

Estado del arte basado en investigaciones a nivel mundial sobre mejoramiento de suelo con
adición de grano de caucho y residuo de vidrio.

Luis Carlos Espinosa Pilonieta
Anyel Katherine Quintero Vivas

Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga
Facultad de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2020

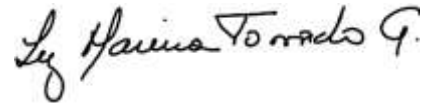
Estado del arte basado en investigaciones a nivel mundial sobre mejoramiento de suelo con adición de grano de caucho y residuo de vidrio.

PRESENTADO POR:

Luis Carlos Espinosa Pilonieta
Anyel Katherine Quintero Vivas

PROYECTO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR DEL PROYECTO
Ing. MSc. LUZ MARINA TORRADO GÓMEZ



Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga
Facultad de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2020

Nota de aceptación.

Firma del jurado calificador

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, octubre de 2020

Dedicatoria

A Dios como ser supremo y creador, que nos permite dar cada paso y que ha sido el guía de todos y cada uno de mis proyectos de vida.

A mi madre, quien ha sido mi motor y quien se ha sacrificado por darme la oportunidad de tener formación profesional, ella, ejemplo de perseverancia y disciplina, su apoyo incondicional fue fundamental en esta etapa.

A mi hermano, quien ha sido mi cómplice y con su particular y amorosa forma de ser es mi polo a tierra.

A mi compañero de trabajo y amigo Luis Carlos Espinosa Pilonieta, que ha sido como un hermano, con quien me he apoyado desde el inicio de este proceso formativo y desarrollamos metas a futuro.

A mí, porque mi personalidad me ha permitido alcanzar lo propuesto, me ha dejado enseñanza de cada vivencia y porque hoy estoy aún más cerca de lograr otro éxito que será la puerta del siguiente.

Anyel Katherine Quintero Vivas

Primero que todo a Dios por darme la oportunidad de conseguir este logro personal, por guiarme siempre por un buen camino e iluminarme en momentos de oscuridad.

A mi madre Carmen Elisa Espinosa Pilonieta, por ser mi más grande motivación, por su apoyo incondicional en todo este proceso, por haberme enseñado que siempre debo superarme y que todo lo que me proponga lo puedo conseguir con disciplina, a mi hermana Liza Mariet Umaña Espinosa, por siempre encontrar en ella un consejo y por ser mi ejemplo a seguir.

A mi compañera de tesis, Anyel Katherine Quintero Vivas por acompañarme y brindarme de su honesta amistad en este proceso de educación superior, por escogerme como su compañero de tesis y así culminar juntos este logro en nuestras vidas.

A mí, por permanecer perseverante en este largo camino, por demostrarme que soy capaz de conseguir con esfuerzo y dedicación todo lo que me proponga y por esas ganas de superarme cada vez más.

Luis Carlos Espinosa Pilonieta

Agradecimientos

A Dios, por darnos sabiduría y ser el guía de todas nuestras decisiones.

Gracias a la Universidad Pontificia Bolivariana, por ser el puente para encontrarnos con todos y cada una de las personas que aportaron en este proceso de formación para nuestras vidas.

A la Ingeniera Luz Marina Torrado Gómez, por su excelente actitud y disposición desde el momento que la conocimos, por compartir su conocimiento y por brindarnos el apoyo y seguimiento necesario para el desarrollo de una de las etapas más importantes en este proceso de formación.

A familiares y amigos, que sin ningún interés nos dieron acceso a plataformas de otras universidades nacionales e internacionales, para crear un panorama más amplio y sólido sobre la investigación.

Finalmente; a mis calificadores y a su vez docentes, que aportaron cada uno para formar un conocimiento sólido y formación humanística sobre el hoy mi estilo de vida, la ingeniería civil.

Tabla de contenido

Introducción	14
Capítulo 1 Objetivos	16
General	16
Específicos.....	16
Capítulo 2 Planteamiento del probelma	17
Capítulo 3 Lustificación.....	18
Capítulo 4 Alcance.....	19
Capítulo 5 Antecedentes	20
Estabilización de suelos.....	20
Grano de Caucho como estabilizador.....	21
Residuo de vidrio como estabilizador	22
Capítulo 6 Marco referecnial	23
Estado del arte	23
Concepto.....	23
Grano de caucho.....	24
Información general.....	24
Propiedades técnicas.....	26
Aspecto ambiental.....	29
Residuo de vidrio.....	29

Información general.....	29
Propiedades técnicas.....	30
Aspecto ambiental.....	31
Estabilización de suelos.....	32
Tipos de suelo.....	33
Parámetros de estado del suelo.....	36
Razones para estabilizar un suelo.....	37
Tipos de estabilización.....	37
Estabilización mecánica.....	37
Estabilización química.....	38
Estabilización físico-química.....	40
Técnica de mejoramiento con grano de caucho.....	41
Fibras de caucho de llanta a suelo ML.....	41
Pedazos de llanta sin tratamiento a suelo SP.....	45
Caucho en fragmentos y miga a suelo CH.....	47
Grano de caucho a suelo CL.....	50
Grano de caucho a suelo GC.....	53
Caucho triturado a suelo MH.....	55
Técnica de mejoramiento con residuo de vidrio.....	58
Triturado y polvo de vidrio residual a suelo CH.....	58

Vidrio residual de molino a suelo MH.....	63
Polvo de vidrio residual a suelo CL.....	67
Polvo de vidrio residual a suelo CL-ML	70
Cuadro comparativo de las técnicas de mejoramiento en estudio	72
Capítulo 7 Postura Crítica	77
Capítulo 8 Conclusiones	79
Capítulo 9 Recomendaciones.....	82
Capítulo 10 Referencia Bibliográfica.....	83

Lista de Tablas

Tabla 1. Elementos componentes de la llanta	25
Tabla 2. Propiedades del caucho de llantas.....	25
Tabla 3. Composición química del vidrio	30
Tabla 4. Propiedades del vidrio.....	31
Tabla 5. Tipos de suelo	35
Tabla 6. Caracterización del suelo	42
Tabla 7. Caracterización del suelo	45
Tabla 8. Caracterización del suelo	47
Tabla 9. Caracterización del suelo	51
Tabla 10. Caracterización del suelo	53
Tabla 11. Caracterización del suelo.	56
Tabla 12. Caracterización del suelo.	59
Tabla 13. Tamaño de partículas aditivo.	60
Tabla 14. Caracterización del suelo	64
Tabla 15. Caracterización del suelo	67
Tabla 16. Caracterización del suelo	70
Tabla 17. Cuadro comparativo.....	73

Lista de Figuras

Figura 1. Componentes de la llanta.....	24
Figura 2. Fibras de caucho	43
Figura 3. Pedazos de caucho de llanta	46
Figura 4. Fragmentos de llanta.....	48
Figura 5. Miga de caucho de llanta	49
Figura 6. Grano de caucho de llanta.....	51
Figura 7. Grano de caucho	54
Figura 8. Residuo de llanta.....	56
Figura 9. Triturado de vidrio.....	60
Figura 10. Polvo de vidrio.....	61
Figura 11. Vidrio de molino de bolas.....	65
Figura 12. Vidrio de molino de alta energía.	65
Figura 13. Polvo de vidrio.....	68
Figura 14. Polvo de vidrio residual.....	71

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Estado del arte basado en investigaciones a nivel mundial sobre mejoramiento de suelo con adición de grano de caucho y residuo de vidrio.

