencia</li> <li>- Contenido de humedad</li> <li>- Capacidad de carga</li> <li>- Dosificación</li> <li>- Tamaño de grano</li> </ul>	<p><b>Tipo y Diseño de Investigación:</b></p> <p>Tipo de investigación: experimental Nivel de investigación: correlacional</p> <p>Diseño de investigación: Experimental Fin que persigue: Aplicada</p> <p><b>Población (N) y Muestra (n):</b></p> <p><b>La Población:</b> Suelo arcilloso de la ciudad de Chiclayo</p> <p><b>La Muestra:</b> No probabilístico por conveniencia. 03 calicatas de 1.50 m en la Urb. Ciudad del Chofer, Chiclayo, Lambayeque.</p> <p><b>Técnica:</b> observación experimental y análisis de documentos</p> <p><b>Instrumento:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hojas de registro de datos</li> <li>- Fichas de registro</li> </ul>

Tabla 18: Matriz de consistencia

Fuente: Elaboración propia

## Resultados y discusión

### *Resultados*

En el presente capítulo se presentan y analizan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados sobre las muestras de suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer, en estado natural, y con la adición de polvo de vidrio en las dosificaciones y gradaciones mencionadas en el capítulo anterior.

Los ensayos de contenido de humedad, granulometría por tamizado y con hidrómetro, y límites de Atterberg se llevaron a cabo para caracterizar el suelo y posterior a ello poder clasificarlo según la normativa SUCS y AASHTO, mientras que los ensayos de Proctor modificado y CBR se realizaron para evaluar el efecto estabilizador del vidrio en polvo sobre los parámetros de resistencia del suelo.

Cabe señalar que, de acuerdo a lo mencionado en el capítulo de Métodos y materiales, las muestras de suelo escogidas para ser evaluadas con las adiciones de vidrio fueron las pertenecientes a la calicata N° 01 y N° 02, puesto que, como se explicó, se pretendía escoger las muestras de suelos más diferentes y/o que presentes peores condiciones de resistencia. En este caso, las características del suelo de la calicata N° 03 son bastante similares a las de la calicata N° 02, por ello, la muestra de suelo de calicata N° 03 no fue evaluada con adiciones de vidrio en polvo. Los resultados de sus ensayos en suelo natural se anexan al final de este informe.

#### *I. Determinar y comparar las características físicas del suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer en estado virgen y con adiciones variables de vidrio molido (3%, 6%, 9% y 14%) y en diferentes granulometrías (300 $\mu\text{m}$ – 75 $\mu\text{m}$ ) mediante ensayos normalizados por el Manual de ensayos de laboratorio del MTC 2014*

##### **1. Contenido de humedad natural (MTC E 108 - NTP 339.127:1998)**

Después de haber realizado las tres calicatas en la zona de estudio, se extrajo una muestra inalterada de suelo por cada calicata, de peso aproximado de 250 gr, la cual se trasladó de manera inmediata a laboratorio para ensayarla y determinar así el contenido de humedad natural del suelo. Las muestras se extrajeron de una profundidad promedio de 0.50 m. El nivel freático se hizo presente a una profundidad de entre 1.30 y 1.50 m.

Los resultados de laboratorio muestran que en estado natural el suelo de la zona en estudio contenía aproximadamente una humedad del 14.34%, 15.85% y 16.20% para las

calicatas N° 01, 02 y 03 respectivamente. Se concluye que el contenido de humedad natural promedio obtenido para el suelo arcilloso fue 15,46% como se muestra en la Tabla N° 19.

<b>CALICATA N°</b>	<b>C - 01</b>	<b>C - 02</b>	<b>C - 03</b>
<b>MUESTRA N°</b>	M - 01	M - 01	M - 01
<b>PROFUNDIDAD</b>	0.00 m - 1.50 m	0.00 m - 1.50 m	0.00 m - 1.50 m
<b>HUMEDAD NATURAL</b>	14.34%	15.85%	16.20%
<b>PROMEDIO HUMEDAD</b>	<b>15.46%</b>		

*Tabla 19: Resumen de resultados de ensayo de contenido de humedad en suelo natural  
Fuente: Elaboración propia*

El ensayo de contenido de humedad no es aplicable a la mezcla de suelo arcilloso y polvo de vidrio, puesto que dichas dosificaciones se miden en peso seco. Toda manipulación del suelo altera el natural contenido de agua el suelo, por ello este ensayo solo se ha evaluado en el suelo virgen.

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

En base a los procedimientos de ensayo de la norma MTC E 107 se realizó el ensayo de granulometría por tamizado de la fracción gruesa del suelo en estado natural y adicionado con polvo de vidrio en dosificaciones de 3%, 6%, 9% y 14% en peso seco del suelo y en dos granulometrías, la primera de entre 75  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$  y la segunda < 75  $\mu\text{m}$ .

El gráfico N° 01 y N° 02 muestran el desglose de tamaños de partículas del suelo arcilloso natural de la calicata N° 01 y N° 02 respectivamente, y su combinación con los diferentes porcentajes del vidrio molido de tamaño de entre 75  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$ . En ambos gráficos se observa una variación en la distribución granulométrica del suelo en el rango de las arenas, esto podría explicarse en base a que el tamaño de grano de vidrio usado se encuentra 75  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$ .

La tabla N° 20 nos muestra que el suelo natural de la calicata N° 01 posee un 2.80%, 4.90%, 9.20% y 13.10% más limos y arcillas que las combinaciones de suelo arcilloso con 3%, 6%, 9% y 14% respectivamente. Por su parte, la tabla N° 21 nos muestra que el suelo natural de la calicata N° 02 posee un 3.70%, 5.70%, 9.30% y 14.00% más limos y arcillas que las combinaciones de suelo arcilloso con 3%, 6%, 9% y 14% respectivamente. Además, se deduce que a partir del 3% de vidrio molido en tamaño del 75  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$ , el suelo adicionado deja de ser un suelo de grano fino, pues el contenido de limos y arcillas es inferior a 50%.

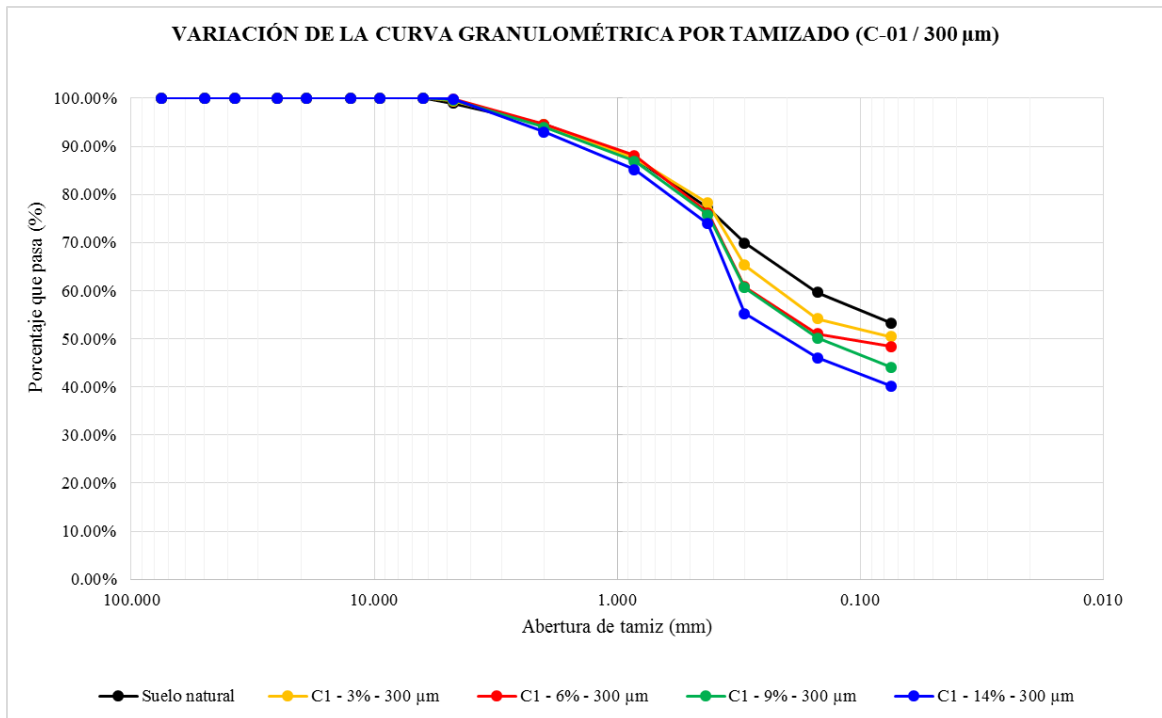


Gráfico 1: Variación de la curva granulométrica por tamizado para el suelo de la calicata N° 01 con combinaciones de vidrio en polvo de tamaño 75 - 300  $\mu\text{m}$   
Fuente: Elaboración propia

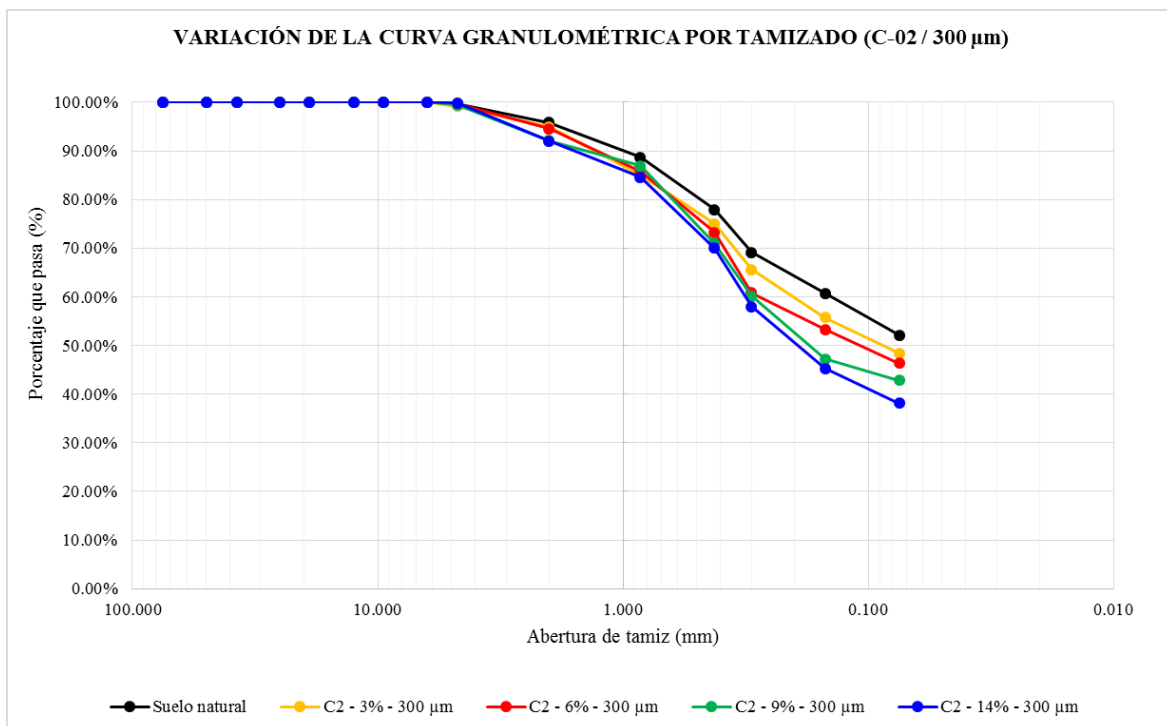


Gráfico 2: Variación de la curva granulométrica por tamizado para el suelo de la calicata N° 02 con combinaciones de vidrio en polvo de tamaño 75 - 300  $\mu\text{m}$   
Fuente: Elaboración propia

<b>Calicata N° 01 - Vidrio 300 <math>\mu\text{m}</math> - 75 <math>\mu\text{m}</math></b>					
<b>Descripción</b>	<b>Natural</b>	<b>3% - 300 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>6% - 300 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>9% - 300 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>14% - 300 <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>% Grava</b>	<b>1.00%</b>	<b>0.50%</b>	<b>0.20%</b>	<b>0.40%</b>	<b>0.20%</b>
<b>% Arena</b>	<b>45.70%</b>	<b>49.00%</b>	<b>51.40%</b>	<b>55.50%</b>	<b>59.60%</b>
<b>% Limos + arcilla</b>	<b>53.30%</b>	<b>50.50%</b>	<b>48.40%</b>	<b>44.10%</b>	<b>40.20%</b>

*Tabla 20: Distribución granulométrica del suelo natural de la calicata N° 01 y sus combinaciones con vidrio en polvo de tamaño 75 - 300  $\mu\text{m}$*

*Fuente: Elaboración propia*

<b>Calicata N° 02 - Vidrio 300 <math>\mu\text{m}</math> - 75 <math>\mu\text{m}</math></b>					
<b>Descripción</b>	<b>Natural</b>	<b>3% - 300 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>6% - 300 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>9% - 300 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>14% - 300 <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>% Grava</b>	<b>0.40%</b>	<b>0.80%</b>	<b>0.30%</b>	<b>0.50%</b>	<b>0.20%</b>
<b>% Arena</b>	<b>47.50%</b>	<b>50.80%</b>	<b>53.30%</b>	<b>56.70%</b>	<b>61.70%</b>
<b>% Limos + arcilla</b>	<b>52.10%</b>	<b>48.40%</b>	<b>46.40%</b>	<b>42.80%</b>	<b>38.10%</b>

*Tabla 21: Distribución granulométrica del suelo natural de la calicata N° 02 y sus combinaciones con vidrio en polvo de tamaño 75 - 300  $\mu\text{m}$*

*Fuente: Elaboración propia*

El gráfico N° 03 y N° 04 muestran la curva granulométrica del suelo arcilloso natural de la calicata N° 01 y N° 02, y su combinación con los diferentes porcentajes del vidrio molido de tamaño de  $< 75 \mu\text{m}$ . Se observa una variación en la distribución granulométrica del suelo en la cercanía del rango de las arcillas, siendo los valores de %pasa mayor que el de suelo natural, lo cual se fundamenta en base a que el tamaño de grano de vidrio usado es de tamaño menor a los  $75 \mu\text{m}$ .

La tabla N° 22 nos muestra que las combinaciones de suelo arcilloso con 3%, 6%, 9% y 14% de vidrio molido en tamaño  $< 75 \mu\text{m}$  poseen un 3.40%, 5.10%, 9.20% y 12.60% más limos y arcillas que el suelo natural de la calicata N° 01 respectivamente. Asimismo, la tabla N° 23 indica que las combinaciones de suelo arcilloso con 3%, 6%, 9% y 14% en tamaño  $< 75 \mu\text{m}$  poseen un 3.70%, 5.60%, 9.00% y 14.20% más limos y arcillas que el suelo natural de la calicata N° 02 respectivamente. Además, se confirma que para ambas calicatas y para todos los porcentajes de vidrio molido en tamaño  $< 75 \mu\text{m}$ , el suelo adicionado mantiene su categoría de suelo de grano fino, pues el contenido de limos y arcillas es superior a 50%.

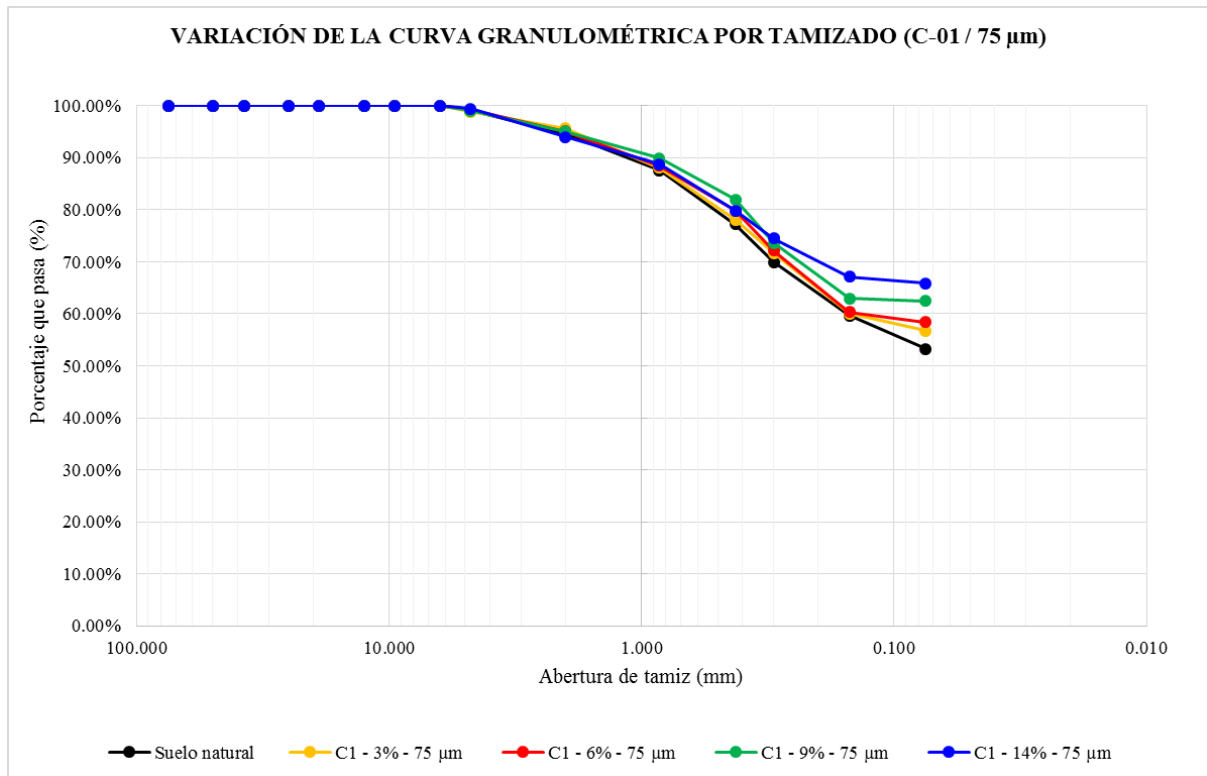


Gráfico 3: Variación de la curva granulométrica por tamizado para el suelo de la calicata N° 01 con combinaciones de vidrio en polvo de tamaño < 75  $\mu\text{m}$   
Fuente: Elaboración propia

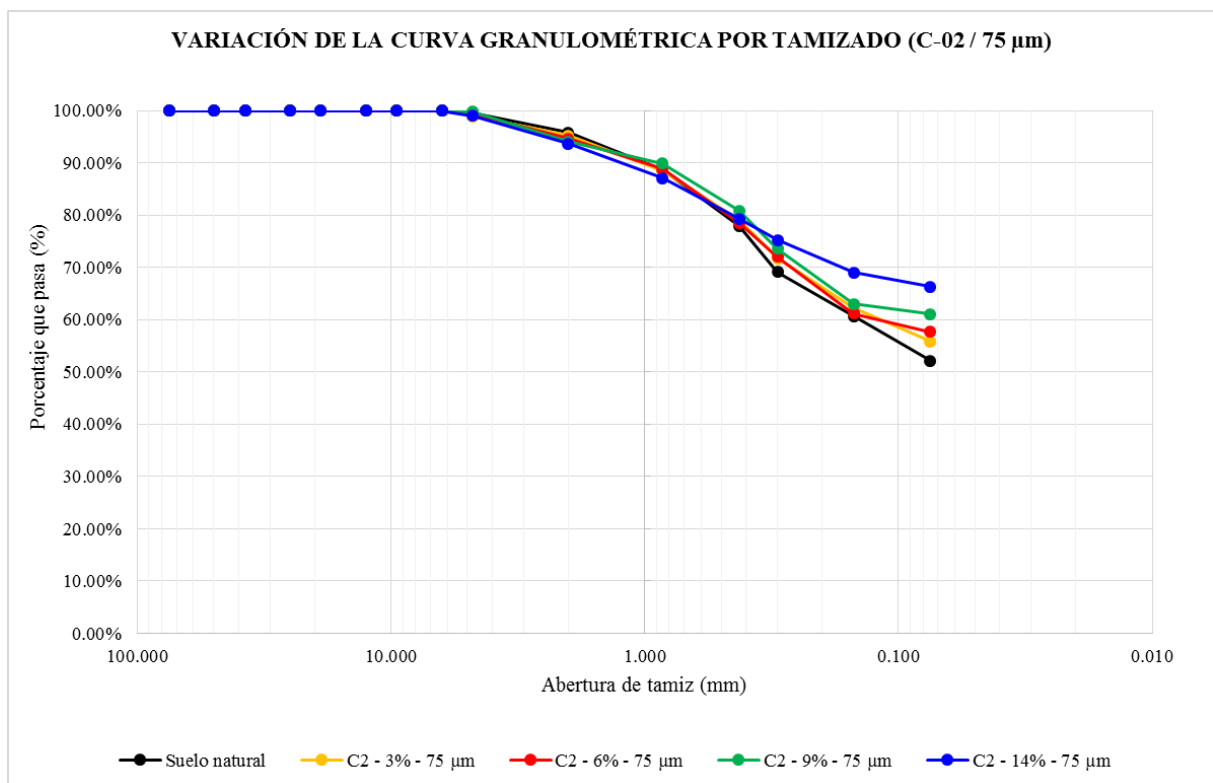


Gráfico 4: Variación de la curva granulométrica por tamizado para el suelo de la calicata N° 02 con combinaciones de vidrio en polvo de tamaño < 75  $\mu\text{m}$   
Fuente: Elaboración propia

<b>Calicata N° 01 - Vidrio &lt; 75 µm</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Natural</b>	<b>3% - 75 µm</b>	<b>6% - 75 µm</b>	<b>9% - 75 µm</b>	<b>14% - 75 µm</b>
<b>% Grava</b>	<b>1.00%</b>	<b>1.20%</b>	<b>0.80%</b>	<b>1.00%</b>	<b>0.60%</b>
<b>% Arena</b>	<b>45.70%</b>	<b>42.10%</b>	<b>40.80%</b>	<b>36.50%</b>	<b>33.50%</b>
<b>% Limos + arcilla</b>	<b>53.30%</b>	<b>56.70%</b>	<b>58.40%</b>	<b>62.50%</b>	<b>65.90%</b>

*Tabla 22: Distribución granulométrica del suelo natural de la calicata N° 01 y sus combinaciones con vidrio en polvo de tamaño < 75 µm*  
*Fuente: Elaboración propia*

<b>Calicata N° 02 - Vidrio 300 µm - 75 µm</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Natural</b>	<b>3% - 75 µm</b>	<b>6% - 75 µm</b>	<b>9% - 75 µm</b>	<b>14% - 75 µm</b>
<b>% Grava</b>	<b>0.40%</b>	<b>1.10%</b>	<b>0.60%</b>	<b>0.20%</b>	<b>1.00%</b>
<b>% Arena</b>	<b>47.50%</b>	<b>43.10%</b>	<b>41.70%</b>	<b>38.70%</b>	<b>32.70%</b>
<b>% Limos + arcilla</b>	<b>52.10%</b>	<b>55.80%</b>	<b>57.70%</b>	<b>61.10%</b>	<b>66.30%</b>

*Tabla 23: Distribución granulométrica del suelo natural de la calicata N° 02 y sus combinaciones con vidrio en polvo de tamaño < 75 µm*  
*Fuente: Elaboración propia*

La curva granulométrica de la muestra de suelo extraída de la calicata N° 03 se presenta en los anexos de la presente investigación. Dicha muestra de suelo no ha sido evaluada con adiciones de polvo de vidrio puesto que sus características indican una similitud bastante cercana con el suelo de la muestra de suelo de la calicata N° 02. Las muestras de suelo de las calicatas N° 01 y N° 02 fueron evaluadas con adiciones de polvo de vidrio, puesto que en estado natural éstos suelos muestran diferencias en aspectos de consistencia y máxima densidad seca.