AUTOR(ES): Luis Carlos Espinosa Pilonieta
Anyel Katherine Quintero Vivas

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Luz Marina Torrado Gómez

RESUMEN

El crecimiento socioeconómico de la población ha generado la producción acelerada de materiales no reutilizables, provocando la acumulación colapsada de los mismos; el campo de la ingeniería civil como uno de los más influyentes por su generación de infraestructura a partir del aprovechamiento máximo del terreno, conlleva ideas que han sido la base de estudio para implementar estos materiales provocando un balance ambiental. Para que estas metodologías sean válidas es necesario realizar estudios previos de caracterización del material, también analizar mediante laboratorios y procedimientos empíricos la viabilidad de las técnicas; este documento expone dos técnicas de estabilización reciclables (grano de caucho y residuo de vidrio), esto se hace en base a una recopilación de datos de diferentes plataformas, para la creación de un orden de contenido que refleja información de interés como, descripción del tipo de suelo, parámetros influyentes, aplicación y tratamiento previo del material; como resultado se establece la viabilidad de la técnica y las variables que influyen directamente con su respectiva relación de proporcionalidad. Finalmente, se resumen los resultados en un cuadro comparativo que permite tener un parámetro inicial de selección acertada según el tipo de suelo, junto a los porcentajes más favorables de aplicación en estas técnicas, que son de hasta 10% en relación a la masa y los factores directamente involucrados, estos son caracterización, capacidad portante del suelo y contenido de humedad.

PALABRAS CLAVE:

estado del arte, estabilización de suelos, llanta, vidrio, residuos.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: State of the art based on worldwide research on soil improvement with the addition of rubber grain and glass residue.

AUTHOR(S): Luis Carlos Espinosa Pilonieta
Anyel Katherine Quintero Vivas

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Luz Marina Torrado Gómez

ABSTRACT

The socio-economic grow up of the population has generated the accelerated production of irreusable materials, causing that their accumulation collapsed; The field of civil engineering as one of the most influential for its generation of infrastructure from the maximum use of the land, carries ideas that have been the start point of study to implement these materials causing an environmental balance. For these methodologies to be valid, it is necessary to carry previous studies out to characterize the material, also to analyze the viability of the techniques through laboratories and empirical procedures; This document exposes two recyclable stabilization techniques (rubber grain and glass residue), this is done based on a compilation of data from different platforms, for the creation of a content order that reflects information of interest such as description of the type of soil, influencing parameters, application and previous treatment of the material; As a result, the viability of the technique and the variables that directly influence their respective proportionality relationship are established. Finally, the results are summarized in a comparative table that allows an initial parameter of correct selection according to the type of soil, together with the most favorable percentages of application in these techniques, which 10% as maximum quantity in relation to the mass and the Factors directly involved; these are characterization, soil bearing capacity and moisture content.

KEYWORDS:

state of the art, soil stabilization, tire, glass, waste

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

Los suelos como materia prima de origen natural presentan en sus condiciones iniciales una serie de características favorables y a su vez desfavorables, esto genera un campo de investigación que abarca planteamientos y estudios en busca de generar una mejora que permita dar utilidad y a su vez generar un beneficio a la sociedad, entre ellas el control y estabilización de situaciones como; contracción – hinchamiento, resistencia al corte, capacidad de carga, entre otras.

El crecimiento poblacional e industrial del mundo ha generado una producción significativa de residuos, esto ha generado una serie de incógnitas y a su vez procesos investigativos basados en teoría y ensayos empíricos de laboratorio para generar un modelo sostenible con la reutilización de los mismos, para disminuir la acumulación e impacto que estos generan al no degradarse; entre ellos el grano de caucho de llanta; según estudios una cifra mayor a 500 millones de neumáticos almacenados en Estados Unidos, otros 28 millones en Canadá (Dickson, Dwyer, & Humphrey, 2001). Así podrían seguir saliendo cifras alrededor del mundo, su volumen representativo generó ideas de reutilización como lo es la aplicación de estos en geotecnia; que luego de una serie de estudios de caracterización y descripción teórica del material se plantearon aplicaciones ingenieriles como rellenos, estabilización, reforzamiento y drenaje entre otras (Young, Sellaise, Zeroka, & Sabris, 2003).

A su vez, los residuos de vidrio son contemplados como un reto respecto al medio ambiente, debido a que su producción a nivel mundial es de aproximadamente 130 millones de toneladas, y

estos son datos al 2015 (Islam , Rahman , & Kazi, 2017); el porcentaje de reutilización e este material es de 40% aproximadamente, siendo el restante una problemática por su acumulación en sitios no apropiados, su tiempo de biodegradación es muy considerable, son 450 años lo que tarda este, así la reutilización del mismo surge como idea para estabilización de suelos, esta idea a partir de sus propiedades físicas que lo tildan como permeable, rígido a la deformación y resistente (Borse , Ahirrao, & Bagrecha , 2013).

El objetivo principal de este estudio investigativo es generar un documento con información suficiente, relevante y sustancial, acerca de dos técnicas de mejoramiento planteadas para generar un beneficio ingenieril y ambiental; esto mediante la recolección, clasificación y organización de información verídica expuesta a nivel internacional sobre el tema de interés, garantizando un material útil para el apoyo de quienes quieran continuar con la investigación o considerar una de estas técnicas.

Capítulo 1

Objetivos

General

- Recopilar información sobre el mejoramiento de suelos y la aplicación de las técnicas con los dos materiales reciclables propuestos en esta investigación; esto mediante consulta de material bibliográfico (tesis, ensayos, artículos, etc.).

Específicos

- Clasificar y condensar la información de documentos relacionados con el mejoramiento de suelos y las técnicas seleccionadas en este estudio.
- Generar un documento que establezca la aplicación y aspectos relevantes del mejoramiento de suelos con los materiales propuestos.
- Evaluar teóricamente el comportamiento de los materiales propuestos como técnica de mejoramiento de suelo; esto mediante el desarrollo de un cuadro comparativo.

Capítulo 2

Planteamiento del Problema

El crecimiento poblacional e industrial ha sido exponencial, tanto que se considera que el planeta y sus recursos son insuficientes para abastecer, y a su vez produce en exceso todo tipo de desechos, derivados de diferentes sectores, agrícola, industriales, hospitalarios, residenciales, etc. Su símbolo de amenaza es cada vez más llamativo para el medio ambiente, generando campos de estudio aspectos como el tratamiento, reutilización y eliminación según su clasificación (Yadav & Tiwari, 2017).

También se encuentra el campo de la ingeniería civil, que juega un papel fundamental en el desarrollo socioeconómico y abarca la materia prima en diferentes vías de aprovechamiento, esto genera un alto consumo de materiales y a su vez producción de desechos, que están siendo reutilizados, pues el terreno cuenta con características físicas, mecánicas y geológicas de origen, que por medio de modificaciones se mejoran para obtener un aprovechamiento máximo de su capacidad; esto genera la existencia de documentos que mediante investigaciones y ensayos de laboratorio han planteado varias técnicas de mejoramiento. En consecuencia, generando un beneficio a un grupo de usuarios que darán uso a un terreno; El propósito es generar un documento que sea confiable y útil para el análisis previo a la aplicación de una técnica de mejoramiento.

El material bibliográfico será el principal componente, en base a esto la búsqueda de documentos confiables será la pauta al tiempo de desarrollo de esta investigación.

Capítulo 3

Justificación

Un documento con información verídica, resumida y práctica permite al profesional tener un panorama del posible comportamiento al modificar las condiciones naturales de la materia prima.

Por lo anterior, este documento abarca dos técnicas de mejoramiento que son investigadas en la actualidad y que muestran resultados favorables en su aplicación, la información acá suministrada permite a quien le interese, inicialmente predecir el posible comportamiento del suelo, a su vez, conocer valores considerables para una posible aplicación y abarcar investigaciones futuras con el fin de disminuir el margen de error en los datos obtenidos, generando una técnica de mejoramiento prometedora por su aporte ambiental e ingenieril.

Capítulo 4

Alcance

La investigación se centra en la recopilación de documentos confiables y bien estructurados presentes en diferentes plataformas mundiales, los cuales aportan aspectos relevantes desde el punto de vista ingenieril como, propiedades físicas, mecánicas, porcentajes, ventajas, desventajas, entre otras. En la aplicación de las técnicas de mejoramiento son muchas las que se han implementado hasta la actualidad. Para este documento se realiza un enfoque en dos técnicas que están siendo llamativas para estudio por su aporte ambiental, estas son:

- Técnica de mejoramiento de suelos con grano de caucho
- Técnica de mejoramiento de suelo con residuo de vidrio

Cada una de estas técnicas será analizada desde el punto de vista investigativo con los datos proporcionados por los documentos existentes, luego de clasificar y sintetizar la información, se pretende generar un comparativo de los materiales propuestos para reconocer su relación y mejor aplicación.

Este aporte investigativo se estructura bajo la norma APA y funciona como tesis de grado para obtener el título de ingeniero civil.

Capítulo 5

Antecedentes

La ingeniería civil juega un papel fundamental en el desarrollo y bienestar de la sociedad, es un campo de estudio que se puede abarcar desde diferentes perspectivas y que ha crecido de manera significativa, con esto ha generado un sin número de investigaciones relevantes que son contrastadas con metodologías experimentales para buscar soluciones novedosas y aportar al crecimiento de técnicas y aplicaciones que garanticen la mejoría y utilización de los recursos naturales como lo es el terreno.

De manera general se exponen algunos documentos que permiten identificar la idea base que enfoca el documento.

Estabilización de suelos

Este proceso ingenieril donde se agrega a una materia prima en estado original como lo es el suelo, materiales con o sin procesamiento previo, los cuales funcionan como aditivos para alcanzar aspectos considerables como graduación, textura, plasticidad, entre otros. En efecto el suelo expone una mejor conexión de partículas con rangos adecuados logrando tres objetivos importantes: (Hernández L, Ramírez R., & Zelaya A, 2016)

- Adecuada estabilidad ante la presencia de cargas
- Durabilidad
- Disminución de cambios volumétricos.

El uso de métodos de estabilización nace de la necesidad que presenta un suelo en capacidad de soporte para ser productivo, en lo que la distribución de cargas tiene un papel fundamental, los usos principales son:

- Regenerar la calidad: Se logra garantizando una buena graduación del suelo, reducción del índice de plasticidad y de los rangos de expansividad.
- Disminución del espesor: modificar la dureza y rigidez por medio de procesos de adición de otros materiales, generando una buena cohesión entre los materiales para garantizar aporte la estabilidad y durabilidad necesaria para su el uso determinado. (Hernández L, Ramírez R., & Zelaya A, 2016)

Considerando la importancia de los materiales que son analizados como estabilizadores para este documento se presentan dos documentos actuales y con información que se considera importante para exponer el tema de manera inicial.

Grano de Caucho como estabilizador

Debido a que el desecho que se produce por la llanta es altamente considerable, este documento expone una de los métodos potenciales para la reutilización; el neumático posterior a un proceso de trituración en el contexto de construcción, información como pruebas in situ y de laboratorio con material granular para evaluar las propiedades al modificar con residuo de caucho el material en estado natural, tiene como enfoque principal el uso como subrasante en una vía de ferrocarril específica. Esto en cantidades porcentuales respecto al peso en intervalo de 1% a 10% y análisis de todos los parámetros importantes como, densidad, módulo resiliente entre

otros; los resultados reflejan una mejora de resistencia a la degradación afectando de manera inversamente proporcional la capacidad de carga, la cual se considera aceptable (Hidalgo S., Martínez F, Medel P, & Insa F, 2015).

Residuo de vidrio como estabilizador

Esta investigación abarca la adición de residuo de vidrio en busca de un cambio positivo a las propiedades geotécnicas de un suelo, evaluado mediante ensayos de laboratorio a las pruebas principales de caracterización de un suelo, como referente se extraen muestras de suelo de diferentes puntos característico por su poca resistencia, teniendo la caracterización del suelo virgen se compara con el suelo modificado con residuo de vidrio en tres porcentajes (4%, 8% y 12%), los ensayos referentes fueron gradación, gravedad específica, compactación de proctor estándar, límites de Atterberg, corte directo. Como resultado el residuo de vidrio genera resultados como técnica de mejoramiento pues con un porcentaje óptimo de adición del 8%, modifica propiedades como los límites de Atterberg, densidad máxima, cohesión entre otros para en una relación de proporcionalidad otorgar mayor resistencia (Muhammad , Muhammad , & Mateeullah , 2018).

Capítulo 6

Marco Referencial

Estado del arte

Concepto

Es un concepto que deriva una cantidad de definiciones, en relevancia cabe citar el diccionario de Oxford, “el estado del arte se refiere al uso de las técnicas o métodos más modernos y avanzados, y es un adjetivo que califica a algo como lo mejor que puede presentarse en la actualidad”. Realizar un estado del arte abarca verbos como investigar, recolectar, clasificar y analizar, todo esto con el fin de consolidar un documento que dirija la información recaudada para la construcción de un orden coherente y un diagnóstico sobre el tema de estudio.

Organizar documentos bibliográficos, proceder a leerlos y sustraer la información relevante del tema crea una base de datos consistente, para con esta recopilación de ideas poder trascender el texto y ubicarlo en tiempo y espacio, generando una postura crítica sobre lo existente, y lo posible para nuevos estudios partiendo de un conocimiento previo sobre el tema (Ragnhild, 2016).

Grano de caucho

Información general.

Componentes de la llanta

La llanta está considerada como una estructura en forma tubular que se produce en grandes cantidades y se compone de diversos materiales los cuales están expuestos en este documento (Ver figura 1.)