### **3. Análisis granulométrico por hidrometría (MTC E 109 – ASTM D 422)**

En base a los procedimientos de ensayo de la norma MTC E 109 se realizó el ensayo de granulometría mediante el hidrómetro de la fracción gruesa del suelo en estado natural y adicionado con polvo de vidrio en dosificaciones de 3%, 6%, 9% y 14% en peso seco del suelo y en la granulometría < 75 µm. No se realizó el ensayo para el tamaño de grano de vidrio de entre 75 µm – 300 µm, puesto que este material no influye en la fracción fina del material arcilloso, puesto que es el pasante de la malla N° 50 pero retenido en la N° 200.

En el gráfico N° 05 y N° 06 se observa la variación de la curva granulométrica del suelo respecto de la adición del vidrio en polvo en diferentes dosificaciones. Se logra notar que conforme se añaden porcentajes de polvo de vidrio, la curva granulométrica empieza a moverse hacia la parte baja de la gráfica, pues como se observa, el porcentaje que pasa para

cada combinación de suelo – vidrio, va disminuyendo conforme el aumento de vidrio. Este comportamiento es observado en las muestras de suelo de ambas calicatas N° 01 y N° 02.

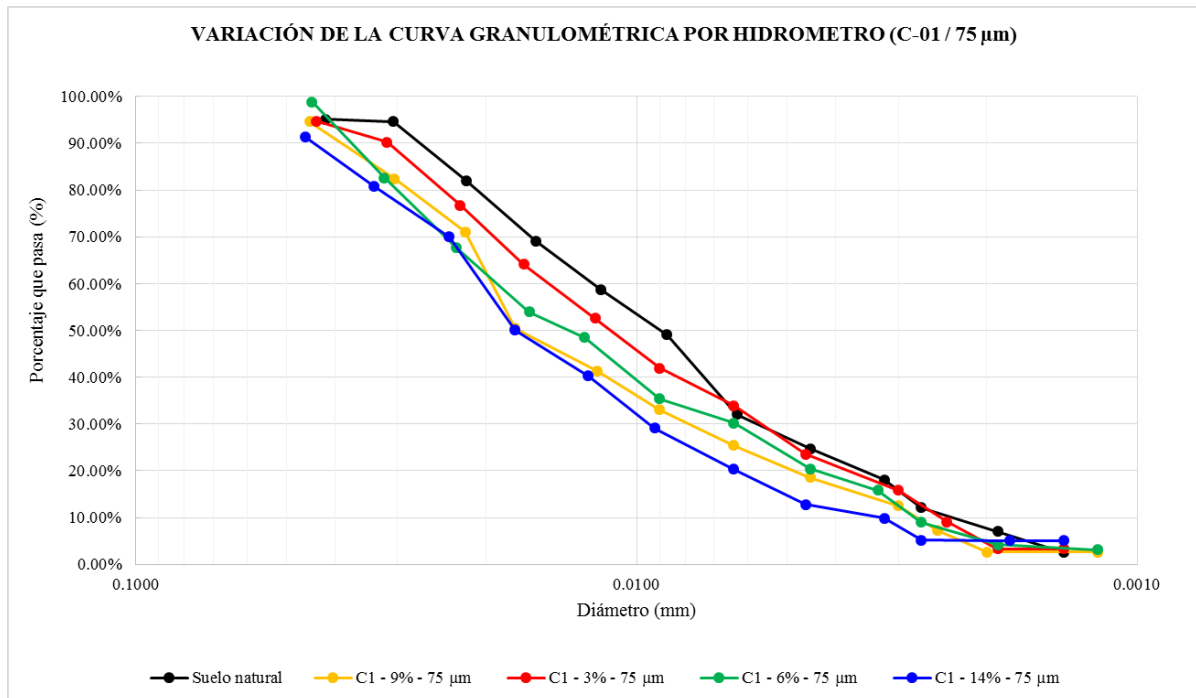


Gráfico 5: Variación de la curva granulométrica por hidrometría para suelo de la calicata N° 01 y sus combinaciones con vidrio en polvo.  
Fuente: Elaboración propia

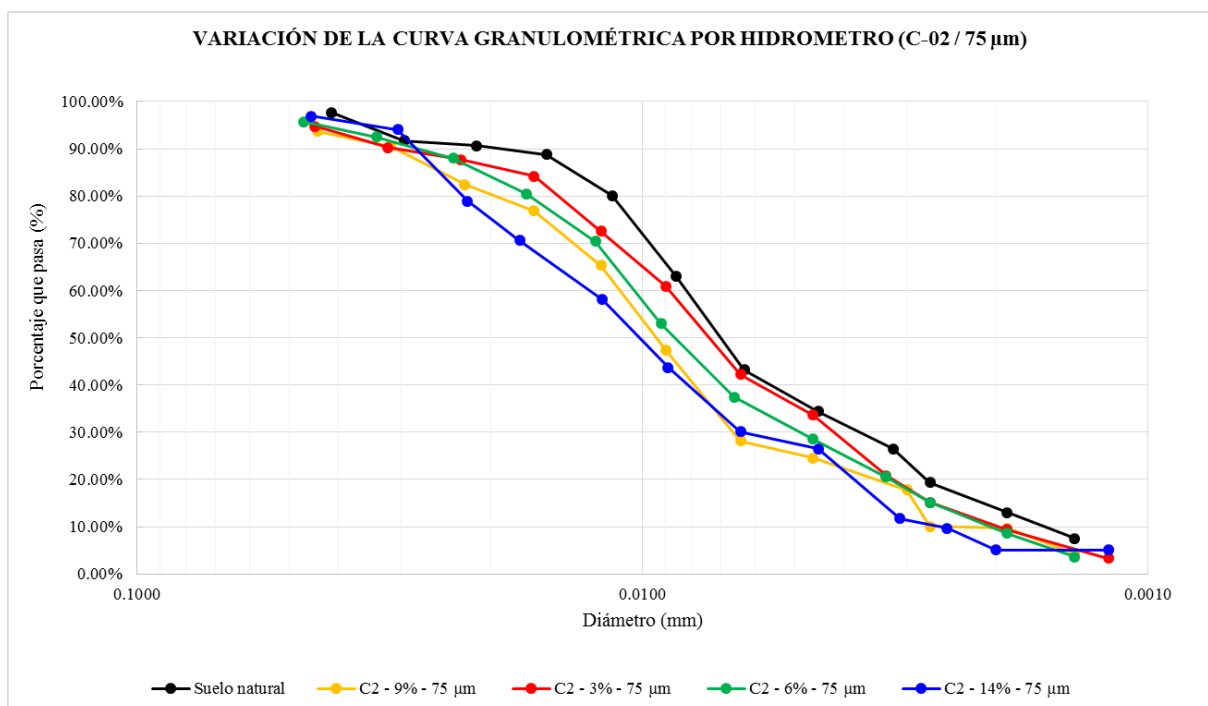


Gráfico 6: Variación de la curva granulométrica por hidrometría para suelo de la calicata N° 02 y sus combinaciones con vidrio en polvo.  
Fuente: Elaboración propia

#### 4. Límites de Atterberg

Se realizaron en este apartado los ensayos para determinar el límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) del suelo natural y sus combinaciones con vidrio en polvo. Se hizo uso de la normativa MTC E 110 para los procedimientos de ensayo del Límite líquido y la MTC E 111 para el Límite plástico e índice de plasticidad.

En el gráfico N° 7 y N° 8 se observa la variación del límite líquido del suelo de la calicata N° 01 y N° 02 respectivamente, con los diferentes porcentajes de vidrio y en las dos granulometrías propuestas. Del gráfico N° 7 se aprecia que para todos los porcentajes de vidrio en polvo, y para ambas granulometrías, el límite líquido disminuye; sin embargo, se nota que la tendencia decreciente del límite líquido llega a un mínimo para el 9% de vidrio de 300 - 75  $\mu\text{m}$  y de 6% para el vidrio < 75  $\mu\text{m}$ , a partir de los cuales el límite líquido empieza a aumentar.

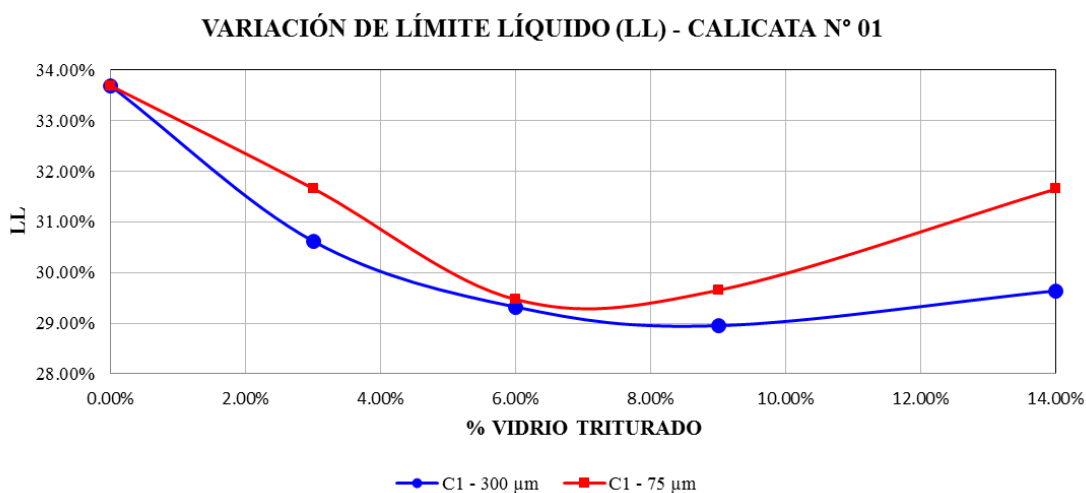


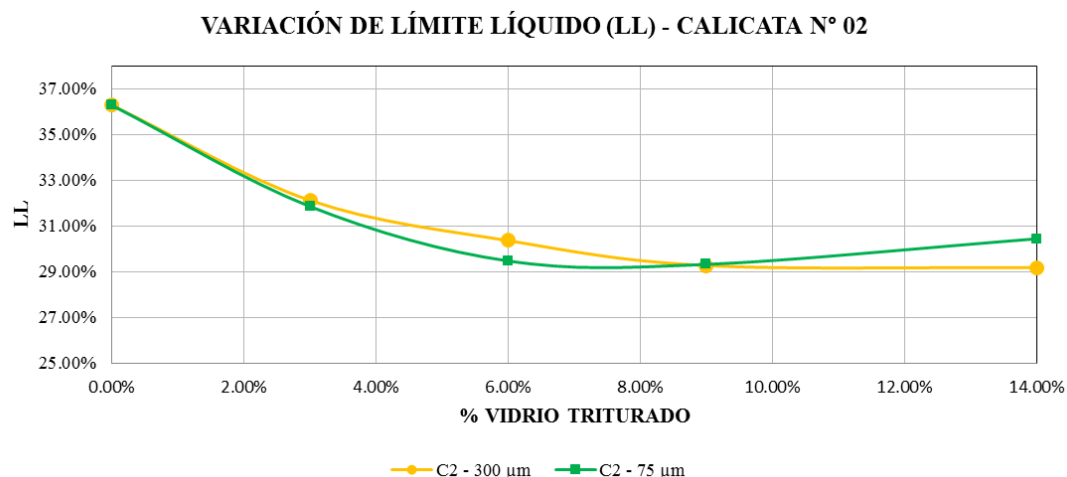
Gráfico 7: Variación del límite líquido (LL) del suelo de la calicata N° 01 y sus combinaciones con polvo de vidrio en las dos granulometrías propuestas.

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en el gráfico N° 8 se observa que la mayor disminución del límite líquido del suelo se da para un 14% de vidrio para la gradación 300 - 75  $\mu\text{m}$ , y para un 9% para la gradación < 75  $\mu\text{m}$ . Estos resultados coinciden con la investigación de los autores O. A. Babatunde, J. E. Sani y A. H. Sambo [16], quienes indican en su investigación que los valores más bajos de límite líquido se obtienen para el 6% de vidrio en polvo, a partir del cual éste parámetro empieza a aumentar para dosificaciones mayores.

Se aprecia también que para la muestras de suelo de ambas calicatas se obtuvieron mejores resultados reduciendo el límite líquido con la granulometría de 300 - 75  $\mu\text{m}$ , esto

puede deberse a que al presentar esta gradación, el vidrio actúa como un tipo de “arena”, que atenúa las características cohesivas del suelo arcilloso en estudio.



*Gráfico 8: Variación del límite líquido (LL) del suelo de la calicata N° 02 y sus combinaciones con polvo de vidrio en las dos granulometrías propuestas.*

*Fuente: Elaboración propia*

En el gráfico N° 9 y N° 10 se observa la variación del límite plástico del suelo de la calicata N° 01 y N° 02 respectivamente, con los diferentes porcentajes de vidrio y en las dos granulometrías propuestas. Se aprecia que para ambas muestras de suelo y ambas granulometrías, el límite plástico disminuye conforme aumenta el porcentaje de vidrio en polvo, teniendo un valor mínimo para el 14% de vidrio. Para la calicata N° 01 se nota que a partir del 9% de vidrio en polvo, el límite plástico no disminuye en grandes cantidades, sino que va decreciendo paulatinamente. Para el caso de la calicata N° 02, el decrecimiento del límite plástico adopta una tendencia lineal. Se aprecia también que, al igual que en el caso del límite líquido, se obtuvieron mejores resultados reduciendo el límite plástico con la granulometría de 300 - 75 µm. Estos resultados coinciden con la mayoría de investigaciones usadas como referencia.

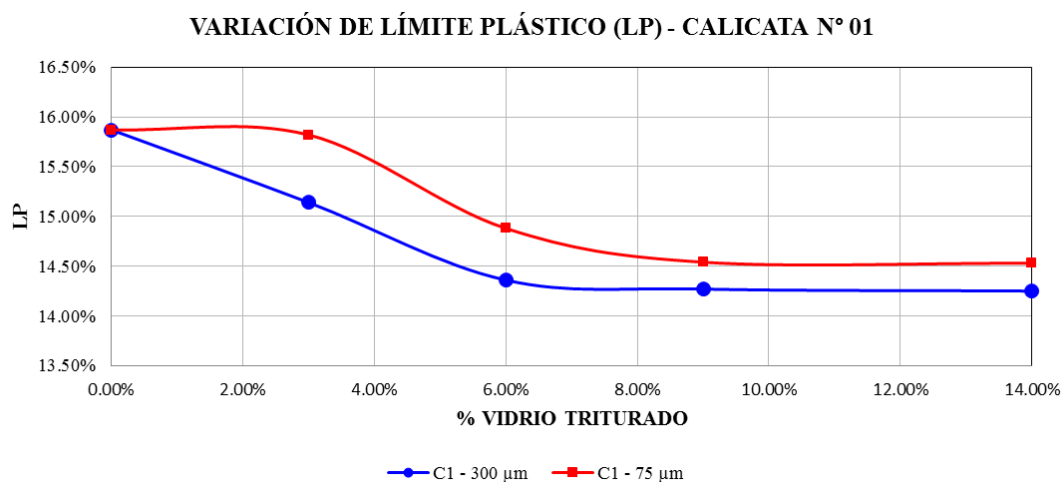


Gráfico 9: Variación del límite plástico (LP) del suelo de la calicata N° 01 y sus combinaciones con polvo de vidrio en las dos granulometrías propuestas.  
Fuente: Elaboración propia

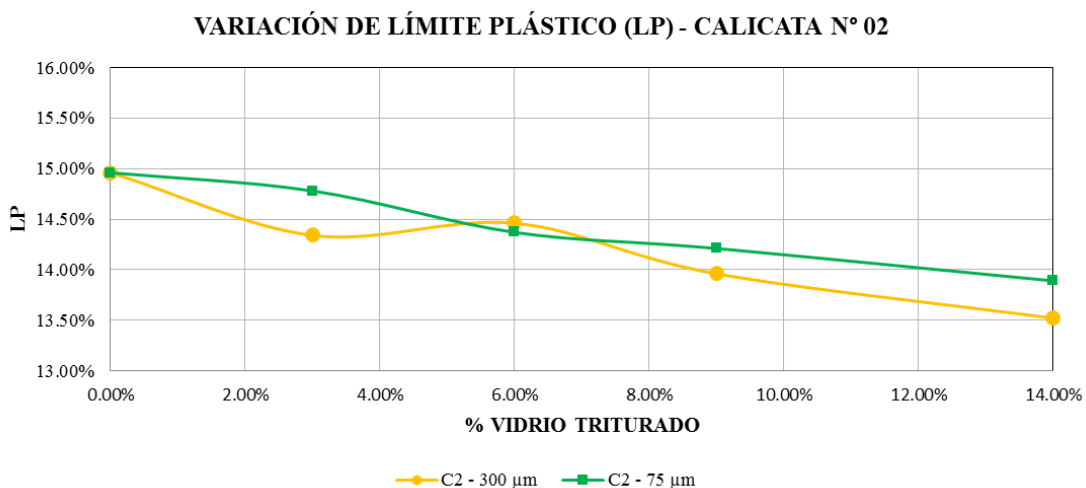


Gráfico 10: Variación del límite plástico (LP) del suelo de la calicata N° 02 y sus combinaciones con polvo de vidrio en las dos granulometrías propuestas.  
Fuente: Elaboración propia

En el gráfico N° 11 y N° 12 se observa la variación del índice de plasticidad del suelo de la calicata N° 01 y N° 02, con los diferentes porcentajes de vidrio y en las dos granulometrías propuestas. Se aprecia que, para todos los porcentajes de vidrio en polvo, para ambas muestras de suelo y para ambas granulometrías, el índice de plasticidad disminuye; sin embargo, se nota que la tendencia decreciente del índice de plasticidad llega a un mínimo para el 9% de vidrio de 300 - 75 μm y de 6% para el vidrio < 75 μm, a partir de los cuales el índice de plasticidad empieza a aumentar. El gráfico también indica que el mayor índice de plasticidad para el suelo adicionado se da para el 14% de vidrio, y este aumento es mayor para la granulometría < 75 μm. Estos resultados difieren con las investigaciones usadas como referencia, puesto que en dicha literatura se indica una

tendencia lineal de crecimiento o decrecimiento del índice de plasticidad para todas las dosificaciones de vidrio en polvo.

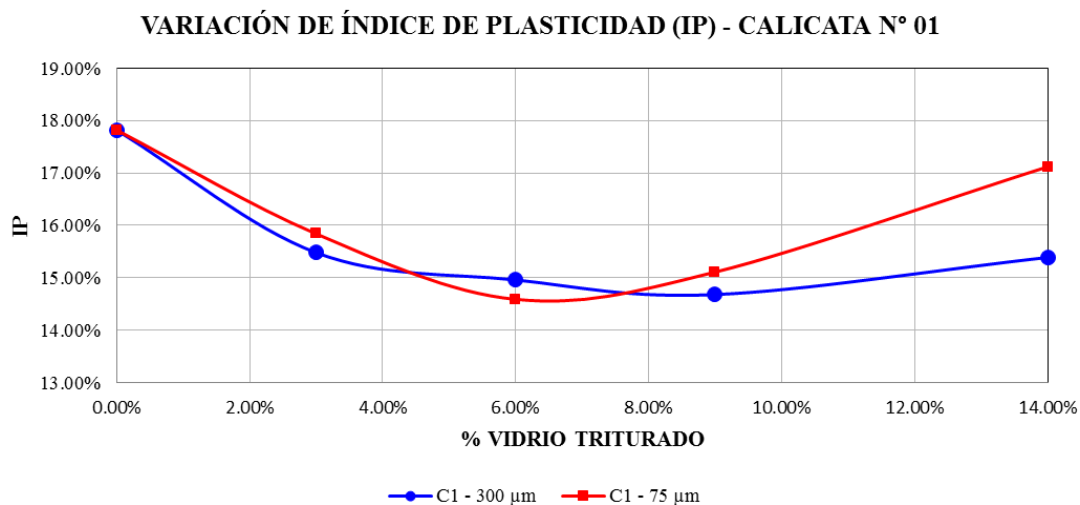


Gráfico 11: Variación del índice de plasticidad (IP) del suelo de la calicata N° 01 y sus combinaciones con polvo de vidrio en las dos granulometrías propuestas.

Fuente: Elaboración propia

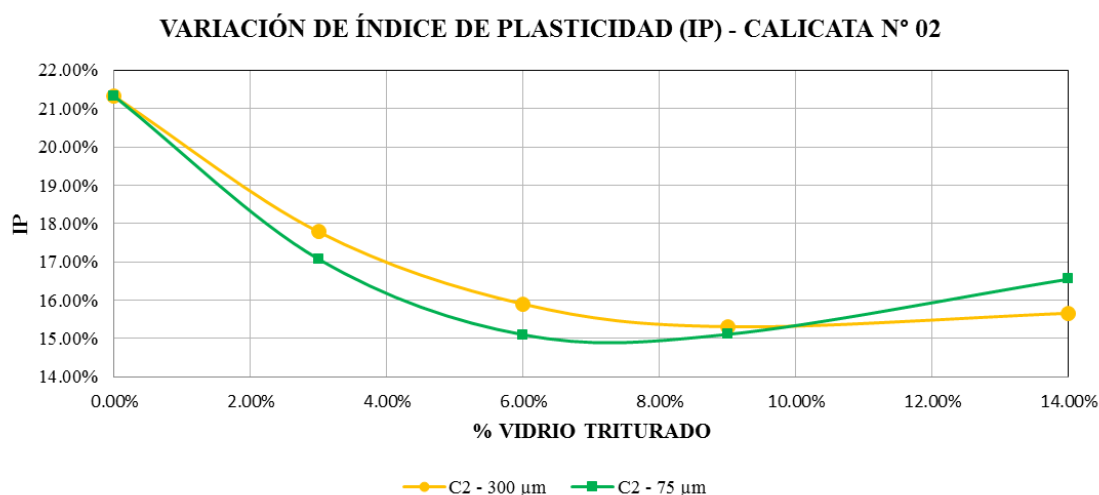


Gráfico 12: Variación del índice de plasticidad (IP) del suelo de la calicata N° 02 y sus combinaciones con polvo de vidrio en las dos granulometrías propuestas.

Fuente: Elaboración propia

## 5. Clasificación de suelos

De acuerdo con los resultados obtenidos de los anteriores ensayos, se procedió a la clasificación del suelo en estudio, para ello se hizo uso de las metodologías SUCS y AASHTO. De la clasificación SUCS se obtiene como resultado que el suelo de la calicata N° 01 se clasifica como “CL” o arcilla arenosa de baja plasticidad. Para el suelo adicionado con el vidrio en granulometría de entre 300 – 75 µm, el suelo pasa a ser un suelo tipo “SC” o “arena arcillosa” a partir de un 6% de vidrio en polvo en adelante, esto debido a una

reducción en el porcentaje de finos conforme el aumento de vidrio. Para el caso del suelo adicionado con el vidrio en granulometría de  $< 75 \mu\text{m}$ , éste mantiene su clasificación como “CL” para todos los porcentajes de vidrio molido.

Acorde con la clasificación AASHTO, el suelo de la calicata N° 01 se clasifica como de grupo A-6 (7), considerado como un suelo arcilloso de deficientes características portantes para ser usado como subrasante. El suelo adicionado con vidrio en polvo mantiene su condición de suelo arcilloso al pertenecer al grupo A-6; esto se da para todas las dosificaciones y ambas granulometrías. El único cambio en la clasificación de suelo por AASHTO para el suelo adicionado es el índice de grupo (IG), el cual varía conforme la dosificación de vidrio en polvo.

El resumen de la clasificación del suelo por SUCS y AASHTO de calicata N° 01 y su combinación con las diferentes dosificaciones de vidrio se muestran en la tabla N° 24.

<b>C - 01</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Clasificación SUCS</b>		<b>Clasificación AASHTO</b>	
	<b>Grupo</b>	<b>Material</b>	<b>Grupo</b>	<b>Material</b>
Suelo natural	CL	Arcilla arenosa de baja plasticidad	A-6 (7)	Suelo arcilloso de mala calidad
Suelo adicionado (300 $\mu\text{m}$ )	3.00%	Arcilla arenosa de baja plasticidad	A-6 (5)	Suelo arcilloso de mala calidad
	6.00%	Arena arcillosa	A-6 (5)	Suelo arcilloso de mala calidad
	9.00%	Arena arcillosa	A-6 (3)	Suelo arcilloso de mala calidad
	14.00%	Arena arcillosa	A-6 (3)	Suelo arcilloso de mala calidad
Suelo adicionado (75 $\mu\text{m}$ )	3.00%	Arcilla arenosa de baja plasticidad	A-6 (7)	Suelo arcilloso de mala calidad
	6.00%	Arcilla arenosa de baja plasticidad	A-6 (7)	Suelo arcilloso de mala calidad
	9.00%	Arcilla arenosa de baja plasticidad	A-6 (8)	Suelo arcilloso de mala calidad
	14.00%	Arcilla arenosa de baja plasticidad	A-6 (10)	Suelo arcilloso de mala calidad

*Tabla 24: Resumen de clasificación SUCS y AASHTO del suelo de la calicata N° 01 y su combinación con los diferentes porcentajes de vidrio en polvo.*

*Fuente: Elaboración propia*

De acuerdo con SUCS, el suelo de la calicata N° 02 también se clasifica como “CL” o arcilla arenosa de baja plasticidad. Para el suelo adicionado con el vidrio en granulometría de entre 300 – 75  $\mu\text{m}$ , el suelo pasa a ser un suelo tipo “SC” o “arena arcillosa” a partir de un 3% de vidrio en polvo en adelante. Para el caso del suelo adicionado con el vidrio en granulometría de < 75  $\mu\text{m}$ , éste mantiene su clasificación como “CL” para todos los porcentajes de vidrio molido.

Acorde con la clasificación AASHTO, el suelo de la calicata N° 02 se clasifica como de grupo A-6 (8), considerado como un suelo arcilloso de deficientes características portantes para ser usado como subrasante. Al igual que con la calicata N° 01, el suelo adicionado con vidrio en polvo mantiene su condición de suelo arcilloso al pertenecer al grupo A-6; esto se da para todas las dosificaciones y ambas granulometrías. El único cambio en la clasificación de suelo por AASHTO para el suelo adicionado es el índice de grupo (IG), el cual varía conforme la dosificación de vidrio en polvo.

El resumen de la clasificación del suelo por SUCS y AASHTO de calicata N° 02 y su combinación con las diferentes dosificaciones de vidrio se muestran en la tabla N° 25.

<b>C - 02</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Clasificación SUCS</b>		<b>Clasificación AASHTO</b>	
	<b>Grupo</b>	<b>Material</b>	<b>Grupo</b>	<b>Material</b>
Suelo natural	CL	Arcilla arenosa de baja plasticidad	A-6 (8)	Suelo arcilloso de mala calidad
Suelo adicionado (300 $\mu\text{m}$ )	3.00%	SC	Arena arcillosa	A-6 (5)
	6.00%	SC	Arena arcillosa	A-6 (4)
	9.00%	SC	Arena arcillosa	A-6 (3)
	14.00%	SC	Arena arcillosa	A-6 (2)
Suelo adicionado (75 $\mu\text{m}$ )	3.00%	CL	Arcilla arenosa de baja plasticidad	A-6 (7)
	6.00%	CL	Arcilla arenosa de baja plasticidad	A-6 (7)
	9.00%	CL	Arcilla arenosa de baja plasticidad	A-6 (8)
	14.00%	CL	Arcilla arenosa de baja plasticidad	A-6 (10)

*Tabla 25: Resumen de clasificación SUCS y AASHTO del suelo de la calicata N° 02 y su combinación con los diferentes porcentajes de vidrio en polvo.*

*Fuente: Elaboración propia*

## 6. Sales solubles, cloruros y sulfatos

Para determinar el contenido de sales solubles totales, cloruros solubles y sulfatos solubles en el suelo natural y también el suelo adicionado, se hizo uso de la normativa NTP 339.152:2002, NTP 339.177:2002, NTP 339.178:2002. En la tabla N° 26 y N° 27 se detallan los contenidos de sales solubles totales, cloruros y sulfatos en las muestras de suelo natural y adicionada de la calicata N° 01 y N° 02 respectivamente. Se observa que las sales solubles totales desminuyen para todos los porcentajes de vidrio en polvo y para ambas granulometrías, obteniéndose los valores más bajos para el 9% de vidrio en polvo y la granulometría de entre 300 – 75  $\mu\text{m}$ . Este comportamiento se presenta para las muestras de suelo de ambas calicatas.

El contenido de cloruros de ambas muestras de suelo (calicata N° 01 y N° 02) adquiere un comportamiento no lineal, pues aumenta y disminuye sin notoria tendencia conforme el aumento de polvo de vidrio. El valor más bajo de sales solubles se da para un 14% de vidrio y para una granulometría de entre 300 – 75  $\mu\text{m}$  de vidrio en polvo. Los valores de cloruros no varían notablemente, casi que se mantienen constantes. Por el contrario, el contenido de sulfatos tiende a disminuir conforme el aumento de vidrio en polvo, obteniéndose valores más bajos de este tipo de compuesto, con un 14% de polvo de vidrio y una gradación de 300 – 75  $\mu\text{m}$ .

Descripción		C-01								
		Suelo natural	C-01 3% Vidrio		C-01 6% de Vidrio		C-01 9% de Vidrio		C-01 14% de Vidrio	
			50	200	50	200	50	200	50	200
Sales Solubles	ppm	8420	7560	6520	5260	4520	4820	4910	5140	5320
Totales	%	0.84	0.76	0.65	0.53	0.45	0.48	0.49	0.51	0.53
Claruros	ppm	2340	2150	2460	2310	2650	2150	2450	2130	2260
Cl <sup>-</sup>	%	0.23	0.22	0.25	0.23	0.27	0.22	0.25	0.21	0.23
Sulfatos	ppm	1520	1520	1640	1490	1210	1420	1052	980	1120
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	%	0.15	0.15	0.16	0.15	0.12	0.14	0.11	0.10	0.11

Tabla 26: Resumen de resultados de ensayos químicos al suelo natural y adicionado con vidrio en polvo  
Fuente: Elaboración propia

Descripción		Suelo natural	C-02							
			C-02 3% Vidrio		C-02 6% de Vidrio		C-02 9% de Vidrio		C-02 14% de Vidrio	
			50	200	50	200	50	200	50	200
Sales Solubles	ppm	7920	7280	6470	5150	4460	4520	4670	4610	4680
Totales	%	0.79	0.73	0.65	0.52	0.45	0.45	0.47	0.46	0.47
Claruros	ppm	2560	2370	2410	2310	2550	2200	2440	2120	2210
Cl <sup>-</sup>	%	0.26	0.24	0.24	0.23	0.26	0.22	0.24	0.21	0.22
Sulfatos	ppm	1640	1620	1680	1600	1530	1490	1460	1220	1110
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	%	0.16	0.16	0.17	0.16	0.15	0.15	0.15	0.12	0.11

Tabla 27: Resumen de resultados de ensayos químicos al suelo natural y adicionado con vidrio en polvo

Fuente: Elaboración propia

**II. Determinar y comparar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer en estado virgen y con adiciones variables de vidrio molido (3%, 6%, 9% y 14%) y en diferentes granulometrías (300  $\mu$ m – 75  $\mu$ m) mediante ensayos normalizados por el Manual de ensayos de laboratorio del MTC 2014**

**1. Proctor modificado (MTC E 115 – NTP 339.141)**

Para este ensayo se hizo de la norma MTC E 115 del Manual de Ensayo de Materiales del MTC. De acuerdo con ella, se tuvo que hacer uso del método “A” de compactación, el cual consiste en la compactación del suelo en 05 capas y haciendo uso de 25 golpes por cada una, y para ello se debe hacer uso del molde de 4 pulgadas de diámetro.

En la tabla N° 28 se detallan los valores de máxima densidad seca (MDS) y óptimo contenido de humedad (OCH) del suelo de la calicata N° 01 en estado natural y su combinación con las dosificaciones de vidrio en polvo. En los gráficos N° 13 y N° 14 se observa la variación de las curvas de compactación del suelo natural y suelo adicionado con polvo de vidrio para 75 - 300  $\mu$ m y < 75  $\mu$ m respectivamente. Se aprecia que las curvas tienden a moverse al lado izquierdo superior conforme se aumenta el contenido de vidrio en polvo, lo que coincide con el aumento de la MDS y la reducción del OCH.

C-01		
Descripción	Máxima densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Óptimo contenido de humedad (%)
Suelo natural	1.756	14.95
Suelo adicionado (300 μm)	3.00%	1.791
	6.00%	1.813
	9.00%	1.830
	14.00%	1.832
Suelo adicionado (75 μm)	3.00%	1.790
	6.00%	1.812
	9.00%	1.830
	14.00%	1.835

Tabla 28: Resumen de resultados de ensayo Proctor modificado a suelo natural y suelo adicionado con vidrio en polvo – calicata N° 01  
Fuente: Elaboración propia

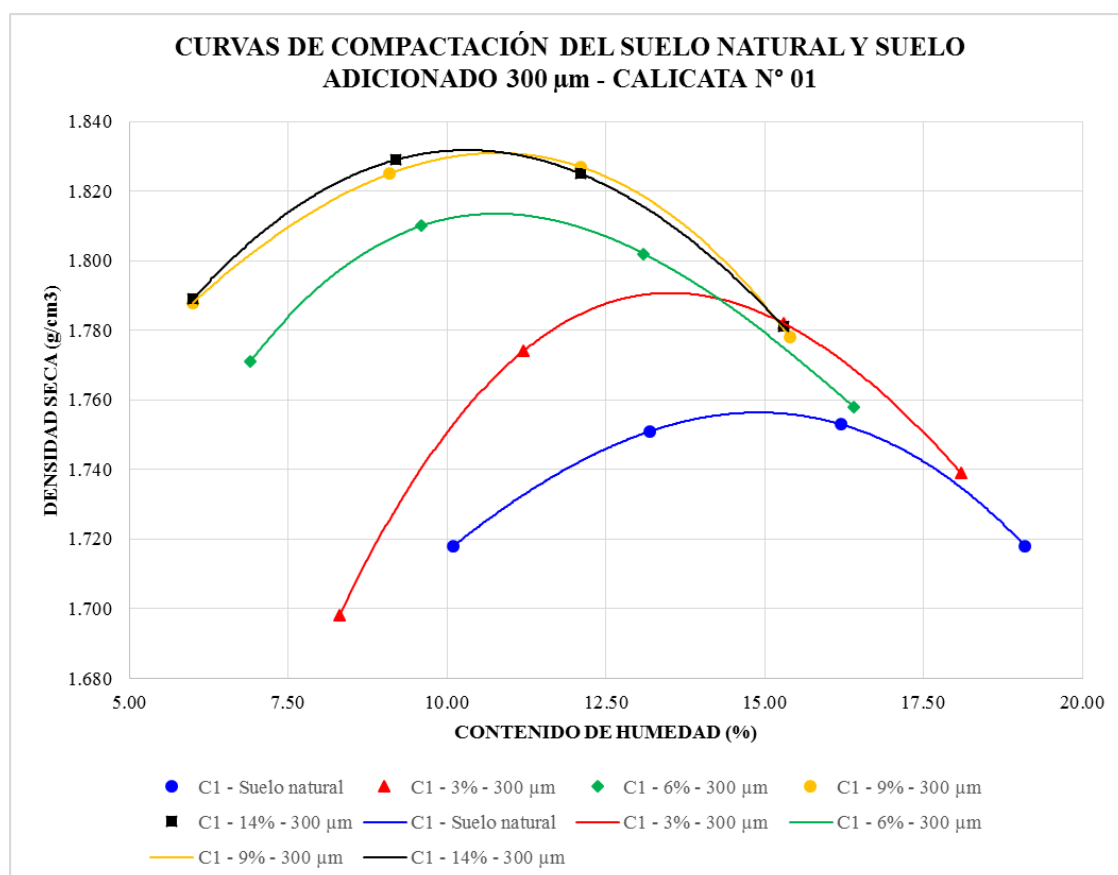


Gráfico 13: Variación de la curva de compactación del suelo respecto a la combinación suelo arcilloso – vidrio en polvo 75 a 300 μm  
Fuente: Elaboración propia

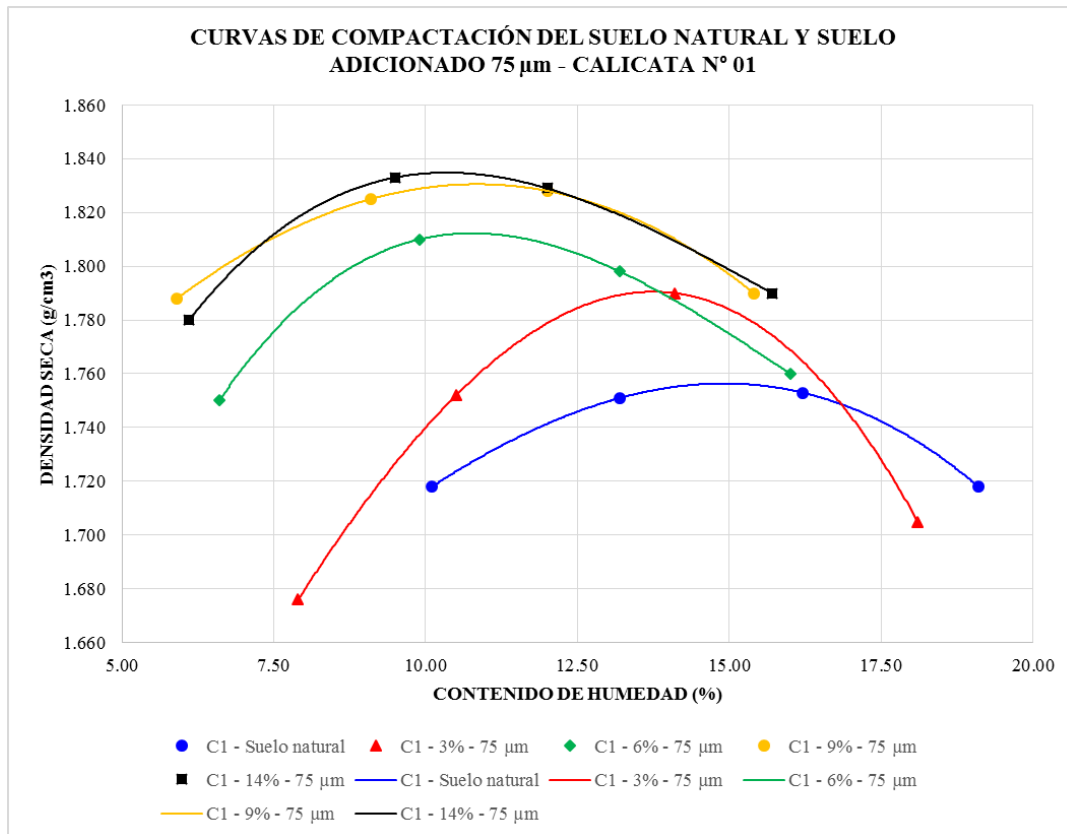


Gráfico 14: Variación de la curva de compactación del suelo respecto a la combinación suelo arcilloso – vidrio en polvo < 75  $\mu\text{m}$   
Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 15 se aprecia la modificación de la MDS del suelo respecto al contenido de vidrio en polvo. Se observa que la MDS aumenta conforme el aumento del vidrio, adoptando una tendencia casi lineal, siendo la MDS más alta la que corresponde al 14% de polvo de vidrio, siendo 1.832 y 1.835 g/cm<sup>3</sup> para la granulometría de 75 - 300  $\mu\text{m}$  y < 75  $\mu\text{m}$  respectivamente. En el gráfico 16 se aprecia el cambio en el OCH del suelo respecto a las adiciones de vidrio. Se observa que de manera inversa a la MDS, el OCH decrece de manera casi lineal conforme el aumento en el contenido de vidrio en polvo, siendo el valor más bajo de 10.52% y 10.35% para la granulometría de 75 - 300  $\mu\text{m}$  y < 75  $\mu\text{m}$  respectivamente. Estos comportamientos se dan de manera casi idénticos tanto para el vidrio de granulometría de 75 - 300  $\mu\text{m}$  como para < 75  $\mu\text{m}$ .