- Banda de rodamiento
- Paredes (costados)
- Talones
- Telas de cuerpo (carcasa)
- Telas estabilizadoras
- Relleno del talón.

Figura 1. Componentes de la llanta



Fuente: <http://www.neumaticosmedica.com.ar/partes.html>

En la tabla 1. Se exponen los cuatro elementos fundamentales con sus respectivos porcentajes para la composición de la llanta, cabe aclarar que estos valores estándar son referencia para la producción de la misma, pero pueden ser alterados en un rango no muy diferencial.

Tabla 1. Elementos componentes de la llanta

Material	Porcentaje (%)
Caucho/elastómero	48
Negro de Carbono	22
Acero	15
Textil	5

Fuente: http://www.resol-ltda.com/proceso_de_produccion.html

En la tabla 2. Se observan las propiedades de la materia prima de la llanta que es el caucho, conocer el comportamiento permite pronosticar su viabilidad y determinar su uso.

Tabla 2. Propiedades del caucho de llantas

Elastómero	Propiedades
Caucho Natural	Excelentes propiedades mecánicas, tracción, flexión y compresión.
Poli butadieno	Excelente aislante eléctrico, muy buena resistencia a los ácidos diluidos y detergentes.
	Buena adhesión a tejidos y metales.
Butadieno	Muy buenas propiedades mecánicas.
	Resistencia al envejecimiento por calor y oxidación.
Estireno	Buena resistencia a los ácidos diluidos.

Fuente: Elastómeros, Ciencia de los Materiales, Universidad Nacional de Rosario

Propiedades técnicas.

Estos han sido investigados mediante métodos de ingeniería geotécnica, se reflejan diferencias importantes entre el material de suelo y el residuo de llanta que deben considerarse, se van a presentar las propiedades más interesantes del material desde el punto de vista de ingeniería civil, teniendo en cuenta que en este campo las referencias siempre van a ser resultados de otros trabajos similares.

Densidad.

La densidad compacta, es decir, la densidad de grano de las tiras de neumáticos individuales, de las tiras de neumáticos, su valor oscila entre 1.08-1.27 t / m³

Esta también puede presentar variación al momento de ser compactada pues será forzada a una unión de partículas considerable, en la presente investigación se obtienen algunos rangos:

- La densidad aparente de los restos de neumáticos investigados en este trabajo de tesis oscila entre 420 kg / m³.
- Con relleno suelto hasta 670 kg / m³, después de la compactación de proctor modificado. A 40 kPa vertical se obtiene 770kg / m³.

Porosidad.

Es una propiedad con valores altos y que varía según el estado en que sea analizada, para la presente investigación tenemos los siguientes rangos:

- La porosidad inicial (a 0 kPa) varió entre 62%
- Para condiciones de llenado suelto y 45%

- después de la compactación proctor modificada donde cambia de 0 a 40 kPa, la porosidad es 50% para la condición inicial de relleno suelto y 38% para modificado.

El proctor como condición inicial. Las mediciones muestran que el volumen del neumático individual triturado, en este intervalo de estrés como un indicador de cómo el tamaño afecta la porosidad.

Esta porosidad se puede controlar mediante la relación de vacíos como se refleja en esta investigación.

Permeabilidad.

La permeabilidad está directamente relacionada con el paso y presencia del agua, la cual es alta para el material aditivo (neumático) en comparación con la que tiene la materia prima (suelo).

En base a los aspectos influyentes para esta propiedad se obtienen los rangos de permeabilidad para esta investigación:

Con un esfuerzo de confinamiento de 1 MPa, resultando en una tensión vertical del 65%, la permeabilidad es de 10^{-4} m / s, La influencia del tamaño de la llanta y la tensión vertical también.

Compresión.

Frente a esta propiedad el residuo de llanta es altamente compresible, los factores considerables son la tensión y compactación en carga y descarga.

Para la presente investigación se obtuvieron como rangos de compresión:

Los restos de neumáticos son un material altamente compresible. Factores principales que afectan la compresibilidad

- Como estado natural de compactación, la compresión vertical a 40 kPa varía del 13% al 30%.
- A reducción de aproximadamente el 50%. La energía de compactación más alta, aquí representada por proctor modificado.

Compactación.

Es un estado al que se puede llevar el material mediante método manual o mecánico, aumenta la densidad y rigidez y a su vez disminuye la compresibilidad.

Una relación considerable y observada en esta investigación es el contenido de agua tiene un bajo efecto en el resultado de compactación en las pruebas de proctor y es desde un punto de vista de ingeniería insignificante.

La obtención de la densidad máxima es de 75 mm.

Durabilidad y degradación.

Material alcalino y oxidante, según estudios tiene un periodo de duración de 42 años o más, una degradación casi nula y con porcentaje de absorción de agua de 4.7%, esto sin generar efectos sobre la fuerza; en base a la línea de investigación de este documento, también se estudiaron los suelos granulares y en comparación se observa:

Las tiras de neumáticos tenían un residuo insoluble del 96,4%, en comparación con el 40-70% para suelos granulares (Edeskär, 2006).

Aspecto ambiental.

En 2014, el último año del cual se cuenta con estadísticas consolidadas sobre el mercado del caucho, el consumo mundial de esta materia prima fue de 28,9 millones de toneladas; se estima que en 2015 la demanda mundial de caucho aumentó un 0.7% respecto a 2014 y que entre 2016 y 2024 el consumo aumentará un 3.1% anualmente en promedio confirmando la tendencia creciente del mercado observada en las últimas décadas (Pelaez , Velásquez , & Giraldo Vásquez, 2017).

En Colombia las llantas usadas se consideran uno de los generadores de contaminación ambiental significativa, según datos solo la capital del país arroja 2.5 millones de llantas usadas al año, de las que 750.000 son botadas sin consideración en humedales y cañerías, esto sin exponer los datos de los demás departamentos del país (Malaver, 2014).

Residuo de vidrio

Información general.

El vidrio se caracteriza por ser cerámico, es amorfo, no cristalino, frágil y un material inorgánico, los silicatos son el principal componente; obtenido por la fusión de arena silícea con potasa, permite moldearse cuando se encuentra en presencia de grandes temperaturas.

Este material cuenta con sus propiedades ópticas, mecánicas y térmicas, son directamente influyentes en el material y entre ellas presentan una variación considerable de valores, que son

los que se deben tener en cuenta para poder predecir la reacción del material en diferentes condiciones a las naturales (Poveda, Granja, Hidalgo , & Ávila , 2015).

Resistencia del vidrio al frío y al calor.

Por la variación de componentes en la fórmula de composición y a la diferencia en el coeficiente de expansión (medida que define el grado de expansión o contracción que un material presenta al experimentar cambios de temperatura). Presenta una relación inversamente proporcional entre el coeficiente de expansión y la resistencia a un cambio brusco de temperatura (Ramirez, 2007).

En la tabla 3. Se exponen los elementos componentes del vidrio como material, donde se observa que la sílice es el principal componente de este sólido.