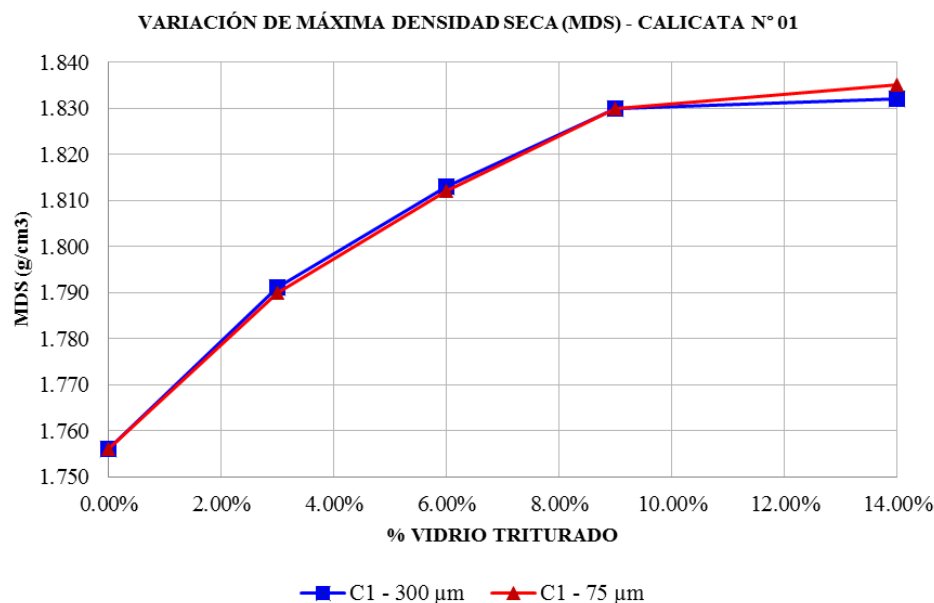


Gráfico 15: Variación de la máxima densidad seca del suelo de la calicata N° 01 respecto del contenido de vidrio en polvo  
Fuente: Elaboración propia

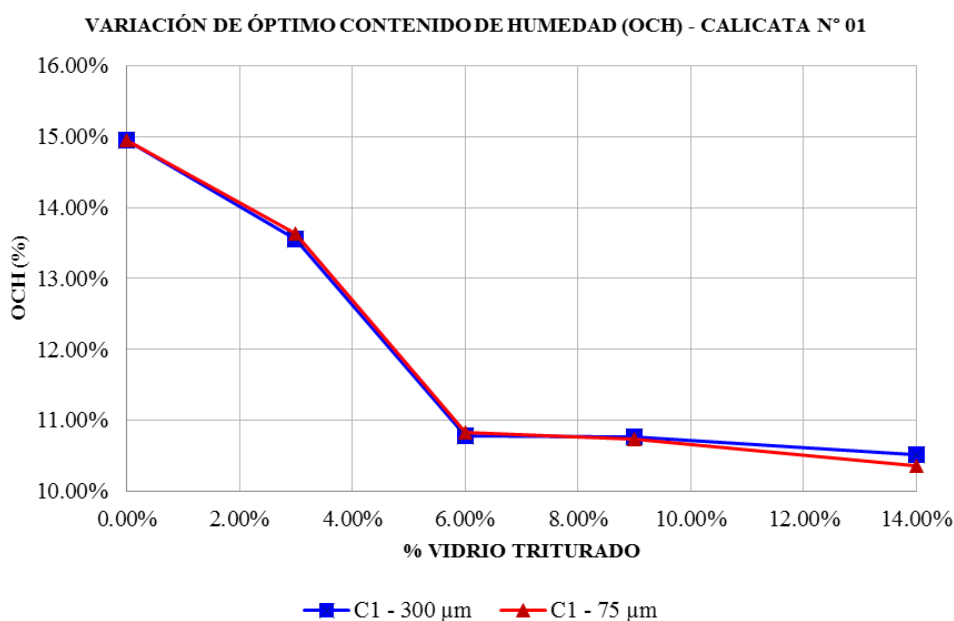


Gráfico 16: Variación del óptimo contenido de humedad del suelo de la calicata N° 01 respecto del contenido de vidrio en polvo  
Fuente: Elaboración propia

En la tabla N° 29 se detallan los valores de máxima densidad seca (MDS) y óptimo contenido de humedad (OCH) del suelo de la calicata N° 02 en estado natural y su combinación con las dosificaciones de vidrio en polvo. En los gráficos N° 17 y N° 18 se observa la variación de las curvas de compactación del suelo natural y suelo adicionado con polvo de vidrio para 75 - 300 μm y < 75 μm respectivamente. El comportamiento de las

curvas de compactación es similar al del suelo de la calicata N° 01, donde se aprecia que las curvas tienden a moverse al lado izquierdo superior conforme se aumenta el contenido de vidrio en polvo, lo que coincide con el aumento de la MDS y la reducción del OCH.

C-02		
Descripción	Máxima densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Óptimo contenido de humedad (%)
Suelo natural	1.691	18.62
Suelo adicionado (300 µm)	3.00%	1.734
	6.00%	1.774
	9.00%	1.783
	14.00%	1.794
Suelo adicionado (75 µm)	3.00%	1.730
	6.00%	1.770
	9.00%	1.790
	14.00%	1.796

Tabla 29: Resumen de resultados de ensayo Proctor modificado a suelo natural y suelo adicionado con vidrio en polvo – calicata N° 02

Fuente: Elaboración propia

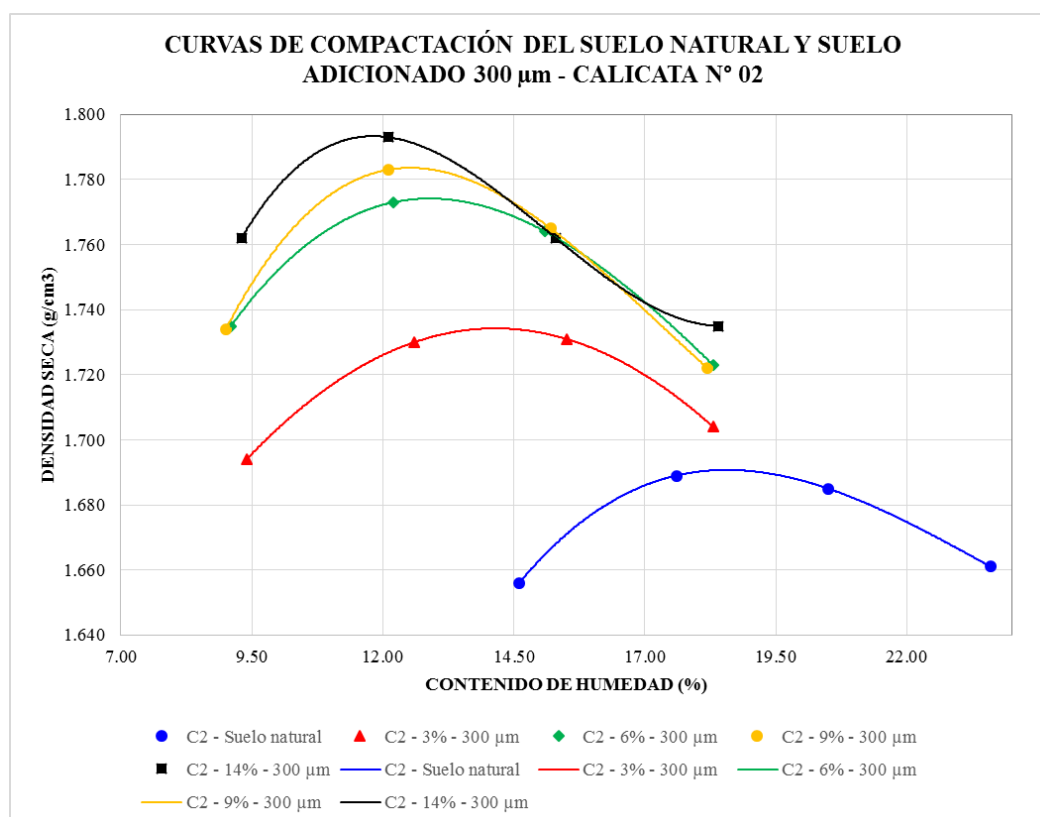


Gráfico 17: Variación de la curva de compactación del suelo respecto a la combinación suelo arcilloso – vidrio en polvo 75 a 300 µm

Fuente: Elaboración propia

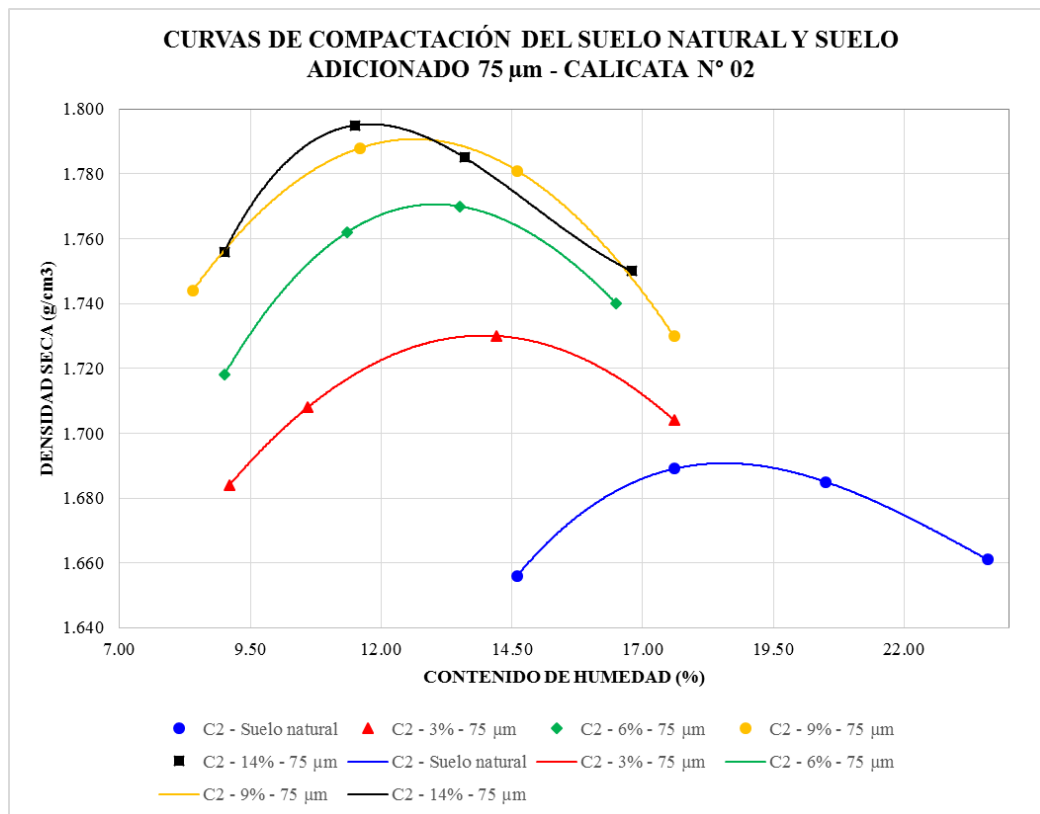


Gráfico 18: Variación de la curva de compactación del suelo respecto a la combinación suelo arcilloso – vidrio en polvo 75 a 300  $\mu\text{m}$

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 19 se aprecia la modificación de la MDS del suelo respecto al contenido de vidrio en polvo. Se observa que la MDS aumenta conforme el aumento del vidrio, adoptando una tendencia casi lineal, siendo la MDS más alta la que corresponde al 14% de polvo de vidrio, siendo 1.794 y 1.796 g/cm<sup>3</sup> para la granulometría de 75 - 300  $\mu\text{m}$  y < 75  $\mu\text{m}$  respectivamente. En el gráfico 20 se aprecia el cambio en el OCH del suelo respecto a las adiciones de vidrio. Se observa que de manera inversa a la MDS, el OCH decrece de manera casi lineal conforme el aumento en el contenido de vidrio en polvo, siendo el valor más bajo de 11.85% y 11.65% para la granulometría de 75 - 300  $\mu\text{m}$  y < 75  $\mu\text{m}$  respectivamente. Estos comportamientos se dan de manera muy similar para el suelo de la calicata N° 01, por lo que se puede deducir que el efecto del vidrio en polvo es el mismo para diferentes tipos de suelos cohesivos.

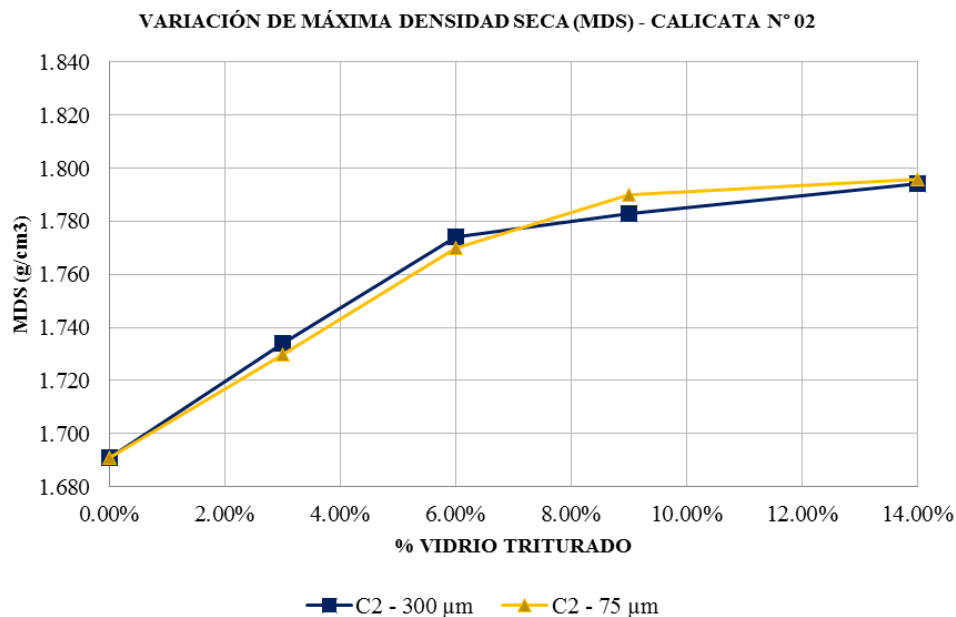


Gráfico 19: Variación de la máxima densidad seca del suelo de la calicata N° 02 respecto del contenido de vidrio en polvo  
Fuente: Elaboración propia

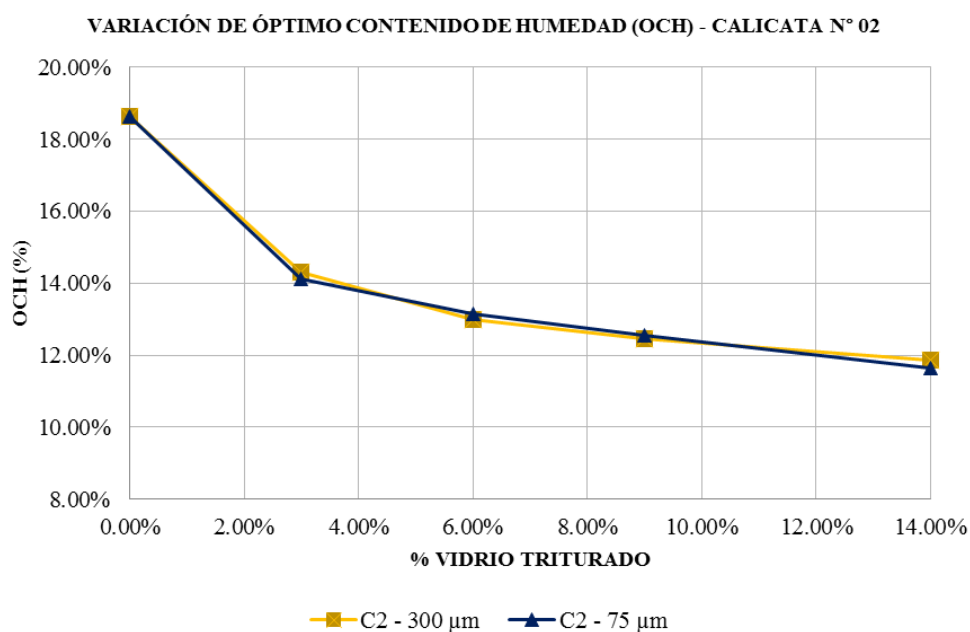


Gráfico 20: Variación del óptimo contenido de humedad del suelo de la calicata N° 02 respecto del contenido de vidrio en polvo  
Fuente: Elaboración propia

## 2. CBR (MTC E 132)

Este ensayo se realizó siguiendo los parámetros y procedimientos descritos en la norma MTC E 132 del Manual de Ensayo de Materiales del MTC. Se obtuvieron como resultados valores de la Relación de Soporte de California (CBR) y valores de expansión luego de que

las muestras estuvieran sumergidas por 96 horas. Los valores de CBR al 95% de la MDS y valores de expansión a las 96 horas se presentan en la tabla N° 30 y N° 31.

En el gráfico N° 22 se aprecia la variación de la expansión del suelo de la calicata N° 01, lo cual indica que conforme se adiciona mayores contenidos de vidrio en polvo se va produciendo una disminución de la expansión del suelo. El valor de expansión del suelo natural es de 0.20%, el cual no es muy alto, sin embargo, al adicionar un 9% de vidrio se logró reducir dicha expansión hasta un 0.05% y 0.04% para la granulometría de 75 - 300  $\mu\text{m}$  y < 75  $\mu\text{m}$  respectivamente. A partir del 9% en adelante se aprecia un ligero aumento en la expansión del suelo.

En el gráfico N° 21 se presenta la variación del CBR del suelo de la calicata N° 01 respecto del contenido de vidrio. Se aprecia que el CBR aumenta para todos los porcentajes de vidrio y para ambas granulometrías. Los incrementos de CBR obtenidos para las dosificaciones de 3%, 6%, 9% y 14% y granulometría de 75 - 300  $\mu\text{m}$ , son de 0.70%, 2.80%, 5.70% y 9.40% respectivamente, con respecto del CBR del suelo natural. Para la granulometría < 75  $\mu\text{m}$  se obtuvieron mejoras del 0.00%, 2.40%, 6.60% y 8.40% respectivamente. Para ambas gradaciones de vidrio, los valores más altos de CBR se obtuvieron para un 14% de vidrio en polvo.

<b>C-01</b>		
<b>Descripción</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>Expansión a las 96 h (%)</b>
<b>Suelo natural</b>	3.800	0.20
<b>Suelo adicionado (300 <math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>3.00%</b>	4.500
	<b>6.00%</b>	6.600
	<b>9.00%</b>	9.500
	<b>14.00%</b>	13.200
<b>Suelo adicionado (75 <math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>3.00%</b>	3.800
	<b>6.00%</b>	6.200
	<b>9.00%</b>	10.400
	<b>14.00%</b>	12.200

*Tabla 30: Resumen de resultados de ensayo CBR para suelo natural de la calicata N° 01 y las combinaciones de suelo y vidrio en polvo  
Fuente: Elaboración propia*

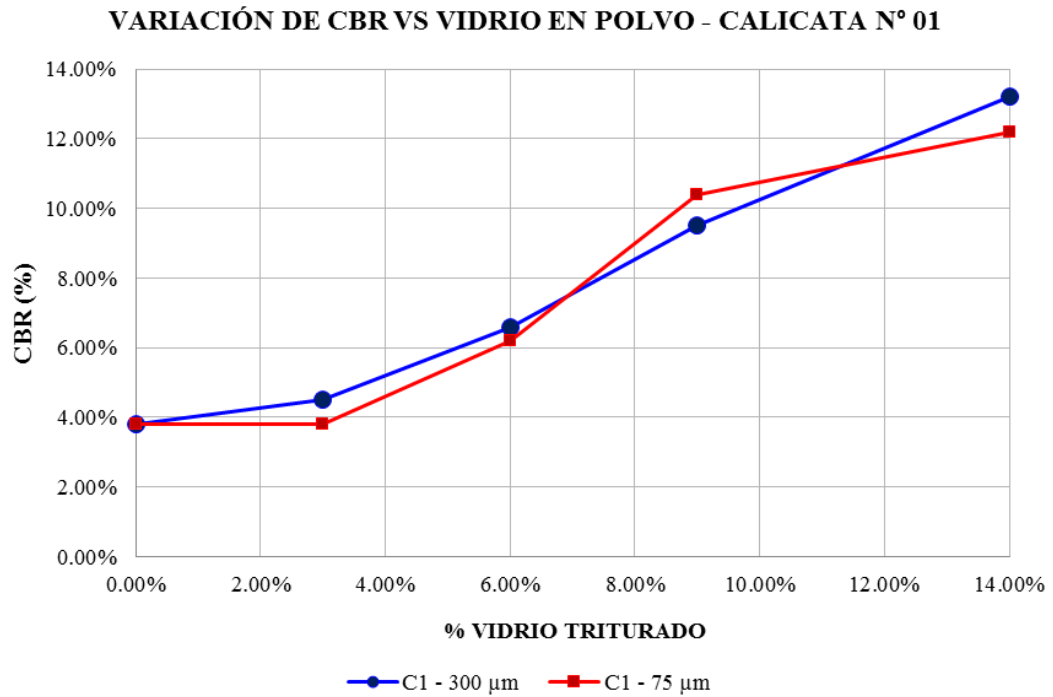


Gráfico 21: Variación del CBR del suelo de la calicata N° 01 respecto al contenido de vidrio  
Fuente: Elaboración propia

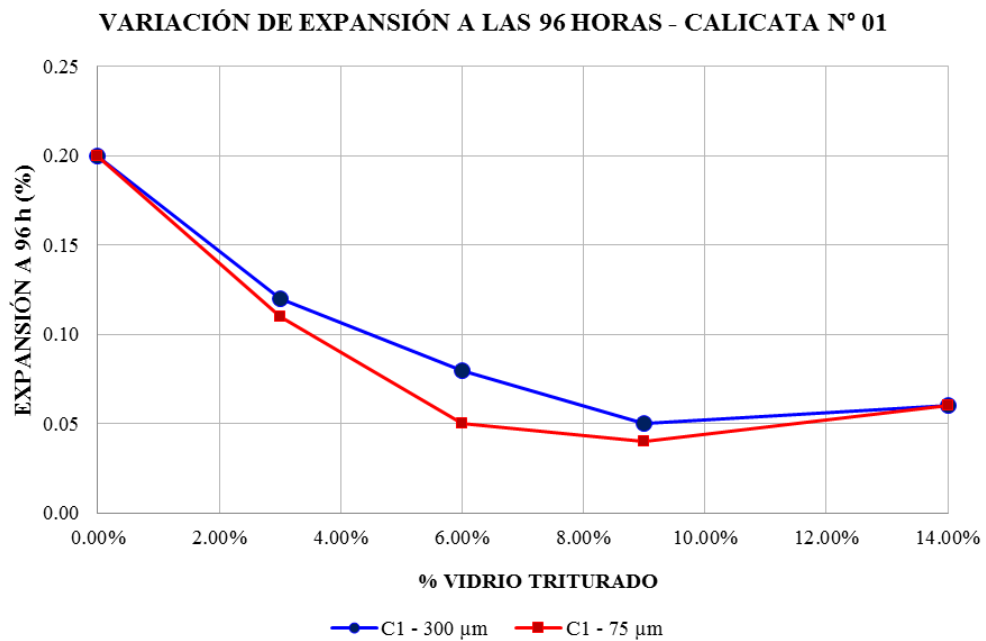


Gráfico 22: Variación de la expansión a las 96 horas del suelo de la calicata N° 01 respecto al contenido de vidrio en polvo  
Fuente: Elaboración propia

<b>C-02</b>		
<b>Descripción</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>Expansión a las 96 h (%)</b>
<b>Suelo natural</b>	3.000	0.36
<b>Suelo adicionado (300 <math>\mu</math>m)</b>	<b>3.00%</b>	3.900
	<b>6.00%</b>	5.700
	<b>9.00%</b>	6.700
	<b>14.00%</b>	10.500
<b>Suelo adicionado (75 <math>\mu</math>m)</b>	<b>3.00%</b>	4.400
	<b>6.00%</b>	5.200
	<b>9.00%</b>	8.900
	<b>14.00%</b>	11.600

*Tabla 31: Resumen de resultados de ensayo CBR para suelo natural de la calicata N° 02 y las combinaciones de suelo y vidrio en polvo  
Fuente: Elaboración propia*

En el gráfico N° 24 se aprecia la variación de la expansión del suelo de la calicata N° 02, lo cual indica que conforme se adiciona mayores contenidos de vidrio en polvo se va produciendo una disminución de la expansión del suelo. El valor de expansión del suelo natural es de 0.20%, el cual no es muy alto, sin embargo, al adicionar un 9% de vidrio se logró reducir dicha expansión hasta un 0.08% y 0.06% para la granulometría de 75 - 300  $\mu$ m y < 75  $\mu$ m respectivamente. Para el 14% se observa un ligero aumento en la expansión del suelo.

En el gráfico N° 25 se presenta la variación del CBR del suelo de la calicata N° 01 respecto del contenido de vidrio. Se aprecia que el CBR aumenta para todos los porcentajes de vidrio y para ambas granulometrías. Los incrementos de CBR obtenidos para las dosificaciones de 3%, 6%, 9% y 14% y granulometría de 75 - 300  $\mu$ m, son de 0.00%, 2.10%, 7.70% y 13.80% respectivamente, con respecto del CBR del suelo natural. Para la granulometría < 75  $\mu$ m se obtuvieron mejoras del 0.20%, 3.60%, 10.00% y 14.20% respectivamente. Para ambas gradaciones de vidrio, los valores más altos de CBR se obtuvieron para un 14% de vidrio en polvo.

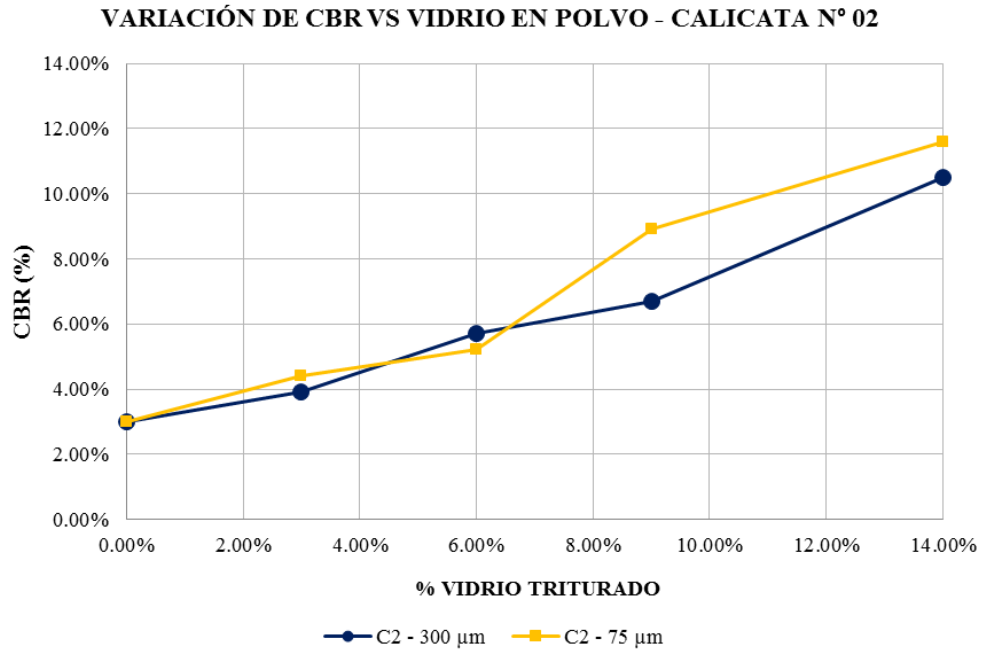


Gráfico 23: Variación del CBR del suelo de la calicata N° 02 respecto al contenido de vidrio  
Fuente: Elaboración propia

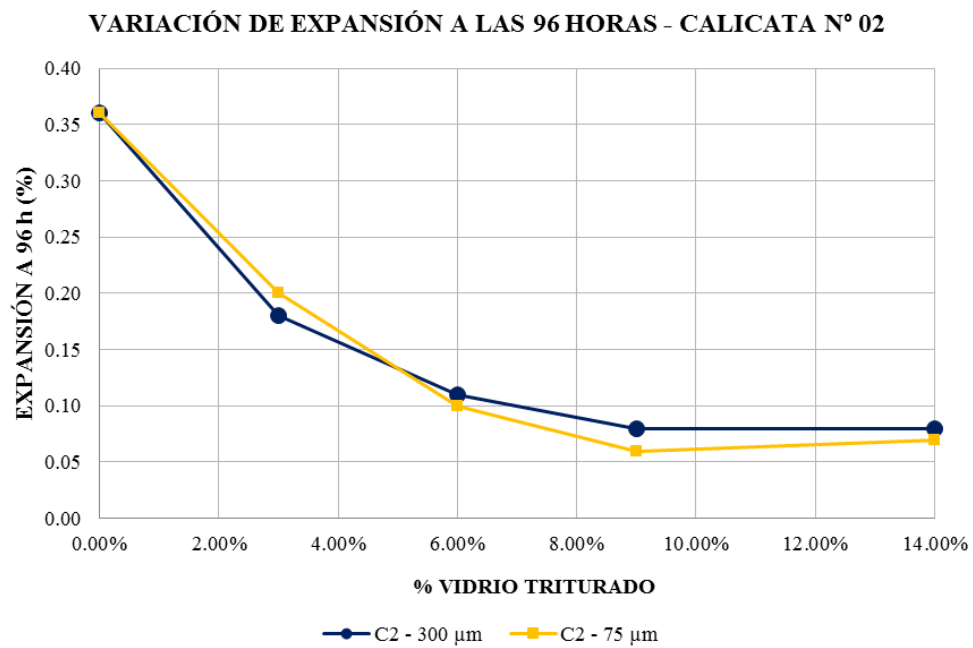


Gráfico 24: Variación de la expansión a las 96 horas del suelo de la calicata N° 02 respecto al contenido de vidrio en polvo  
Fuente: Elaboración propia

**III. Realizar un estudio de factibilidad para determinar qué tan viable es económica y constructivamente el desarrollo de esta investigación en un proyecto real de construcción vial.**

**1. Estudio económico**

El costo - beneficio de la estabilización de subrasantes arcillosas con vidrio molido es altamente dependiente de la ubicación de la planta trituradora de vidrio y el lugar de reciclado de este residuo sólido, además del coste de trituración no industrializada mediante pequeños molino o máquinas chancadoras. Para este breve estudio económico se considera una producción de vidrio molido a menor escala, considerando el precio de alquiler de molinos de eléctricos o la máquina de los Ángeles; no se considera el precio del vidrio en sí mismo, puesto que será reciclado.

En la ciudad de Chiclayo, los residuos de vidrio generados por la elaboración de productos como ventanas, mamparas, trofeos, etc. son considerados como no aptos para el reciclaje, pues no se pueden producir elementos de vidrio nuevos a partir de dichos residuos, además de que la peligrosidad que representa el manipular dichos residuos es muy grande. Por lo que la opción más común es la eliminación en botaderos, por lo que el uso de “residuos de vidrio” como agente estabilizante de suelos arcillosos es una opción a considerar de gran utilidad.

Se realizó una comparación económica asociada al valor de subrasante para 01 km de carretera, de 02 carriles, de 3.50 m cada uno, estabilizada con cal y cemento versus la misma subrasante estabilizada con vidrio molido. Cabe señalar que por normativa la profundidad de estabilización será de 0.60 m. Este análisis incluyó solo precios de insumos sin valores de mano de obra, transportes ni costo de los equipos.

L =	1.00 Km	L: longitud de carretera [Km]
N =	02	N: número de carriles
b =	3.50 m	b: ancho de carriles [m]
h =	0.60 m	h: profundidad de estabilización [m]
V =	4200 m <sup>3</sup>	V: volumen total de suelo arcilloso a estabilizar [m <sup>3</sup> ]

<b>Porcentajes de agente estabilizante</b>	
% de Cal* =	3.00%
% de Cemento* =	10.00%
% de vidrio** =	3.00%
	6.00%
	9.00%
* Dosificaciones recomendadas por el Manual de Carreteras: Suelos y Pavimentos 2014. ** Dosificaciones de vidrio triturado propuestas en esta investigación.	

Tabla 32: Porcentaje de agente estabilizante de acuerdo con recomendaciones del Manual de Carreteras: Suelos y Pavimentos 2014.  
Fuente: Elaboración propia

<i>Descripción:</i>	<i>Dosificación:</i>	<i>Volumen:</i>	<i>Cantidad:</i>	<i>PU:</i>	<i>Parcial:</i>
<b>Cal viva* [36]</b>	3.00%	4200 m3	126 m3	S/.2,321	S/.292,484
<b>Cemento portland* [37]</b>	10.00%		420 m3	S/.1,581	S/.664,104
<b>Vidrio** (3%)</b>	3.00%		126 m3	S/.1,250	S/.157,500
<b>Vidrio** (6%)</b>	6.00%		252 m3	S/.1,250	S/.315,000
<b>Vidrio** (9%)</b>	9.00%		378 m3	S/.1,250	S/.472,500
* Precios de compra del producto envasado al por menor ** El costo del vidrio triturado es por el alquiler de los molinos eléctricos o máquina de los Ángeles					

Tabla 33: Análisis de costos de estabilización con cal, cemento y vidrio para 1 km de carretera.  
Fuente: Elaboración propia

Si solo se tiene en cuenta el coste de producción unitario a partir del costo de los materiales, entonces se puede decir que la estabilización con cualquiera de los porcentajes propuestos de vidrio reciclado es más económica que la estabilización del mismo suelo con cal viva o cemento portland. Esto se debe a que el costo del vidrio post consumo es menor al de la cal viva y cemento portland, debido a que el vidrio es reciclado y que solo se consideró el precio de trituración del mismo.

La siguiente gráfica muestra una comparación entre el coste de estabilizar suelos arcillosos con vidrio, cal viva y cemento portland. Los valores de las barras indican cuántas veces más cuesta estabilizar con cemento (color azul) o cal (color rojo) que con vidrio triturado (en 3, 6 y 9% del peso seco del suelo). Los resultados muestran que: el costo de estabilizar con cemento portland es aproximadamente 4.22 veces el costo de usar un 3% de

vidrio molido, a su vez, 2.11 veces cuando se usa un 6% y 1.41 veces al utilizarse un 9% de vidrio. En cuanto a la cal viva, sus costos son menores que los del cemento, sin embargo, el vidrio resulta también ser más económico que ésta cuando se usa en un 3%. El costo de estabilizar con cal es 0.62, 0.93 y 1.86 veces el costo de estabilizar con vidrio molido en un 3, 6 y 9% respectivamente.

Cabe remarcar que el precio de 1250 nuevos soles por metro cúbico de vidrio triturado se desglosa del valor referencial de S/ 0.50 a S/ 1.00 por cada saco de kilogramo de vidrio molido aproximadamente (dato obtenido en molinos artesanales eléctricos). Usando la densidad promedio del vidrio (2500 kg/m<sup>3</sup>) se llega al Precio unitario de 1250.00 Soles/m<sup>3</sup>.

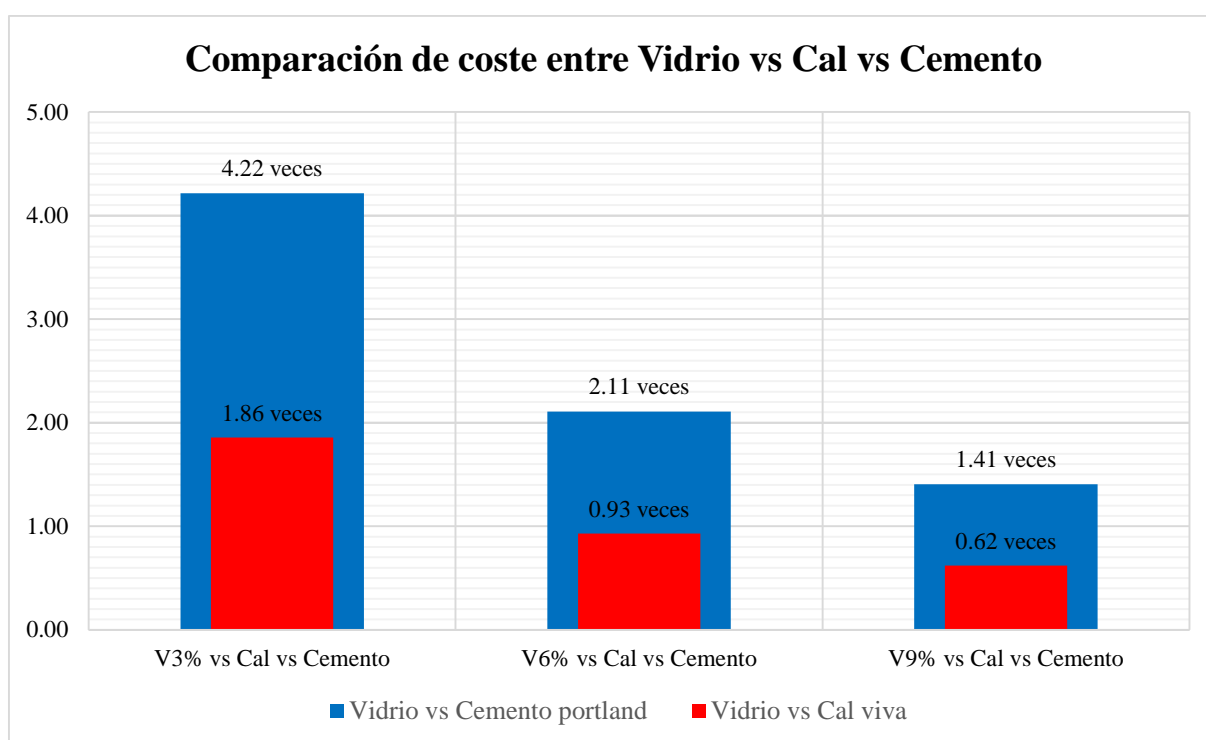


Gráfico 25: Comparación de costes de estabilización con vidrio triturado vs estabilización con Cal vs estabilización con Cemento.

## 2. Evaluación de viabilidad constructiva

En esta investigación se proponen usar tamaños de partícula de vidrio entre los 75  $\mu\text{m}$  y 300  $\mu\text{m}$ , por ende, el principal inconveniente que se podría dar en una obra real es que “el vidrio pulverizado” entre en suspensión en el aire al manipularlo, afectando la integridad de los trabajadores de obra que estén en contacto con este material. En este subcapítulo se realizará un breve análisis acerca de la viabilidad constructiva del método propuesto de estabilización de suelos arcillosos con vidrio triturado.

Para empezar, los dos materiales recomendados por el Manual de Carreteras: Suelos y Pavimentos (2014) para estabilizar suelos de tipo arcilloso son la cal viva y el cemento portland; materiales en polvo de tamaño de partícula muy pequeño, similar al que se propone en esta tesis para el vidrio. La finura del cemento es un parámetro que se expresa en términos de superficie específica. Suponiendo que la partícula de cemento es aproximadamente esférica, se podría establecer una relación entre la superficie específica de estos materiales y sus correspondientes pesos específicos:

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

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

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

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

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

Conociendo entonces el peso específico y la superficie específica de ambos materiales, se podría conocer aproximadamente el diámetro de su partícula.

$$d = \frac{6}{S_s * \gamma}$$

Sabiendo que el peso específico del cemento portland varía entre 2.80 y 3.15 g/cm<sup>3</sup>, y que su superficie específica mínima varía entre 160 y 280 m<sup>2</sup>/kg (Turbidímetro de Wagner y Permeámetro Blaine respectivamente) [39], se presenta a continuación, un cuadro comparativo entre los tamaños de partícula del cemento, cal viva y vidrio triturado.

Cemento portland	Cal viva	Vidrio triturado
3 μm < D < 15 μm	75 μm < D < 150 μm	75 μm < D < 300 μm
D <sub>PROMEDIO</sub> = 10 μm	D <sub>PROMEDIO</sub> = 100 μm	

Tabla 34: Comparación entre tamaños de partícula de cemento, cal y vidrio triturado

Rangos de densidad	Límite mínimo de superficie específica	
	Permeámetro Blaine	Turbidímetro de Wagner
	280 m <sup>2</sup> /kg	160 m <sup>2</sup> /kg
2.80 g/mL	8.00E-06 m	14E-06 m
3.15 g/mL	7.00E-06 m	1.3E-06 m

Tabla 35: Diámetro promedio de la partícula de cemento en función de la superficie específica y el peso específico del material

De acuerdo con la tabla 17, el rango de tamaños de partícula vidrio triturado propuesto no sería inconveniente para su manipulación en obra. Como se aprecia en el gráfico N° 02, el rango de tamaños de 75 – 300  $\mu\text{m}$  de vidrio es similar al tamaño promedio de la cal viva; y según el gráfico N° 03, el tamaño de grano de cemento es mucho menor que los propuestos para el vidrio en esta investigación. Mediante las medidas adecuadas, la manipulación del vidrio triturado en obra no sería un problema.

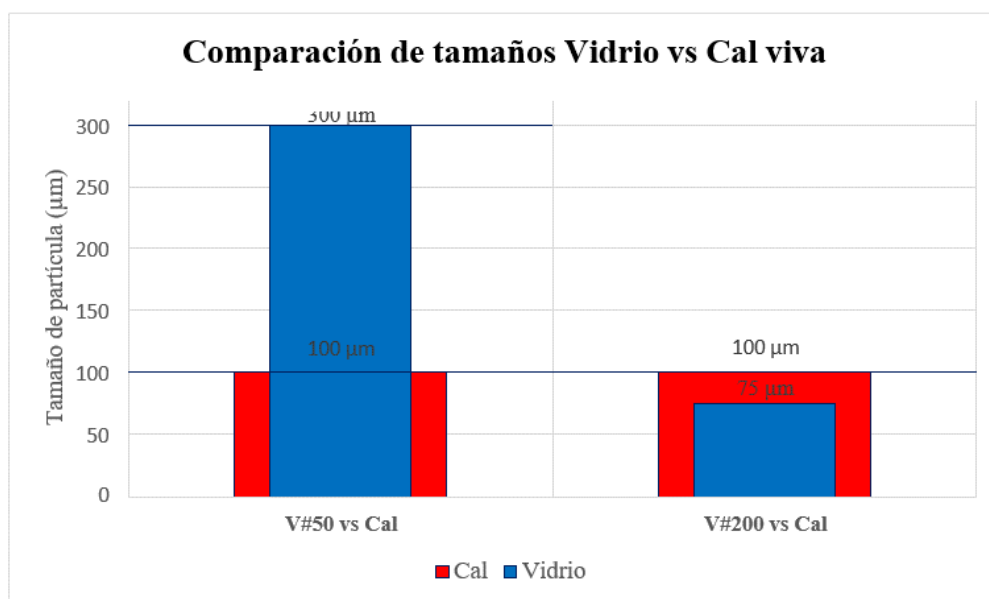


Gráfico 26: Comparación de tamaños entre el vidrio y la cal viva.