Tabla 3. Composición química del vidrio

Ítem	Componente	Composición (%)
1.	Sílice	71
2.	Oxido de sodio	11.25
3.	Lima	10.25
4.	Aluminio	1.5
5.	Otros	6

Fuente: <http://www.worldscientificnews.com>

Propiedades técnicas.

Conocer las propiedades del material, es identificar el comportamiento en valores teóricos del material en diferentes estados y ambientes, se puede considerar como la biografía o presentación del mismo, estas se observan en la tabla 4.

Tabla 4. Propiedades del vidrio

Propiedad	Valor	Unidad
Punto de Ablandamiento	730	°C
Densidad a 25°C	2,49	g/cm ³
Dureza	6,5	Mohs
Gravedad específica	2,62	-
Módulo de Elasticidad a 25°C	719	Kbar
Módulo de Poisson a 25°C	0,22	-
Módulo de Young	720000	Kg/cm ²
Resistencia a la tracción a 25°C (aprox)	900	Bar
Resistencia a la compresión	860 - 1020	Mpa
Resistencia a la flexión	52	Mpa
Coefficiente de dilatación lineal a 25°C	8,72x10 ⁻⁶	°C ⁻¹
Calor específico a 25°C	0,20	cal/g/°C
Conductividad térmica a 25°C	0,002 1,05	Cal/cm.s.°C W/mK
Apacibilidad química DIN 12111	13,52	mL de HCl 0,01N
Tensión superficial a 1200°C	319	dinas/cm
Índice de refracción (a 589,3 nm)	1,52	-

Fuente: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/413/pdf "Textos Universitarios: El Vidrio"

3ra ed., Madrid

Aspecto ambiental.

El vidrio se considera un reto para el medio ambiente, esto en consecuencia a los volúmenes tan considerables de producción, se habla de un promedio de 130 millones de toneladas a nivel

mundial, de los cuales solo un 40% son reciclados; por lo anterior el porcentaje restante se deposita en vertederos, también cabe resaltar que el vidrio toma 450 años para biodegradarse.

Son estas las razones por las que la vía de reutilización ha sido un camino viable que está generando resultados favorables gracias a sus propiedades físicas en estado fragmentado (permeabilidad, rigidez, deformación y resistencia al aplastamiento) (Islam , Rahman , & Kazi, 2017).

Estabilización de suelos

(Hernández L, Ramírez R., & Zelaya A, 2016): Sobre un proyecto geotécnico se lleva a cabo un estudio previo que, mediante caracterización de las propiedades del suelo, permite reflejar el estado y viabilidad del mismo para llevar a cabo determinada construcción, el mejoramiento como lo indica la palabra, ofrece una solución eficiente para el control de soporte de la misma.

Este mejoramiento se desarrolla mediante técnicas que han sido implementadas por medio de proyectos de investigación y pruebas experimentales realizadas a suelo virgen; las cuales siguen aumentando y muestran más número de alternativas a desarrollar siendo las propiedades del suelo un factor determinante para seleccionar la técnica más apropiada; Con esto se busca mantener tres condiciones importantes en el material:

- Aumentar la capacidad y la resistencia cortante del suelo.
- Disminuir los asentamientos, tanto absolutos como diferenciales, y acelerarlos cuando sucedan.
- Eliminar el riesgo de licuefacción en caso de terremoto o vibraciones.

- Llenar vacíos del suelo.
- Evitar la filtración.
- Incrementar la densidad.
- Controlar las deformaciones.

Tipos de suelo.

Suelos residuales.

Son los suelos que continúan en su lugar de origen como consecuencia de los agentes del intemperismo, desintegración mecánica y/o descomposición química.

Suelos transportados.

Como lo indica su nombre son trasladados de su punto de origen por agentes naturales como agua, viento, entre otros; reubicándose en otra. . (Hernández L, Ramírez R., & Zelaya A, 2016).

Conceptos y ensayos utilizados en la clasificación de suelos.

En todo proyecto la identificación y caracterización del suelo es esencial, aun cuando se tiene la experiencia y se puede predecir el tipo de suelo esta debe complementarse con los respectivos ensayos (granulometría y límites de Atterberg).

La variedad en el tamaño de partículas analizadas mediante un proceso de tamizado o sedimentación (inferior a 0.075 mm) se obtiene un tipo de suelo; cuando el resultado es arcillas y limos se complementa con el parámetro de plasticidad, los límites de Atterberg que definen la

cantidad de agua para los que una arcilla determinada, triturada, obtiene posible consistencia, estos son:

- Límite líquido, LL: es el contenido de agua de una masa arcillosa por encima del cual pasa del estado plástico al estado líquido.
- Límite plástico, LP: es el contenido de agua de una masa amasada por debajo del cual pasa del estado plástico al estado semisólido.
- Límite de contracción: contenido de humedad por debajo del cual, no puede existir cambio volumétrico adicional en el suelo.
- Índice plástico, IP: Es la diferencia entre los límites líquido y plástico indicando la cantidad de agua capaz de absorber un suelo previo a disolverse en una solución, su relación con el material es directamente proporcional.

Como resultado de la identificación de partículas del material se puede determinar el tipo de suelo; Según la teoría existente podemos encontrar cinco tipos de suelo característicos los cuales se observan en la tabla 5. Con su respectivo símbolo, finalmente en la actualidad existen dos normas que exponen una nomenclatura específica según los resultados de los ensayos de caracterización, estas son:

Nomenclatura de suelos en base a norma AASHTO m-145-91.

Se da por el tamaño de las partículas que forman los suelos, los clasifica de la siguiente manera:

- Grava: de un tamaño menor a 76.2mm (3”) hasta el tamiz No 10 (2mm).
- Arena Gruesa: de un tamaño menor a 2mm hasta el tamiz No 40 (0.425mm).
- Arena Fina: de un tamaño menor a 0.425mm hasta el tamiz No 200 (0.075mm).

- Limos y Arcillas: tamaños menores de 0.075mm.

Nomenclatura de suelos en base al sistema de clasificación de suelos SUCS ASTM

2487-00.

Este sistema expuesto por Arturo Casagrande como una modificación y adaptación más general a su propio sistema de clasificación propuesto en el año 1942, esta clasificación expone:

- Suelos de grano grueso.
- Suelos de grano fino.
- Suelos orgánicos.

Los suelos de granos grueso y fino resultan del tamizado del material por el tamiz No.200.

Los suelos gruesos corresponden al material retenido en dicho tamiz y los finos a los que lo pasan, por lo anterior se estima que un suelo es grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en el tamiz No. 200, y fino si más del 50% de sus partículas son menores que dicho tamiz. (Hernández L, Ramírez R., & Zelaya A, 2016).

Tabla 5. Tipos de suelo

Tipo de suelo	Prefijo según SUCS
Grava	G
Arena	S
Limo	M
Arcilla	C
Orgánico	O

Fuente: (Rodríguez, 2005)

Parámetros de estado del suelo.

(Hernández L, Ramírez R., & Zelaya A, 2016) : Se refiere a las características que están directamente relacionadas con las condiciones ambientales del suelo, por lo anterior se plantean métodos con rangos de valores que exponen un comportamiento particular para cada suelo.