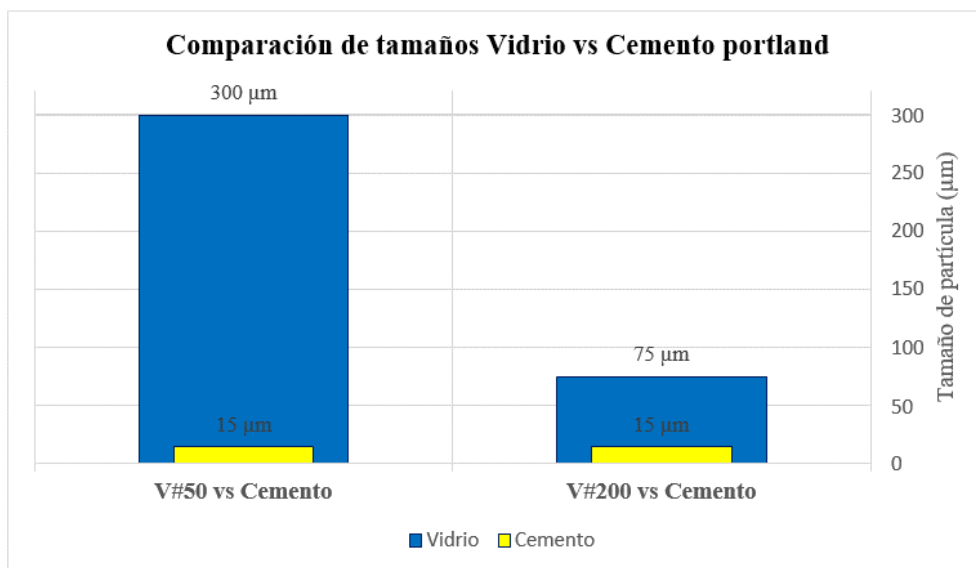


Gráfico 27: Comparación de tamaños entre el vidrio y el cemento portland

En cuanto a los problemas de salud que este material podría generar en los trabajadores, el riesgo es mínimo, pues la normativa nacional como internacional se centran en las partículas PM10 y PM2.50. El primer grupo se refiere a aquellas partículas cuyo tamaño es inferior o igual a 10 µm, y el segundo grupo, incluido en el grupo anterior, que abarca a aquellas partículas más finas de 2.50 µm [40].

Son estos tamaños de partículas los que pueden generar problemas de salud, pues se encuentran en el rango de partículas inhalables y partículas respirables. Su diminuto tamaño determina una mayor o menor penetración en las vías respiratorias [40].

De acuerdo con lo anterior expuesto, solo las partículas menores a 10 µm constituirían un riesgo de salud en los trabajadores de obra; sin embargo, los tamaños de partícula de vidrio triturado propuestos están muy por encima de este tamaño mínimo normativo. Con las medidas adecuadas de protección respiratoria, el método propuesto en la presente tesis no constituiría un riesgo en la salud de los trabajadores de obra.

### ***Discusión de resultados***

La presente investigación tiene como objetivo general el determinar el contenido y granulometría óptima de polvo de vidrio para la estabilización de un suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del chofer para su uso como subrasante mejorada en pavimentos urbanos. Para ello se realizaron ensayos de caracterización física y mecánica, tanto al suelo en estado virgen como al suelo adicionado con cuatro diferentes porcentajes de vidrio molido y en dos

granulometrías. Esto con la finalidad de obtener, en base a los resultados de los parámetros de resistencia del suelo, máxima densidad seca y CBR, una gráfica de tendencia que me indique el contenido de vidrio que mejor estabilice el suelo.

### **Ensayo de Análisis granulométrico**

En los resultados del ensayo de **granulometría por tamizado** se pudo observar una modificación de la distribución de granos del suelo conforme la adición de vidrio en polvo. Para las dosificaciones que usaron un tamaño de vidrio de entre 300 – 75  $\mu\text{m}$ , las curvas empezaron a presentar modificaciones en el rango de las arenas, presentando menor contenido de finos que respecto del suelo natural, llegando a tener una curva de distribución de granos más continua. Esto es lógico, puesto que el material de adición en este caso es el pasante del tamiz N° 50 y retenido en el tamiz N° 200, por lo que, de acuerdo a su tamaño de grano, este material constituye “arenas” que modifican la gradación del suelo virgen. Por el contrario, al usar vidrio molido de tamaño  $< 75 \mu\text{m}$ , la curva granulométrica del suelo se mantiene igual sino hasta llegar al final de la curva, donde se nota que el suelo gana contenido de finos.

En el ensayo de **granulometría con hidrómetro** se pudo observar una modificación en la distribución de tamaños de la fracción fina del suelo. Conforme el aumento de vidrio, la curva tiende a bajar, manteniendo la forma de la curva granulométrica del suelo natural, lo que es indicativo de que solo se están alterando los porcentajes que pasan del suelo, mientras que los tamaños de granos son prácticamente los mismos. Con adiciones de vidrio los porcentajes que pasan son mayores que los de la curva original, lo que indica que los tamaños de grano de vidrio  $< 75 \mu\text{m}$  son más grandes que el del suelo natural.

### **Ensayo de Límites de Atterberg**

En el ensayo de **límites de Atterberg** se pudo observar mejoras en las características físicas del suelo, puesto que se redujeron los parámetros de Límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP). El detalle de los resultados para cada parámetro es el que sigue:

- El LL del suelo natural ronda valores mayores a 30%, lo cual es característico de suelos cohesivos. En el caso del suelo adicionado, el LL disminuye para todas las combinaciones de vidrio, esto se debe a que el vidrio es un material que no presenta plasticidad, no absorbe agua y posee un ángulo de fricción mayor al del suelo arcilloso, lo cual contribuye a mejorar el comportamiento del suelo frente a cantidades de agua

cercanas al LL del suelo. Sin embargo, se nota que el LL llega a un valor mínimo para valores de entre 6 a 9%, a partir del cual el LL aumenta para el 14%. Este comportamiento se hace más importante para el vidrio en polvo de tamaño  $< 75 \mu\text{m}$ , lo cual puede atribuirse a razones de que el tamaño de vidrio molido es similar al del suelo arcilloso.

Este resultado coincide con la de los autores O. A. Babatunde, J. E. Sani y A. H. Sambo [16], quienes indican en su investigación que los valores más bajos de LL se obtienen para el 6% de vidrio en polvo, a partir del cual éste parámetro empieza a aumentar para dosificaciones mayores. Cabe señalar que este autor usó porcentajes de 2, 4, 6 y 8% en granulometría  $< 75 \mu\text{m}$ . Este comportamiento de “campana” difiere con el resto de literatura de referencia, quienes establecen una tendencia casi lineal de crecimiento o decrecimiento de este parámetro.

- El LP del suelo natural ronda valores entre 15 y 16%; el suelo adicionado por su parte tiene valores de LP de promedio 14%. La reducción del LP adquiere una tendencia casi lineal respecto del contenido de vidrio, obteniéndose los valores más bajos para el 14% de vidrio en polvo, esto se debe a que el vidrio en polvo es un material inerte, que no absorbe agua, en tanto que al adicionarlo al suelo arcilloso, contribuye a un comportamiento menos plástico. Cabe remarcar que el vidrio de tamaño entre 300 - 75  $\mu\text{m}$  funciona mejor para reducir este parámetro del suelo.

Estos resultados coinciden con el de la literatura de referencia detallada en los antecedentes de esta tesis. M. Siyab Khan, M. Tufail y Mateeullah [18] indicaron que para un 12% de vidrio de  $< 75 \mu\text{m}$  el LP del suelo disminuyó de 30.16 a 24.53, lo que equivale una reducción del 18.70%. Por su parte, Z. A. Zahra Mahdi y N. S. Al-Hassnawi [17] plantearon para un 9% de vidrio de  $< 75 \mu\text{m}$  una disminución del LP de 30 a 18, lo que equivale a una disminución del 40%. Ninguno de los autores plantea aumentos en el LP del suelo al adicionarlo vidrio en polvo. En el caso de la presente investigación, la máxima disminución fue de 10% para un 9% de vidrio de 300  $\mu\text{m}$  para el suelo de la calicata N° 01.

- El suelo natural posee valores de IP altos, por lo que se le considera como un suelo de plasticidad media según el cuadro 4.6 del Manual de carreteras – sección suelos y pavimento del MTC. Con la adición de polvo de vidrio se logró reducir este parámetro para todas las combinaciones de suelo – vidrio, esto se debe, como ya se mencionó, a las propiedades de plasticidad del polvo de vidrio completamente opuestas a las del

suelo arcillo, lo que contribuye a reducir las propiedades cohesivas y expansivas del suelo arcilloso. Sin embargo, se nota, al igual que en el caso del LL, que los valores mínimos de IP se obtienen para dosificaciones de entre 6 a 9%, a partir del cual empieza a aumentar para el 14% de vidrio. Esto se justifica en que el suelo adicionado con 14% de vidrio adquiere una ganancia de LL respecto al suelo con 9% de vidrio, y como es bien sabido, el IP es la diferencia entre el LL y el LP, por ende, este comportamiento del IP es lógico.

Cabe señalar que este comportamiento no era el esperado, puesto que el vidrio en polvo es un material inerte sin cohesión, y el aumento en el IP del suelo no representa un resultado positivo, puesto que existe una relación directa entre el valores de IP elevados y el alto potencial de expansión en suelos arcillosos, lo cual no es positivo para un suelo que pretende ser usado como subrasante [39]. Este comportamiento puede compararse con el que se produce al estabilizar suelos arcillosos con cal, puesto que el MTC indica que a grandes cantidades de cal el IP del suelo tiende a aumentar.

El comportamiento de “campana invertida” del IP para las combinaciones de suelo – vidrio difiere con los resultados presentados en el 90% la literatura de referencia, puesto que la mayoría de ellos plantea una tendencia lineal de decrecimiento conforme el aumento de las dosificaciones de vidrio en polvo. Sin embargo, los autores O. A. Babatunde, J. E. Sani y A. H. Sambo [16], presentan en su investigación una tendencia casi lineal de aumento del IP, dicho crecimiento del IP se muestra constante desde el 0% al 8% de vidrio en polvo.

TABLA 11 CLASIFICACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS			
Potencial de expansión Ep	Expansión en consolidómetro, bajo presión vertical de 7 kPa (0,07 kgf/cm <sup>2</sup> )	Índice de plasticidad IP	Porcentaje de partículas menores que dos micras
%	%	%	%
Muy alto	> 30	> 32	> 37
Alto	20 – 30	23 – 45	18 – 37
Medio	10 – 20	12 – 34	12 – 27
Bajo	< 10	< 20	< 17

*Tabla 36: Diámetro promedio de la partícula de cemento en función de la superficie específica y el peso específico del material [39]*

### Clasificación de suelos

De acuerdo con los resultados de los ensayos de caracterización física del suelo natural, éste se clasifica como de tipo CL (arcilla arenosa de baja plasticidad) según SUCS y de tipo

A-6 (suelo arcilloso de mala calidad) según AASHTO, además presenta un IP elevado, lo que lo hace un suelo no apto para ser usado como subrasante, por ende se justifica la estabilización de este material de acuerdo a lo especificado con el Manual de Suelos, Geología y Pavimentos del MTC. Con la adición de vidrio en polvo, las características de gradación y consistencia del suelo se modificaron, y con ello también el tipo de suelo que representa cada combinación de suelo – vidrio. De acuerdo con ello, el suelo adicionado con vidrio de 300 – 75  $\mu\text{m}$  pasó a clasificarse como de tipo SC (arcilla arenosa) según SUCS, a partir de adiciones de 6% y 3% de vidrio para la calicata N° 01 y N° 02 respectivamente, esto debido a que la fracción fina del suelo pasó a ser menor al 50%. El suelo adicionado con vidrio < 75  $\mu\text{m}$  mantuvo su clasificación como de tipo CL según SUCS. Según AASHTO, el suelo adicionado con vidrio en polvo mantiene su clasificación de tipo A-6.

### **Ensayo de Proctor modificado**

En el ensayo de **Proctor modificado** se obtuvieron resultados de MDS y OCH. Se pudo observar mejoras ambos parámetros, puesto que la MDS aumentó y el OCH se redujo conforme el aumento de vidrio en polvo. El detalle de los resultados para cada parámetro es el que sigue:

- En lo referente a la MDS, se aprecia que existe una tendencia casi lineal entre el aumento en el contenido de vidrio en polvo y el aumento en la MDS del suelo. En ese sentido, los valores más altos de MDS se obtuvieron para el 14% de vidrio, yendo de 1.756 g/cm<sup>3</sup> a 1.835 g/cm<sup>3</sup> para la calicata N° 01, y de 1.691 g/cm<sup>3</sup> a 1.796 g/cm<sup>3</sup> para el suelo de la calicata N° 02. Dicho aumento se da de manera casi idéntica para ambas gradaciones usadas, lo que es indicativo de que el tamaño de grano de vidrio no interviene en la densificación del suelo arcilloso, sino que se justifica en que el vidrio de cal sodada o sodocálcico, es un material de gravedad específica mayor a la del suelo arcilloso en estudio, dicho valor ronda entre 2.60 y 2.90, lo cual densifica el suelo al ser más pesado que el material arcilloso en estudio. Este comportamiento indica entonces, que si se usan residuos de un vidrio más denso, los aumentos en la MDS serán mayores. Estos resultados coinciden con el de los autores M. Siyab Khan, M. Tufail y Mateeullah [18], quienes indican en su estudio que el mayor aumento de la MDS (de 2.272 a 2.399 g/cm<sup>3</sup>) se obtuvo para un 12% de vidrio, siendo este aumento constante desde 0% a 12%. De manera similar, los autores H. Canakci, A. AL-Kaki y F. Celik [21] establecen en su informe que la MDS del suelo aumenta con los aumentos en el porcentaje de polvo de vidrio, adoptando una tendencia lineal de crecimiento. De acuerdo con estos autores,

el mayor incremento en la MDS se obtuvo para un 12% de vidrio. Por el contrario, mis resultados difieren con los obtenidos por los autores J. Olufowobi, A. Ogundaju, B. Michael y O. Aderinlewo [24], quienes establecen una tendencia a manera de “parábola”, con valores máximos de MDS para un 5% de vidrio en polvo de 75  $\mu\text{m}$ . De igual modo, los autores J. Rose Benny, J. Jolly K., J. Mareena Sebastian y M. Thomas [19] indican en su estudio que los mayores valores de MDS se obtuvieron para un 6% de vidrio en polvo, valor que empieza a decrecer para dosificaciones mayores.

- En cuanto al parámetro de OCH, se encontró que este disminuye conforme se aumenta el contenido de vidrio en polvo, y este comportamiento se da de manera casi idéntica tanto para ambas granulometrías como para ambas muestras de suelo (calicata N° 01 y N° 02). De acuerdo con ello, el mayor decremento de OCH se da para el 14% de vidrio, el cual va desde un 14.95% a 10.35% para la muestra de suelo de la calicata N° 01; y yendo de 18.62% a 11.65% para la calicata N° 02. Este comportamiento se fundamenta en que el vidrio es un material inerte que no absorbe agua, a diferencia del suelo arcilloso que requiere grandes cantidades de agua para llegar a su MDS; en tanto que al contrastar sus comportamientos frente a la absorción de agua, el vidrio ayuda a reducir el OCH. Estos resultados coinciden con el de todos los autores de la literatura de referencia, pues el 100% de ellos establece que el OCH decrece con el aumento de vidrio en polvo.

### **Ensayo de CBR**

Del ensayo de CBR se obtuvieron parámetros de expansión a las 96 horas de sumergido y el valor de la relación de soporte de California, siendo este último, el parámetro más importante, junto con la MDS, a evaluar en un suelo que pretende ser usado como subrasante. El detalle de los resultados para cada parámetro es el que sigue:

- El suelo natural posee valores de CBR bajos, de entre 3% a 6%, por lo que de acuerdo con las categorías de subrasante que establece el MTC, ésta se catalogaría como una subrasante insuficiente. Este resultado es positivo para la investigación, puesto que con ello se justifica la estabilización del material, ya que dicho suelo no podría ser usado como subrasante por las pobres propiedades de resistencia que presenta. El suelo adicionado con vidrio por su parte, presenta notables mejoras en su CBR. Se observa que para el suelo de la calicata N° 01 mezclado con dosificaciones de 6% y 9% de polvo de vidrio se obtienen valores de CBR mayores al 6%, por lo que el suelo pasaría a tener la categoría de “subrasante regular”, y para el 14% de vidrio se obtienen valores de CBR superiores al 10%, pasando a ser una “subrasante buena” cumpliendo con lo establecido

en la normativa del MTC para ser usada como subrasante. Para el caso del suelo de la calicata N° 02 sucede algo similar, para el 9% de vidrio se obtiene una categoría de “subrasante regular” y para el 14% una categoría de “subrasante buena”.

Por tanto, existe una tendencia lineal de crecimiento del CBR conforme se aumentan los contenidos de vidrio en polvo. Este comportamiento se presenta de manera similar para ambas granulometrías, siendo al parecer la granulometría de tamaño  $< 75 \mu\text{m}$  la que ofrece mayores aumentos en el CBR del suelo.

El comportamiento que asume el suelo arcilloso frente a los contenidos de vidrio en polvo es similar al que manifiestan los autores M. Siyab Khan, M. Tufail y Mateeullah [18], los cuales indican que para un 12% de vidrio de tamaño  $< 75 \mu\text{m}$ , se logra un aumento de CBR que va desde 45.10% a 59.61%, siendo este aumento constante desde el 0% al 12% de vidrio. De igual modo, en la investigación de H. Canakci, A. AL-Kaki y F. Celik [21], se establece una tendencia lineal de crecimiento del CBR, obteniéndose el mayor aumento del CBR para el 12% de vidrio, siendo este aumento del 140% para esta dosificación. Z. A. Zahra Mahdi y N. S. Al-Hassnawi [17], en su investigación indican que los aumentos de CBR aumentan con el contenido de vidrio en polvo, lográndose un mayor aumento del CBR con una dosificación del 9%, siendo este aumento de 1.46% a 13.74%.

Sin embargo, mis resultados difieren con los de J. Olufowobi, A. Ogundaju, B. Michael y O. Aderinlewo [24], quienes indican en su investigación que el mayor incremento del valor de CBR se da para un 5% de vidrio en polvo, a partir del cual el CBR empieza decaer. De igual modo, los autores J. Rose Benny, J. Jolly K., J. Mareena Sebastian y M. Thomas [19], manifiestan que para un 12% de vidrio de tamaño  $< 75 \mu\text{m}$ , se logra un aumento de CBR que va desde 3.00% a 12.80%, a porcentajes mayores el CBR decae.

- En cuanto a la expansión del suelo al estar sumergido en agua por 96 horas, el suelo adicionado con vidrio muestra una reducción en este parámetro para todas las dosificaciones de vidrio en polvo y para ambas gradaciones. Este guarda relación directa con los límites de consistencia del suelo, especialmente con el IP, puesto que a mayores o menores valores de IP, el potencial de expansión del suelo aumentará o disminuirá respectivamente. Cabe señalar que las mayores reducciones de expansión del suelo se lograron, para ambas calicatas, con un 9% de vidrio en polvo. Con el aumento de vidrio en polvo la expansión no se ve notoriamente afectada.

De la investigación realizada se ha verificado que al añadirse porcentajes variables de vidrio en polvo de granulometrías de 300  $\mu\text{m}$  y 75  $\mu\text{m}$ , se obtienen mejoras significativas en el valor de CBR del suelo arcilloso, constituyendo para los porcentajes de 9% y 14% una subrasante de tipo “regular” y “buena” respectivamente, de acuerdo con los parámetros que establece el Manual de Carreteras del MTC, al tener un CBR mayor al 6%. Por lo que se acepta la hipótesis planteada **“Si se adiciona vidrio triturado en dosificaciones variables (entre el 3% y 14% en peso seco del suelo), y un tamaño de grano que varía entre 75  $\mu\text{m}$  y 300  $\mu\text{m}$  al suelo arcilloso de la Urb. Ciudad del Chofer, éste mejora sus propiedades geotécnicas obteniéndose valores de  $\text{CBR} \geq 6\%$  como lo establece el Manual de carreteras: Suelos y pavimentos de la MTC 2014”**.