Estos son:

Resistencia mecánica.

El contenido de agua es un parámetro relevante pues afectan la capacidad de resistir en presencia de cargas externas y mantenerse estable, existe un rango de humedades aceptables, cuando son excesivas, se identifican con hundimientos, grietas, cambios volumétricos, etc.

Compactación.

Es el resultado de emplear energía a un suelo característico de espacios vacíos generando una mayor densidad y a su vez una mayor capacidad de soporte, estabilidad y otras propiedades geotécnicas del suelo.

Capacidad portante (CBR).

CBR (California Bearing Ratio), con probetas elaboradas, se mide una resistencia al funcionamiento del suelo para según los índices expuestos teóricamente y los datos obtenidos, determinar la capacidad portante del suelo en condiciones de densidad y humedad del suelo; El CBR expone una relación directamente proporcional con la capacidad portante que muestra el suelo.

Razones para estabilizar un suelo.

En este ítem se exponen situaciones cotidianas de posibles casos ingenieriles en los que la se debe aplicar alguna técnica de mejoramiento para aumentar el funcionamiento del suelo.

- Subrasante pobre: representa cambios de volumen y poca capacidad de soporte que genera deformación al aplicar carga.
- Material base con poca calidad.
- Alto potencial de expansión o contracción en los suelos.
- Suelos poco resistentes y pocos permeables.

Tipos de estabilización

Estabilización mecánica.

Es de los tipos de estabilización más antiguo y practico, se aplica un mejoramiento al suelo por medio del cambio de graduación mezclar dos o más suelos naturales que independientes no presentan un alto margen de calidad, el tamaño de partículas es importante pues algunas pueden ser perjudiciales para fines ingenieriles; aunque la estabilización mecánica no logra resultados tan óptimos como los obtenidos por la estabilización química es una metodología utilizada; una de las más relacionadas con este tipo de estabilización es la compactación, el fin principal es aumentar la explanación y disminuir su porosidad y plasticidad, proporcionando rigidez y resistencia en base a las condiciones iniciales del suelo. Cabe resaltar que estos métodos no

involucran las reacciones químicas, todo es en base a proveer un tamaño de partícula apropiado para el uso. Generalmente se usan proporciones de masa entre 10% y 50%.

- Aumentar su capacidad portante
- Disminuir el asentamiento de las estructuras
- Controlar cambios volumétricos indeseables
- Reducir la permeabilidad al agua, y
- Aumentar la estabilidad de los taludes

Finalmente, se puede obtener un material denso y bien calificado con esta técnica, según el tipo de suelo juegan un papel importante; por ejemplo, la adición de una pequeña cantidad de material fino (limo o arcillas) genera una adherencia de los suelos característicos no cohesivos, Por otro lado, partículas granulares, otorgan fricción interna e incompresibilidad a la mezcla generando una estabilidad. (Adams, 2014)

Estabilización química.

(Rivera , Aguirre Guerrero, Mejia de Gutierrez, & Orobio , 2020): Son de los métodos más comunes a desarrollar generando muchos campos de investigación por su bajo costo, fácil adquisición y efectividad, son partículas sueltas que se unen mediante agentes cementantes, ocasionando la mezcla de los mismos la reacción química al inferior del suelo, generando un cambio de plasticidad que; algunos de los materiales son: cemento portland, asfalta cloruro de sólido, ceniza volante, cloruro de calcio y desperdicio de fábrica de papel.

Adicionalmente, se ha demostrado bajo investigaciones que la mezcla de varias materias primas de manera adecuada busca de una reacción favorable al contacto con el suelo, genera un

cambio de propiedades eficiente que aporta aglomeración de partículas para generar los valores teóricos estándar de un suelo con óptimas condiciones de uso.

Es importante identificar el tipo y porcentaje de estabilizante según el tipo de suelo, otros factores relevantes son el costo y las condiciones medioambientales.

Según estudios si se busca modificar solo algunas de sus propiedades, tales como la trabajabilidad, plasticidad o distribución de partículas el porcentaje de aditivo que se maneja es bajo; sin embargo, esta empieza a variar cuando se suman propiedades como resistencia y la durabilidad para aumentar la vida útil en servicio.

Los lineamientos para seleccionar el estabilizador específico, estos se basan en la granulometría del suelo, su plasticidad y textura, por eso existen criterios que permiten predecir la viabilidad del uso, estos son en base a los ensayos de caracterización de un suelo:

- Límites de Atterberg: LL y LP (30 – 40%), IP (10 – 12%)
- CBR: (345 kPa)

Cabe resaltar en este ítem las ventajas y desventajas que se deben tener en cuenta al momento de utilizar una estabilización química.

Ventajas:

- Existencia de una gran variedad de productos en el mercado disponible y desarrollado para mejorar los diferentes tipos de suelo o ciertas propiedades de los mismos.
- Se pueden utilizar prácticamente en casi todas las clases de suelos.

- A nivel técnico se señala la ganancia de resistencia a edades tempranas y el incremento de la durabilidad de los suelos.
- Su composición química tiene una variabilidad aceptable ya que en la mayoría sus procesos de producción están desarrollados y controlados.

Desventajas:

- su impacto ambiental negativo con respecto a su producción e incluso por su costo de fabricación.
- El uso de cementantes a base de calcio es su poca efectividad en suelos con contenidos altos de materia orgánica ya que se afectan las reacciones de hidratación y reacciones puzolánicas necesarias para que el suelo estabilizado alcance la resistencia mecánica apropiada.

Como solución a estas desventajas se ha implementado la investigación para la búsqueda de innovadoras tecnologías para aplicaciones geotécnicas que logren mitigar las emisiones de CO₂.

Estabilización físico-química.

(Adams, 2014): Es una tecnología no tan antigua, se desarrolló en base a las existentes y plantea ciertos campos de investigación, su mayor aplicación se da a los polímeros, tienen bajo costo y fácil preparación, estos se adhieren a los granos de suelo disminuyendo la permeabilidad para de forma inversa aumentar la resistencia.

Esta tecnología muestra una serie de consideraciones antes de ser utilizados:

- El polímero debe ser adhesivo a las partículas del suelo en presencia de agua.
- La cohesión interna del polímero es clave.
- Capacidad de trabajo a alta humedad y bajas temperaturas ambientales.
- Miscibilidad con agua para producir un líquido de baja viscosidad.

Técnica de mejoramiento con grano de caucho

Fibras de caucho de llanta a suelo ML.

El suelo ML se caracteriza por pertenecer a la familia de las arcillas limosas con baja compresibilidad, según carta de plasticidad; también este suelo encontrado presenta un alto contenido de illita con caolinita. (Rondon & Torrado Gómez , 2020)

Como información relevante del material las propiedades geotécnicas de caracterización se exponen en la tabla 6.