El contenido óptimo de polvo de vidrio varía de acuerdo al tipo de propiedades que se busque mejorar. De acuerdo con los resultados de los ensayos de caracterización física, la dosificación del 9% ofrece las mejores propiedades en términos de consistencia del suelo, puesto que para ese porcentaje de vidrio el IP alcanza su valor más bajo, lo cual es indicativo de un suelo con poca probabilidad de expansión de acuerdo con la Tabla N° 34. En cuanto a las propiedades mecánicas del suelo, es el contenido de 14% de vidrio en polvo el que produce mayores aumentos de CBR y MDS, siendo que para este contenido el CBR es mayor al 10% y se cataloga como “subrasante buena”, sin embargo, el IP del suelo aumenta para este contenido de vidrio, corriendo el riesgo de que el IP de plasticidad aumente, y con ello también el Potencial de Expansión del suelo (de medio a alto).

**TABLA 1.- Requisitos de calidad de materiales para capa subrasante**

Característica	Valor
Tamaño máximo; mm	76
Límite líquido; %, máximo	40
Índice plástico; %, máximo	12
Valor Soporte de California (CBR) <sup>[1]</sup> ; %, mínimo	20
Expansión máxima; %	2
Grado de compactación <sup>[2]</sup> ; %	100 $\pm$ 2

[1] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1,5 m de profundidad.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

*Tabla 37: Requisitos mínimo de calidad para materiales de subrasante [40]*

La tabla N° 37 muestra una serie de requisitos mínimos de calidad para materiales de subrasante propuestos en la norma N-CMT-1-03/02 del Instituto Mexicano del Transporte, en ella se

aprecia que uno de los requisitos exigidos es IP máximo de 12; valores mayores de IP degrada la calidad del material como subrasante. Esto debido a problemas de expansión y permeabilidad que podrían generar los suelos demasiado plásticos. Al usarse porcentajes del 14% de vidrio para estabilizar, se estaría incumpliendo lo sugerido en esta normativa extranjera usada como referencia, teniendo en cuenta que la normativa nacional no establece requisitos de calidad para subrasantes.

## Conclusiones

- Los ensayos de caracterización física muestran que el suelo en estado natural presenta una distribución de tamaños clásico de un suelo arcilloso, con predominio de finos de tamaño menor a 75  $\mu\text{m}$ , lo que conlleva a que la consistencia del suelo tienda a ser de elevada plasticidad. A comparación del suelo adicionado con vidrio en polvo, el cual presenta una granulometría no muy diferente a la anterior, siendo que los mayores cambios se presentan en términos de plasticidad; por tanto, se concluye que se obtiene un mejor comportamiento, en términos de consistencia del suelo (IP), con una dosificación del 9% de vidrio en polvo y en una granulometría de entre 300 y 75  $\mu\text{m}$ , para ambas muestras de suelo (calicata N° 01 y N° 02).
- Se determinó que el suelo natural presentaba una capacidad de soporte no apta para ser usado como suelo de subrasante ( $\text{CBR} < 6\%$ ), la máxima densidad seca del suelo fue baja. A comparación, el suelo adicionado con vidrio en polvo presentó valores de CBR mucho más altos, lo cual está ligado a la densificación que se logró al añadir vidrio en polvo; por tanto, se concluye que las mejores características en términos de resistencia (CBR) y densificación (MDS) del suelo se obtienen para una dosificación del 14% de vidrio, siendo independiente de la gradación que se utilice.
- Se concluye que la estabilización de suelos arcillosos usando polvo de vidrio reciclado resulta ser más económica que la estabilización usando cemento portland, sin embargo, es más costosa que la estabilización con cal. El costo del vidrio en polvo es atribuible al costo de molienda del mismo, puesto que en sí mismo el vidrio tuvo costo cero.
- Se concluye que el contenido óptimo de polvo de vidrio para estabilizar el suelo arcilloso de la urb. Ciudad del Chofer es del 9%, siendo que para este contenido se obtienen las mejores propiedades físicas en términos de consistencia del suelo y se obtiene a la vez un CBR mayor al 6%, con lo que el suelo se catalogaría como “subrasante regular”. Mayores

contenidos de vidrio permiten obtener un CBR más alto con la posibilidad de obtener un IP elevado, lo cual constituye un posible problema de expansión.

### Recomendaciones

En base a los resultados en la presente investigación, se realizan las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda seguir con esta línea de la investigación usando porcentajes de vidrio en polvo más altos y en rangos más amplios, usando dosificaciones de entre 5% a 30% por ejemplo, esto con la finalidad de determinar el punto de inflexión a partir del cual el CBR del suelo adicionado empieza a decaer.
- Se recomienda seguir con esta línea de la investigación realizando ensayos de corte directo, consolidación unidimensional y compresión no confinada, con la finalidad de evaluar parámetros como la cohesión y el ángulo de fricción interna, y determinar si el curado por un tiempo prolongado contribuye a mejorar la resistencia del suelo.
- Se recomienda seguir con esta línea de la investigación usando el polvo de vidrio en otro tipo de suelos (como el arenoso o limoso), o suelos arcillosos de propiedades altamente expansivas, para determinar si el vidrio en polvo puede llegar a ser un estabilizante universal.

### Referencias

- [1] T. W. Lambe y R. V. Whitman, «Mecánica de suelos,» de *Mecánica de suelos*, México, Noriega editores, 2004, pp. 41-52.
- [2] M. D. Braja, «Fundamentos de ingeniería geotécnica,» de *Fundamentos de ingeniería geotécnica*, Cuarta ed., México, Cengage learning, 2015.
- [3] C. A. T. Cáceres, «ABC Color,» 14 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.abc.com.py/nacionales/el-mopc-podria-autorizar-inyeccion-de-lecherada-de-cal-a-presion-1674816.html>. [Último acceso: 28 Setiembre 2019].
- [4] Instituto Nacional de Defena Civil, «Plan de Prevención antes desastres: Usos del suelo y medidas de mitigación. Ciudad de Chiclayo,» INDECI, Chiclayo, 2003.
- [5] Diario de León, «Diario de León,» 15 Marzo 2006. [En línea]. Available: <https://www.diariodeleon.es/articulo/leon/el-vidrio-un-problema/2006031500000828201.html>. [Último acceso: 24 Setiembre 2019].

- [6] Terra.org, «Terra. Ecología práctica,» 24 Febrero 2003. [En línea]. Available: <https://www.terra.org/categorias/articulos/el-vidrio>. [Último acceso: 17 Setiembre 2019].
- [7] F. Nassar, «Green area,» 27 Agosto 2016. [En línea]. Available: <http://greenarea.me/es/172059/el-reciclaje-de-vidrio-contra-la-contaminacion/>. [Último acceso: 02 Octubre 2019].
- [8] Ecovidrio, «Hablando en vidrio,» 28 Febrero 2017. [En línea]. Available: <https://hablandoenvidrio.com/reciclar-vidrio-es-cuidar-el-medioambiente/>. [Último acceso: 02 Octubre 2019].
- [9] Ecovidrio, «Ecovidrio. Entidad sin ánimo de lucro,» 11 Julio 2019. [En línea]. Available: [https://www.ecovidrio.es/pie/prensa/El-reciclaje-de-envases-de-vidrio-en-Espana-cr-\(1\)#noticia](https://www.ecovidrio.es/pie/prensa/El-reciclaje-de-envases-de-vidrio-en-Espana-cr-(1)#noticia). [Último acceso: 28 Setiembre 2019].
- [10] Ministerio del Ambiente, «Sistema Nacional de Información Ambiental - MINAM,» 01 Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://sinia.minam.gob.pe/novedades/peru-solo-se-recicla-19-total-residuos-solidos-reaprovechables>. [Último acceso: 24 Setiembre 2019].
- [11] RPP, «RPP Noticias,» RPP Noticias, 18 Setiembre 2018. [En línea]. Available: <https://rpp.pe/politica/elecciones/peru-produce-23-mil-toneladas-diarias-de-basura-la-alarman-gestion-de-residuos-solidos-noticia-1147951>. [Último acceso: 28 Setiembre 2019].
- [12] G. P. Burga Polo, «El reciclaje de residuos sólidos municipales para el desarrollo sostenible de Chiclayo,» *TZHOECOEN*, pp. 203-224, 2015.
- [13] Ministerio del Ambiente, «Declaran en emergencia la gestión y manejo de los residuos sólidos en los distritos de Chiclayo, José Leonardo Ortiz, La Victoria, Reque y Saña de la provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque,» *El Peruano. Diario Oficial del Bicentenario*, 22 Mayo 2019.
- [14] Municipalidad Provincial de Chiclayo, «Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos sólidos en la Provincia de Chiclayo, Departamento de Lambayeque,» Ambiente y Desarrollo Sostenible S.A.C., Chiclayo, 2012.
- [15] S. Aaqib Javed y S. Chakraborty, «Effects of Waste Glass Powder on Subgrade Soil Improvement,» *World Scientific News*, vol. 144, n° 3, pp. 30-42, 19 Marzo 2020.
- [16] O. A. Babatunde, J. E. Sani y A. H. Sambo, «Black Cotton Soil Stabilization using Glass Powder,» *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, vol. 8, n° 5, pp. 5208-5214, Mayo 2019.

- [17] Z. A. Zahra Mahdi y N. S. Al-Hassnawi, «Assessment of subgrade soil improvement by waste glass powder,» *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, vol. 9, n° 10, pp. 12-21, Octubre 2018.
- [18] M. Siyab Khan, M. Tufail y Mateeullah, «Effects of Waste Glass Powder on the Geotechnical Properties of Loose Subsoils,» *Civil Engineering Journal (CEJ)*, vol. IV, n° 9, pp. 2044-2051, Septiembre 2018.
- [19] J. Rose Benny, J. Jolly K., J. Mareena Sebastian y M. Thomas, «Effect of Glass Powder on Engineering Properties of Clayey Soil,» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. VI, n° 5, pp. 228-231, Mayo 2017.
- [20] Nirmala R. y Shanmugapriya M., «Feasibility Study on Enhancing the Properties of Subgrade Material using Waste Glass,» *International Journal of Chemical Sciences*, vol. 15, n° 1, pp. 1-7, 15 Marzo 2017.
- [21] H. Canakci, A. AL-Kaki y F. Celik, «Stabilization of Clay with Waste Soda Lime Glass Powder,» *Procedia Engineering*, vol. 161, n° 1, pp. 600-605, Agosto 2016.
- [22] I. A. Ikara, A. M. Kundiri y A. Mohammed, «Effects of waste glass (WG) on the strength characteristics of cement stabilized expansive soil,» *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 4, n° XI, pp. 33-41, 2015.
- [23] Nuruzzaman y Akhtar Hossain, «Effect of Soda Lime Glass Dust on the Properties of Clayey Soil,» *Global Journal of Researches in Engineering: Civil And Structural Engineering*, vol. XIV, n° 5, pp. 16-22, 2014.
- [24] J. Olufowobi, A. Ogundoju, B. Michael y O. Aderinlewo, «Clay Soil Stabilisation Using Powdered Glass,» *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. IX, n° 5, pp. 541-558, Octubre 2014.
- [25] E. Juárez Badillo y A. Rico Rodríguez, *Mecánica de Suelos: Fundamentos de la Mecánica de suelos*, México: Limusa Noriega editores, 2005, pp. 75-92.
- [26] Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto, *Conociendo los suelos de Moquegua*, Moquegua: Predes. Centro de Estudios y Prevención de Desastres, 2004.
- [27] Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, «Norma CE.020: Suelos y taludes,» Sencico, Lima, 2010.
- [28] M. Budhu, *Soil Mechanics Fundamentals*, Arizona, USA: Wiley Blackwell, 2015.

- [29] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, «Manual de carreteras: suelos geología, geotécnica y pavimentos,» Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Lima, 2014.
- [30] M. Bosch Gayo, «Análisis de la variabilidad de algunos parámetros geotécnicos de suelos,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2017.
- [31] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, «Norma CE.010: Pavimentos Urbanos,» Sencico, Lima, Perú, 2010.
- [32] S. Minaya González y A. Ordóñez Huamán, Diseño moderno de pavimentos asfálticos, Lima: Universidad nacional de ingeniería, 2006.
- [33] Instituto del Cemento Portland Argentino, «Ficem.org,» 21 Marzo 2012. [En línea]. Available: <http://ficem.org/CIC-descargas/argentina/Diseno-de-pavimentos-rigidos.pdf>. [Último acceso: 21 Junio 2020].
- [34] R. Hernández Sampieri, Metodología de la investigación, Sexta ed., México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A, 2014.
- [35] A. Caballero Romero, Metodología integral innovadora para planes y tesis, México: Cengage Learning, 2014, pp. 39-42.
- [36] Colegio de Ingenieros del Perú, «Código Deontológico del Colegio de Ingenieros del Perú,» Colegio de Ingenieros del Perú, Lima, 2012.
- [37] SODIMAC, «SODIMAC,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/product/2217929/cal-de-obra-x-20-kg>. [Último acceso: 20 Mayo 2020].
- [38] SODIMAC, «SODIMAC,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/product/1132792/cemento-extraforte-425-kg?id=1132792&name=cemento-extraforte-425-kg&currentpage=1>. [Último acceso: 20 Mayo 2020].
- [39] Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento, «Norma técnica E.050 Suelos y cimentaciones,» ICG - Instituto de Construcción y Gerencia, Lima, 2018.
- [40] L. Morales Ortega, «El vidrio en la edificación. Propiedades, aplicaciones y estudio de fracturas en casos reales,» Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2017.
- [41] Á. González Martín , «Análisis y estudio de patología. Rehabilitación recalce y estabilidad de la Torre de Pisa,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2016.

- [42] H. Behbahani, H. Ziari, N. Kamboozia, A. Mansour Khaki y S. Mirabdolazimi, «Evaluation of performance and moisture sensitivity of glassphalt mixtures modified with nanotechnology zycosoil as an anti-stripping additive,» *Construction and Building Materials*, vol. I, n° 78, pp. 60-68, 2015.
- [43] ASTM C162, «Terminology of glass and glass products,» ASTM, Pensilvania, 2015.
- [44] Universidad Mayor de Simon, Pavimentos. Texto guía, Bolivia: Universidad Mayor de Simon, 2007.
- [45] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, «Norma E.040. Vidrio,» de *Reglamento Nacional de Edificaciones*, Chiclayo, Sencico, 2018, pp. 417-428.
- [46] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, «Manual de Ensayos de laboratorio,» Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Lima, 2016.
- [47] Instituto Nacional de Prevención Sísmica, «INPRES,» 2015. [En línea]. Available: <http://contenidos.inpres.gob.ar/alumnos/docentes>. [Último acceso: 28 Abril 2020].

**Anexos****Anexo N° 01: Fotografías, cuadros y gráficos de información complementaria**

*Zona en estudio con evidentes problemas de veredas con asentamientos.*



*Suelo de zona en estudio con notorios hundimientos.*



*Hundimientos en vía no pavimentada de zona en estudio*



*Evidente suelo arcilloso de zona en estudio*

**Cuadro N° 24**  
**CIUDAD DE CHICLAYO: TIPOS DE SUELOS PREDOMINANTES POR SECTORES**

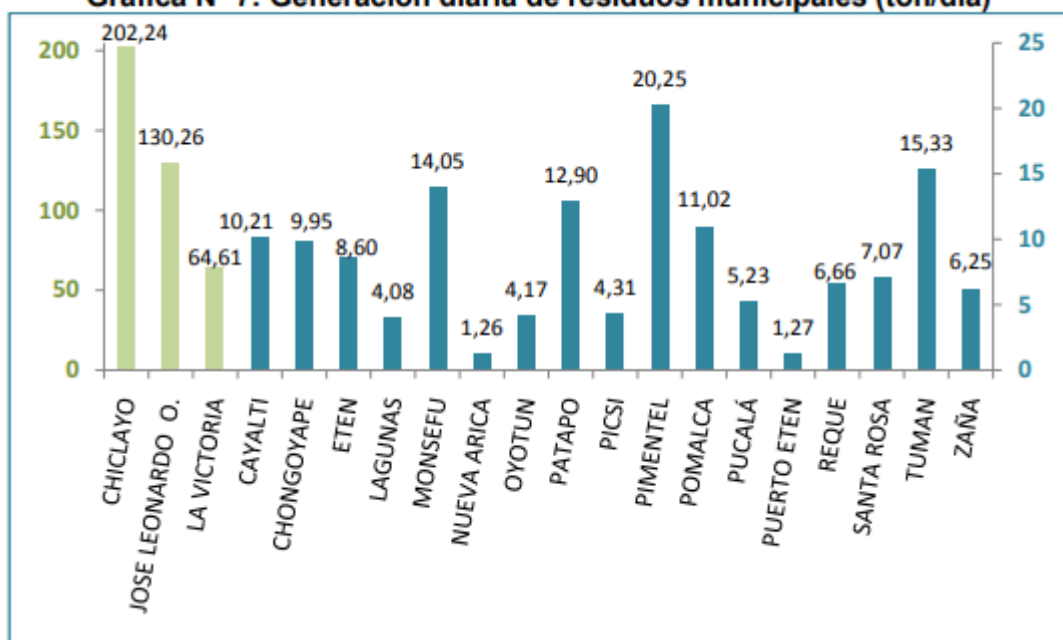
SECTORES	ASENTAMIENTOS HUMANOS	TIPOS DE SUELO PREDOMINANTES	ESTATIGRAFIA	EXPANSION DEL SUELO	CAPACIDAD PORTANTE	NIVEL FREATICO
I	Urb. El Ingeniero I y II, Miraflores, Ciudad del Chofer, 03 de Octubre, Quíñones, Remigio Silva, Las Brisas, La Purísima, Residencial A. B. Leguía y Cerropon, Cruz de Chalpon, Rosa Nelida Castillo, Sto. Toribio de Mogrovejo, 4 de Noviembre, Simón Bolívar, Vista Alegre, Nueva Esperanza, Cruz de la Esperanza, Sta. Lila, F. Belaúnde, J. Basadre, Los Mochicas, Ricardo Palma, Sta. Elena, José Quiñonez, José Balta, José Olaya, Ellas Aguirre, José Obrero, Cruz del Perdón, Cerro Pololó, J. Carlos Mariategui, Amp. Cruz del Perdón, Los Olivos, Parte de 9 de Octubre, 19 de Setiembre, San Sebastian, Virgen de la Paz, San Julio, Sta. Alejandrina, Santuario, Progresiva Cerropón, La Molina Alta, Las Mercedes, La Colina, Vista Hermosa, AVIANTEL, La Concordia, La Plaza, La Pradera, Los Cedros de la Pradera, Virgen de Fátima, san Jerónimo, Los Jardines y Sagrado Corazón de Jesús.	Arcillas del tipo (CL y CH), Arenas (SC, SM y SP) y Gravas (GC y GP).	Media a Semiduro: 2.0 m. < C-3 < 4.5 Rígido: 4.5 m. < C-5 < 15.0 m.	Suelos superficiales de expansión baja a media, con cambio de volumen pequeño.	1.0 - 2.0 Kg./cm. <sup>2</sup>	2.0 a 7.0 m.
II	Comprende parte del sector Este de la ciudad: Aeropuerto, Planta de Tratamiento de Agua Potable, AA.HH. López Albuja, Micaela Bastidas, San Antonio, Nuevo Mundo, Atusparias, Francisco Cabrera, Las Mercedes, César Vallejo, Amp. Campodónico, Progresiva UCHOFEN, Sagrado Corazón de Jesús, San Guillermo, Sto. Toribio, El Obrero, Amp. San Antonio, Puente Blanco, Jorge Chávez, Fanny Abanto Calle, parte del A.H. Suazo.	Arcillas del tipo (CL y CH), Arenas (SC, SM y SP) y Gravas (GC y CP).	Media a Semiduro: 6.0 m. < C-3 < 8.0 Rígido: 8.0 m. < C-5 < 13.0 m.	Suelos finos de expansión baja a media, con cambio de volumen pequeño a moderado.	1.0 - 2.0 Kg./cm. <sup>2</sup>	2.0 a 3.5 m.
III	Ramiro Priale, José Santos Chocano, UPIS 1° de Mayo, María Parado de Bellido, Mercado Moshoqueque, Area Central, AA.HH. Santa Rosa, Diego Ferré, Urb. La Primavera, Patazca, Bancarios, La Florida, Hipodromo y el 3er Sector del distrito, Stein, Miraflores, Indoamérica, El Salitral, 6to Sector Urrunaga, Villa Hermosa, La Explanada, Milagro de Dios, Villa El Sol, San Lorenzo, Sta. Ana, Nuevo San Lorenzo, Casablanca, San José Obrero, Garcés, Latina, Artesanos, 12 de Octubre, F. Bolognesi, San Carlos, Las Palmeras, Fundo Sta. Maria, San Isidro, Miraflores, Amp. T. Amari, Luis Heysen, La Primavera, San Luis, Porvenir, Cois, San Juan, Salazar, Chiclayo, El Molino, Las Américas, Señor de Los Milagros, San Nicolás, Boggiano, San Francisco, Campodónico, Raymondí, 3° Sector de La Victoria, San Martín, Zamora, Diego Ferré, Mesones Muroy y Ciro Alegría.	Arcillas de media y alta plasticidad del tipo (CL, CH, CL-ML) y en pequeñas proporciones arenas del tipo (SC, SM y SP).	Blando a Medio: 2.0 m. < C-2 < 5.0 m. Semiduro: 3.0 m. < C-4 < 8.0 m. Duro a Rígido: 6.0 m. < C-5 < 13.0 m.	Suelos fino de expansión media a alta, con cambio de volumen moderado.	0.5 - 1.0 Kg./cm. <sup>2</sup>	1.5 a 2.3 m.
IV	Urb. Santa Victoria, Federico Villareal, Café Perú, Santa Angela, Parque Zonal, C.E. Salaverry, Sta. Victoria, San Eduardo, Carlos Cabrejos Falla, Ana de los Angeles, Villa El Salvador, Sta. Angela, Nazareno, H. Unanue, Divino Maestro, Corazón de Jesús, Carmen Angélica, Los Jardines de Santa Rosa, La Florida, El Amauta, Los Jazmines, Los Pinos de Plata, V. R. Haya de la Torre, Sta. Margarita y parte del A.H. La Victoria.	Arcillas de media y alta plasticidad del tipo (CL, CH, CL-ML) y en pequeñas proporciones arenas del tipo (SC, SM y SP).	Muy Blando a Medio: 3.5 m. < C-1 < 4.5 m. Semiduro: 4.5 m. < C-4 < 5.5 m. Duro a Rígido: 5.5 m. < C-5 < 10.0 m.	Suelos fino de expansibilidad alta a extremadamente alta, con cambio de volumen moderado a severo.	0.0 - 0.5 Kg./cm. <sup>2</sup>	1.0 a 2.0 m.