Tabla 6. Caracterización del suelo

Propiedades	Valores
Gravedad específica	2.69
Tamaños de grano (%)	
-Grava	0.0
-Arena	7.8
-Limo	31.5
-Arcilla	60.7
Límite líquido (%)	34.2
Límite plástico (%)	24.8
Índice plasticidad (%)	9.4
Tipo de suelo	CI
Peso unitario seco máximo (kN/m ³)	16.35
Contenido de humedad óptima (%)	20.89

Fuente: (Das, 2001)

Descripción (Yadav & Tiwari, 2017).

Las fibras de caucho fueron el resultado de un proceso de molienda al que se somete el neumático que es considerado desecho, estas fibras con dimensiones comunes de 2 – 3 mm ancho y 15 mm largo máximo (Ver figura 2.).

Figura 2. Fibras de caucho



Fuente: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131717303411>

En la nueva composición de las fibras de caucho resultantes del proceso de molienda se observa un alto contenido de carbono y se describen propiedades como durabilidad, capacidad, flexibilidad y resistencia al someterse a fricción.

Como dato inicial se tiene que la fibra de caucho es aplicada en porcentajes de hasta un 10% máximo, en rangos de 2.5%, en busca de una predicción más cercana del comportamiento del material modificado, este valor es en relación a la masa de material.

Cabe resaltar que durante la investigación se demostró que las muestras con contenido mayor al 10% no exponen ningún cambio favorable, por el contrario, se desintegra.

Parámetros evaluados (Yadav & Tiwari, 2017).

- Compactación

En el peso unitario seco máximo se observa una disminución en presencia del aditivo; donde se tiene un valor inicial de la arcilla de 16.35 kN/m^3 y se lleva a 14.78 kN/m^3 con la adición del

10%; similar, el contenido de humedad óptimo que se reduce de un 20.89% a 18.25% con el mismo porcentaje de adición.

Lo anterior puede presentarse por la poca capacidad de absorción del aditivo y la reacción elástica de las fibras de caucho que efectúan una relación inversamente proporcional con el factor compactación.

- Resistencia a la compresión incofinada

Para este parámetro se observa una interacción favorable del aditivo con el material a un porcentaje de 2.5% que refleja un aumento considerable de 60.59 kPa a 62.69 kPa, el aumento de aditivo refleja el efecto inverso proporcionando hasta un 22% de pérdida de la tensión axial.

Estos resultados pueden darse por la interacción entre las fibras que mejoran la ductilidad de la arcilla y el alto porcentaje genera una acumulación que no permite una interacción apropiada.

- CBR

Para el CBR el aditivo genera un aumento considerable en un porcentaje de 2.5% ocasiona una mejora en esta propiedad de hasta un 38%; se repite el escenario en que la inclusión mayor al 5% de aditivo ocasiona una desmejora de las propiedades.

- Presión de hinchazón

Esta considerable característica de los suelos arcillosos, muestra una mejoría aceptable a todos los porcentajes de adición; lo expresa en una relación inversamente proporcional, donde a mayor adición menor es la presión de hinchamiento del material, su característica es el efecto contra la tensión de tracción evitando el movimiento de las partículas de arcilla y haciendo un camino de drenaje que disipa los poros de agua.

Pedazos de llanta sin tratamiento a suelo SP.

Este tipo de suelo pertenece al grupo de arenas mal gradadas, sus principales características son la buena manejabilidad, ausencia de filtración de agua y cambios volumétricos del suelo; lo que lo ubica en el grupo de suelos con probabilidad de colapso. (Serrano Guzman , Pérez Ruiz, Torrado Gómez , & Sandoval Posso, 2018)

Como información relevante del material las propiedades geotécnicas de caracterización se exponen en la tabla 7.

Tabla 7. Caracterización del suelo

Propiedades del suelo	Valor
Contenido agua (OMC) (%)	4.9
Gravedad específica	2.75
Límite líquido (%)	26
Límite plasticidad (%)	N. P
Índice de plasticidad (%)	-----
Densidad seca máxima (MMD) (g/cm ³)	1.44
Contenido yeso (%)	41.24

Fuente: (Rodríguez, 2005)

Descripción (Snodi & Hussein, 2019).

El material aplicado es un desperdicio de caucho de llanta para bicicletas sin ningún tratamiento posterior, cortado manualmente con tijeras con cuadrados de 1cm² de área y 3 mm de espesor (valores aproximados) (Ver figura 3.).

Figura 3. Pedazos de caucho de llanta



Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Tires-Rubber-Waste_fig1_335198189

El análisis se plantea con adiciones en un rango de 2% y con un máximo de 8% de aditivo para buscar la estabilización del suelo en estudio en propiedades como corte directo y compactación, descritas por ángulos de fricción, densidad y contenido de humedad del material.

Parámetros evaluados (Snodi & Hussein, 2019).

- Corte directo

El corte directo se expresa mediante parámetros de cohesión y ángulo de fricción del material, los valores iniciales (3.1 N/mm^2 y 28.9°) respectivamente. Los cuales sufrieron cambios positivos con los diferentes porcentajes de adición, a mayor porcentaje de adición mayor cohesión y ángulo de fricción, alcanzando valores de 4.8 N/mm^2 y 47.8° .

Cabe resaltar que a nivel de cohesión no se expone un cambio significativo dentro del rango aceptable, mientras que el ángulo de fricción si logro llegar al rango aceptable para un suelo estable, este comportamiento puede explicarse por el aumento que ocasiona el aditivo a nivel de fricción.

- Compactación

A nivel de compactación el parámetro de densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad del material se ve afectado de manera inversa inverso al suministrar el aditivo en los respectivos porcentajes; cabe resaltar que la comparación de comportamiento del material modificado y el natural muestran un comportamiento lineal y no considerable para la aplicación del aditivo, así que no es relevante nombrar un porcentaje óptimo de adición, esta puede variar según los usos a los que restringe el suelo.

Caucho en fragmentos y miga a suelo CH

La muestra habla de un suelo arcilloso inorgánico con alta compresibilidad y plasticidad, según características teóricas son suelos con subrasante muy pobre que traduce la baja capacidad de soporte. (Rondon & Torrado Gómez , 2020).

Como información relevante del material las propiedades geotécnicas de caracterización se exponen en la tabla 8.

Tabla 8. Caracterización del suelo

Propiedades del suelo	Valor
Limite liquido (%)	64
Limite plasticidad (%)	32
Índice de plasticidad (%)	32
Tipo de suelo	CH
Densidad seca máxima (g/cm ³)	1.551
Contenido optimo humedad (%)	25.72

Fuente: (Rodriguez, 2005)

Descripción

- Fragmentos de caucho

Residuo de llanta obtenido de la zona industrial sin pasar por ningún proceso de molienda o tratamiento, con un mayor peso y resistencia en comparación a los que pasan por un proceso de pulverización y purificación, el único proceso que experimenta es un tamizado por la malla $\frac{3}{4}$ (Ver figura 4.).

La dosificación establecida es 0%, 2%, 5%, 10% y 15% en relación a la masa de la muestra de suelo. (Patiño Ycaza, 2017).

Figura 4. Fragmentos de llanta



Fuente: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/9159>

- Miga de caucho

El material se obtiene de un proceso mecánico con un esmeril, donde se obtienen partículas de caucho que se someten al tamiz #10 para retener impurezas como fibras de tela y alambre (Ver figura 5.).