Microzonificación de la ciudad de Chiclayo [4]

**Cuadro N° 31: Generación Total de residuos Sólidos Municipales (ton/día)**

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
CHICLAYO	202.24	203.42	208.07	212.82	217.68	222.66	227.74	232.94	238.26	243.71	249.27
CAYALTI	10.21	10.42	10.63	10.84	11.06	11.28	11.51	11.74	11.98	12.22	12.46
CHONGOYAPE	9.95	10.14	10.33	10.52	10.71	10.91	11.11	11.32	11.53	11.74	11.96
ETEN	8.60	8.80	9.00	9.21	9.44	9.67	9.92	10.17	10.44	10.71	11.00
JOSE LEONARDO O.	130.26	133.70	137.19	140.71	144.26	147.85	151.48	155.15	158.85	162.59	166.37
LA VICTORIA	64.61	66.09	67.59	69.14	70.72	72.33	73.98	75.67	77.40	79.16	80.97
LAGUNAS	4.08	4.18	4.27	4.37	4.47	4.57	4.67	4.77	4.88	4.99	5.10
MONSEFU	14.05	14.35	14.66	14.96	15.28	15.59	15.92	16.24	16.58	16.91	17.26
NUEVA ARICA	1.26	1.27	1.29	1.31	1.33	1.35	1.37	1.39	1.41	1.43	1.45
OYOTUN	4.17	4.26	4.36	4.46	4.57	4.67	4.78	4.89	5.01	5.12	5.24
PATAPO	12.90	13.05	13.20	13.35	13.51	13.66	13.82	13.98	14.14	14.30	14.46
PICSI	4.31	4.39	4.48	4.57	4.66	4.76	4.85	4.95	5.05	5.15	5.26
PIMENTEL	20.25	21.21	22.20	23.25	24.35	25.49	26.70	27.95	29.27	30.65	32.10
POMALCA	11.02	11.23	11.39	11.54	11.71	11.87	12.04	12.21	12.38	12.55	12.72
PUCALÁ	5.23	5.33	5.44	5.55	5.66	5.77	5.89	6.01	6.13	6.25	6.38
PUERTO ETEN	1.27	1.29	1.31	1.33	1.36	1.38	1.40	1.42	1.45	1.47	1.50
REQUE	6.66	6.83	7.01	7.20	7.39	7.59	7.79	7.99	8.21	8.42	8.65
SANTA ROSA	7.07	7.29	7.52	7.76	8.00	8.24	8.49	8.75	9.01	9.28	9.55
TUMAN	15.33	14.76	14.93	15.09	15.26	15.43	15.61	15.78	15.96	16.14	16.32
ZAÑA	6.25	6.38	6.50	6.63	6.77	6.90	7.04	7.18	7.33	7.48	7.63
<b>PROVINCIA</b>	<b>539.72</b>	<b>548.40</b>	<b>561.39</b>	<b>574.63</b>	<b>588.17</b>	<b>601.99</b>	<b>616.10</b>	<b>630.51</b>	<b>645.23</b>	<b>660.27</b>	<b>675.62</b>

*Generación diaria total de Residuos sólidos [14]*

**Gráfica N° 7: Generación diaria de residuos municipales (ton/día)**

*Generación diaria total de Residuos sólidos [14]*

**Cuadro N° 33: Composición Física Promedio de los Residuos Sólidos Domiciliarios**

Tipo de Residuo	CHICLAYO	ETEN	JOSE L. ORTIZ	LA VICTORIA	MONSEFU	PATAPO	PIMENTEL	PUERTO ETEN	REQUE	TUMAN	Promedio
Papel	4.635	4.970	1.661	2.074	3.919	10.140	4.333	4.134	4.760	6.500	4.71
Cartón	1.797	10.410	1.548	1.664	1.931	4.340	2.445	2.140	2.715	2.400	3.14
Vidrio	2.095	3.440	0.424	3.684	2.064	10.430	2.450	2.805	1.177	1.700	3.03
Hojalata (Metal Ferroso)	1.294	1.780	0.647	0.339	0.150	3.380	1.500	1.883	0.906	2.900	1.48
Aluminio (Metal No Ferroso)	0.108	1.040	0.028	0.354	0.772	0.560	0.317	0.012	0.039		0.36
PET(1)	1.441	2.870	0.447	0.123	1.054	7.050	2.865	1.140	0.931	1.500	1.94
PEAD (2)	0.510	0.610	1.738	2.260	1.917	0.950	0.582	0.640	1.806	2.400	1.34
PVC (3)	0.299		0.076	0.622	0.184		0.650	0.624	0.114		0.37
PEBD (4)	1.335		0.263	0.380	0.495		0.487	1.497	2.367		0.97
PP (5)	1.063		0.367	0.566	0.459	2.550	0.570	0.765	1.164		0.94
PS (6)	0.210		0.323	0.579	0.170		0.097	0.480	0.841		0.39
Otros (7)	0.544	2.380	0.941	0.436	0.664	5.480	0.375	0.103	0.454	6.300	1.77
Materia Orgánica	63.237	59.790	77.279	38.204	62.401	24.080	40.718	43.439	65.280	32.100	50.65
Tierra, arena, otros	2.358		4.205	21.011	5.302	18.160	5.981	8.073	0.266	23.800	9.91
Telas	1.981		1.650	1.169	3.641	2.140	2.105	2.081	2.325	3.400	2.28
Pañales	5.076		3.494	2.897	5.708		7.714	9.575	4.811		5.61
Papel Higiénico	4.081		1.020	2.094	2.312	6.450	4.690	4.273	2.095	7.700	3.86
Toallas Higiénicas	0.680		0.084	0.328	0.087		0.034	0.446	0.151		0.26
Productos Farmacéuticos	0.096		0.063	0.291	0.072		0.980	0.415	0.131		0.29
Pilas y baterías	0.031	0.130		0.003	0.015		0.020	0.015	0.033	0.400	0.08
Fluorescente y focos	0.059			0.026	0.034		0.522	0.060	0.107		0.13
Otros (Cuero, ceniza, porcelana)	7.071	12.580	3.742	20.896	6.649	4.290	20.565	15.400	7.527	8.900	6.50

*Composición física promedio de Residuos Sólidos [14]*

**Cuadro N° 37: Puntos Críticos aledaños a las acequias o canales de la localidad de Chiclayo**

Acequia	Lugar	Ubicación del Punto Crítico	Tipos de Residuos acumulados
Pulen	P.J. San Sebastián	Prolongación Calle Los Naranjos	Desmante
	P.J. Mariátegui	Prolongación Calle Los Naranjos	Desmante
	P.J. Los Olivos	(Av. Cieza de León	Desmante
	P.J. Virgen de la Paz	(Av. Cieza de León	Desmante
	Urb. Las Brisas	Esquina de Beneficencia- Av.- El Carmen/ Av. Juan Tomis Esquina del cementerio- Av. El Carmen Esquina Av. Nacionalismo con Av. Pedro Cieza de León	Desmante y residuos sólidos
Yortuque	P.J. Ampliación Fanny Abanto	Av. Mesones Muro	Desmante y residuos sólidos
	P.J. Jorge Chávez	Calle San Carlos	Residuos Sólidos
	P.J. San Antonio	Av. Leoncio Prado	Desmante y residuos sólidos
	P.J. Fanny Abanto	Av. Humboldt con Av. M. Muro Prolongación San Carlos	Residuos Sólidos
Cois	P.J. Saúl Cantoral	Av. Nicolás de Piérola con Av. Chiclayo	Desmante y residuos sólidos
	Av. Leguía	Desde AV. J. Chávez hasta la Panam. Norte	Desmante y residuos sólidos

*Puntos críticos aledaños a canales o acequias de acumulación de residuos sólidos [14]*

**ESTIMACION DE LOS PROBABLES CAMBIOS DE VOLUMEN DE LOS  
SUELOS EXPANSIVOS (SEGUN HOLTZ Y GIBBS)**

Contenido coloidal % 0,001 mm	Indice de plasticidad	Limite de retracción	Expansión probable. Cambio volumétrico en % (seco a saturado)	Grado de expansión
> 28	> 35	< 11	> 30	muy alto
20-13	25-41	7-12	20-30	alto
13-23	15-28	10-16	10-30	medio
< 15	< 18	> 15	< 10	bajo

**(SEGUN CHEN)**

% que pasa por tamiz 200	Limite liquido	S.P.T.	Expansión probable. Cambio de volumen en %	Presión de hinchamiento kg/cm <sup>2</sup>	Grado de expansión
> 35	> 60	> 30	> 10	> 10	muy alto
60-95	40-60	20-30	3-10	2,5-10	alto
30-60	30-40	10-20	1-5	1,5-2,5	medio
< 30	< 30	< 30	< 1	0,5	bajo

*Correlación entre los límites de consistencia y el grado de expansión de suelos arcillosos [23].*

La experiencia americana ha demostrado que una estabilización con cal tiene excelentes resultados, en los siguientes casos:

- a) Materiales compuestos por mezclas de grava y arcilla para su uso como capa granular superficial con una incorporación de 2 a 4% de Ca (OH)<sub>2</sub> en peso.
- b) Suelos altamente arcillosos para usarlos como capa granular superficial (5 a 10% de cal en peso) o como capa inferior (1 a 3% de cal en peso).

*Dosificaciones recomendadas de cal para estabilizar suelos [29]*

**Cuadro 9.2**  
**Guía Complementaria Referencial para la Selección del Tipo de Estabilizador**

Tipo de Estabilizador Recomendado	Normas Técnicas	Suelo <sup>(1)</sup>	Dosificación <sup>(2)</sup>	Curado (Apertura Al Tránsito) <sup>(3)</sup>	Observaciones
Cemento	EG-CBT-2008 Sección 3068 ASTM C150 AASHTO M85	A-1,A-2,A-3,A-4,A-5,A-6 y A-7 LL > 40% IP ≥ 18% CMO <sup>(2)</sup> < 1.0% Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) < 0.2% Abrasión < 50% Durabilidad SO <sub>4</sub> Ca <sup>(4)</sup> - AF ≤ 10% - AG ≤ 12% Durabilidad SO <sub>4</sub> Mg - AF ≤ 15% - AG ≤ 18%	2 - 12%	7 días	Diseño de mezcla de acuerdo a recomendaciones de la PCA (Portland Cement Association)
Cal	EG-CBT-2008 Sección 3078 AASHTO M216 ASTM C977	A-2-6, A-2-7, A-6 y A-7 10% ≤ IP ≤ 50% CMO <sup>(2)</sup> < 3.0% Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) < 0.2% Abrasión < 50%	2 - 8%	Mínimo 72 horas	Para IP > 50%, se puede aplicar cal en dos etapas Diseño de mezcla de acuerdo a la Norma ASTM D 6276

*Tiempos de curado de acuerdo a agente estabilizante [29]*

**Cuadro 9.4**  
**Rango de Cemento Requerido en Estabilización Suelo Cemento**

Clasificación de suelos AASHTO	Rango usual de cemento requerido Porcentaje del peso de los suelos
A - 1 - a	3 - 5
A - 1 - b	5 - 8
A - 2	5 - 9
A - 3	7 - 11
A - 4	7 - 12
A - 5	8 - 13
A - 6	9 - 15
A - 7	10 - 16

Fuente: Federal Highway Administration (FHWA)

*Dosificaciones recomendadas de cemento para estabilización de suelos [29]*

## CLASIFICACIÓN AASHTO

Clasificación general	Suelos granulosos (35% o menos que pasa el tamiz # 200)							Materiales limosos y arcillosos ( más de 35% pasa el tamiz # 200)			
	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7 A7-6 A7-5
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamices: % que pasa el Nº 10 (2 mm ) Nº 40 (0.425 mm ) Nº 200 (0.075 mm )	máx. 50 máx. 30 máx. 15	--- máx. 50 máx. 25	--- mín. 51 máx. 10	--- --- máx. 35	--- --- Máx. 35	--- --- máx. 35	--- --- máx. 35	--- --- mín. 36	--- --- mín. 36	--- --- mín. 36	--- --- mín. 36
Consistencia Límite Líquido	---		---	máx. 40	mín. 41	máx. 40	mín. 41	máx. 40	mín. 41	máx. 40	mín. 41
Índice de Plasticidad	máx. 6		No Plástico	máx. 10	máx. 10	mín. 11	mín. 11	máx. 10	máx. 10	mín. 11	mín. 11 <sup>(1)</sup>
Tipos de materiales característicos	Fragmentos de Piedras, gravas y arena		Arena Fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	excelente a bueno							regular a malo			

*Clasificación de suelos para carreteras según AASHTO*

**Anexo N° 02: Panel fotográfico**

*Extracción de muestra de suelo de calicata N° 01 en Urb. Ciudad del Chofer*



*Extracción de muestra de suelo de calicata N° 03 en Urb. Ciudad del Chofer*



*Extracción muestra de suelo de calicata N° 02 en Urb. Ciudad del Chofer*



*Manipulación de suelo in situ para reconocimiento previo de características físicas del suelo*



*Identificación de nivel freático a 1.30 metros de profundidad en calicata N° 01*



*Vista interior de saco con residuos de vidrio recolectados de vidriería "Cristal & Art"*



*Residuos de vidrio reducidos de manera manual a tamaños de entre 2 a 3 pulgadas*



*Triturado de vidrio usando un molino artesanal eléctrico*



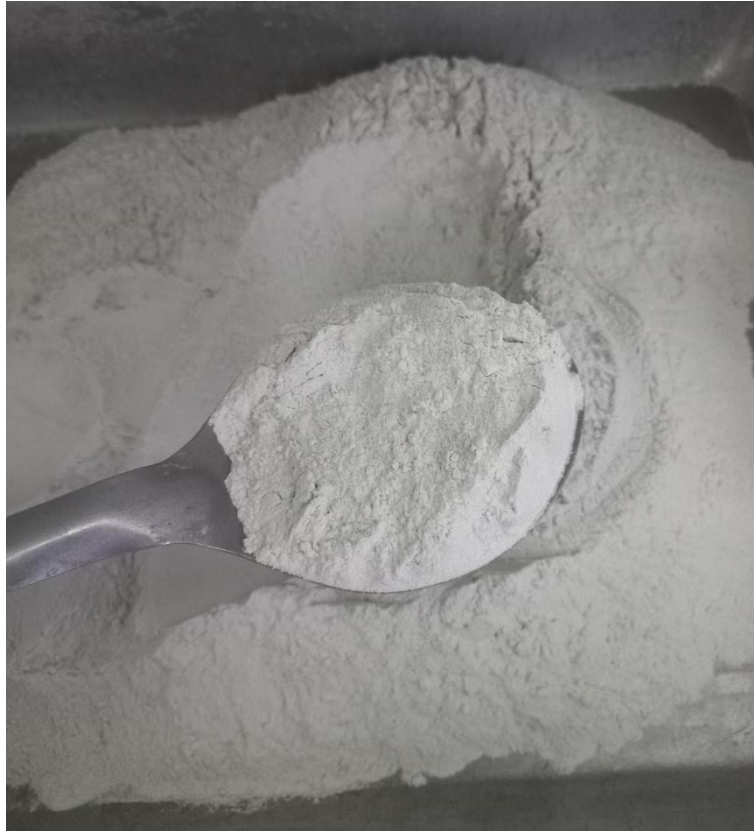
*Vidrio triturado por primera vez con molino artesanal eléctrico*



*Vidrio triturado por segunda vez con molino artesanal eléctrico*



*Proceso de tamizado del vidrio triturado usando la malla N° 50 y N° 200*



*Vidrio triturado tamizado de tamaño entre 75  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$*



*Muestras de suelo natural después de ser secadas durante 24 h en horno.*



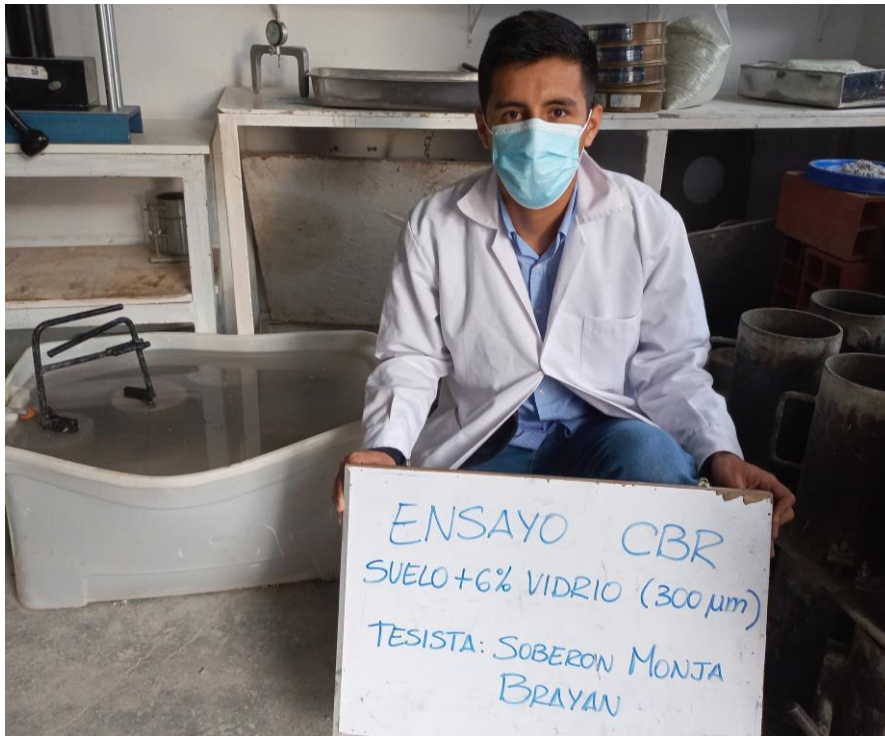
*Muestra de suelo natural sometida a proceso de cuarteo previo chancado con mortero*



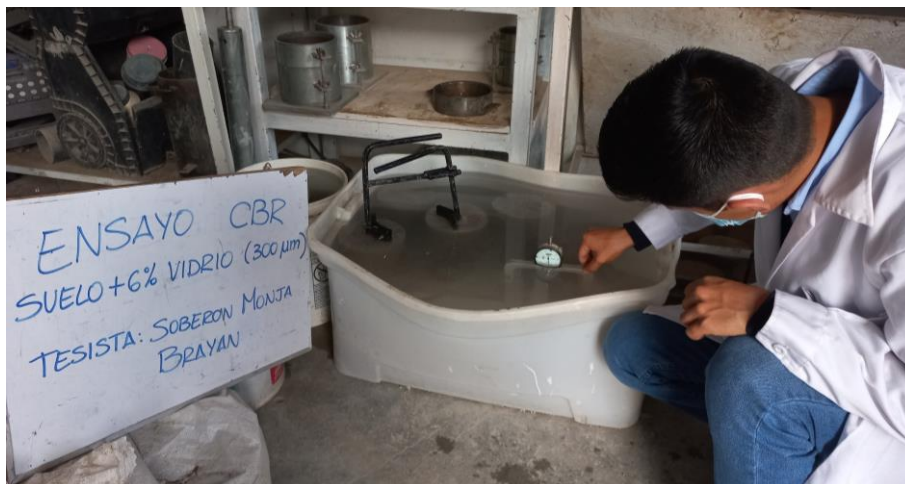
*Lavado de la parte fina del suelo para ensayo de granulometría por tamizado*



*Distribución granulométrica de la fracción gruesa del suelo natural*



*Muestra de suelo adicionada sumergida por 96 horas*



*Proceso de medición de expansión en muestra de suelo adicionada mientras está sumergida en agua*



*Proceso de penetración de la muestra de suelo adicionada luego de ser sumergida por 96 horas en agua*



*Proceso de penetración de la muestra de suelo adicionada luego de ser sumergida por 96 horas en agua*



*Proceso de penetración de la muestra de suelo adicionada luego de ser sumergida por 96 horas en agua*



*Proceso de pesado de muestras de suelo en bolsas para su posterior mezclado con vidrio en polvo*



*Dosificaciones de suelo arcilloso seco y vidrio molido previo a su mezclado*

**Anexo N° 03: Resultados de ensayos de laboratorio**