Figura 5. Miga de caucho de llanta



Fuente: <https://www.indiamart.com/proddetail/scrap-tyre-crumb-rubber-15557185448.html>

La dosificación propuesta está en un rango de 2% con porcentajes de 1% a 9% como máxima adición, esta se hace en relación a masa de suelo contemplada para cada muestra. (Díaz Suárez & Torres Frias, 2019).

Parámetros evaluados

- Compactación

EL ensayo de proctor expone una relación inversamente proporcional con la densidad seca máxima, mientras, que el contenido óptimo de humedad, presenta una variación donde el mayor se logra con el 3% de aditivo, esto en base a los datos de suelo natural (1.551 g/cm^3 y 25.72%), siendo un parámetro directamente influyente en la capacidad de soporte del suelo que se expresa por medio de los datos de CBR.

- CBR

Miga de caucho: En esta propiedad se puede observar un incremento con el aumento de aditivo, pero esto hasta un porcentaje máximo de 7%, después de esto se observa que el resultado se alinea con los valores de la muestra natural y pueden ser perjudiciales para la capacidad de

soporte del suelo, cabe resaltar que el contenido óptimo de aditivo es del 3%, donde se refleja que el CBR aumenta hasta un 5% al valor inicial. (Díaz Suárez & Torres Frias, 2019).

Fragmentos de llanta: Para este parámetro los fragmentos de llanta ocasionan un cambio sustancial y positivo desde el mínimo de adición que es el 2% aumentando la capacidad de soporte del suelo en un 33.02%; cabe resaltar que hay un porcentaje óptimo de adición que es el 10% donde se mejora la capacidad de soporte hasta un 120% de la muestra inalterada, lo que indica que este desecho industrial sin tratamiento funciona como buen estabilizador de este tipo de arcilla.

Todo esto se refleja mediante variables influyentes que modifican la naturaleza del material y se refleja en los parámetros considerables al momento de evaluar la viabilidad del uso de suelo. (Patiño Ycaza, 2017).

Grano de caucho a suelo CL

El suelo muestra se caracteriza por su baja plasticidad y compresibilidad con presencia de gravas y arenas e impermeable. (Rondon & Torrado Gómez , 2020)

Como información relevante del material las propiedades geotécnicas de caracterización se exponen en la tabla 9.

Tabla 9. Caracterización del suelo

Propiedades Físicas	Valores
Contenido de humedad (%)	35.22
Peso específico mínimo (g/cm ³)	1.27
Peso específico máximo (g/cm ³)	2.20
Relación de vacíos	0.94
Porosidad (%)	48.54
Límite líquido (%)	47.91
Límite plástico (%)	22.26
Índice de plasticidad (%)	25.65
Tipo de suelo SUCS	CL

Fuente: (Das, 2001)

Descripción (Llerena Castillo & Paredes Chura, 2019)

Un acumulado de residuos en la industria de neumáticos, que bajo una trituración mecánica se llevan a una granulometría requerida (retenido en tamiz #10) y se aplica a la arcilla en relación al peso de la muestra en porcentajes de 2% al 10%, y rango de 2% aplicación entre muestras, esto garantizando la compatibilidad y mayor homogeneidad de la mezcla (Ver figura 6.).

Figura 6. Grano de caucho de llanta



Fuente: <https://casaguzman.com.ec/categoria-producto/pisos/caucho-granulado/>

Parámetros evaluados (Llerena Castillo & Paredes Chura, 2019)

- Propiedades físicas y densimétricas

En el peso específico se observa una relación inversamente proporcional en base al dato inicial de la arcilla sin aditivo (1.91 g/cm^3), llegando a un valor de 1.76 g/cm^3 con la máxima adición de grano de caucho; cabe resaltar que la gravedad específica y la porosidad del material también presentan una disminución gradual que expresa una buena interacción de partículas y el refuerzo que ofrece el material aditivo a las propiedades de la arcilla efectuando un comportamiento favorable del suelo al ser modificado.

Considerar un porcentaje óptimo para este parámetro no suele ser acertado, pues depende de un balance de proporción en base al resto de ensayos realizados.

- Compactación

Las variables considerables en este parámetro evaluador que son la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad del material en estado compacto y en la menor presencia de vacíos, presenta una relación inversamente proporcional al adicionar el grano de caucho (1.592 g/cm^3 y 17.12%) son los valores a los que se llega con la máxima adición.

- Corte directo

Para este parámetro se observa una relación directamente proporcional con respecto al porcentaje de adición pues en todos los escenarios resulta favorable el aumento de del ángulo de fricción.

- Consolidación

El coeficiente de consolidación inicial ($13.89 \text{ m}^2/\text{año}$) supera el máximo estipulado para un suelo con capacidad de soporte aceptable ($1 - 10 \text{ m}^2/\text{año}$), con la adición de caucho se presenta una varianza que no permite establecer una dirección de proporcionalidad entre el suelo y el aditivo, pero si permite contemplar el 4% de caucho como porcentaje óptimo para estabilizar el coeficiente de consolidación mejorando la capacidad portante del suelo (0.49 kg/cm^2) obteniendo un qadmisible de 2.14 kg/cm^2 .

Grano de caucho a suelo GC

Un material extraído de una cantera ubicada en una zona determinada que se nombra grava arcillosa, presenta en su gradación porcentaje de arena, arcilla y grava altamente compresible e impermeable. (Rondon & Torrado Gómez , 2020).

Como información relevante del material las propiedades geotécnicas de caracterización se exponen en la tabla 10.

Tabla 10. Caracterización del suelo

Propiedades	Valores
Grava (%)	55.6
Arena fina (%)	30.6
Finos (%)	13.8
Limite liquido (%)	31
Limite plasticidad (%)	15
Índice plasticidad (%)	16

Fuente: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/9159>

Descripción

El residuo de llanta se somete a un proceso de molienda simple, algunas partículas pueden someterse de manera repetida al mismo proceso, también un proceso de tamizado de dos diámetros diferentes, para asegurar que las impurezas sean retiradas, finalmente, depositado en un tambor magnético para extraer los pequeños alambres de acero; el tamaño de las partículas para esta aplicación es 1 – 4 mm (Ver figura 7.).

La dosificación establecida es 0%, 1%, 2%, 3%, 5%, 10% y 15% en relación a la masa de la muestra de suelo. (Patiño Ycaza, 2017).

Figura 7. Grano de caucho



Fuente: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/9159>

Parámetros evaluados (Patiño Ycaza, 2017)

- CBR

Dirección inversamente proporcional, al aumentar el porcentaje de aditivo la densidad del material modificado disminuye, cabe resaltar que al hablar de los porcentajes más altos de aditivo como el 5%, 10% y 15% se observa cambio de densidad considerable; pues, disminuye

más de un 60% del valor inicial, lo que puede terminar siendo contradictorio al plan establecido inicialmente para mejorar las condiciones.

Cabe resaltar que el suelo y el material de adición son altamente impermeables, esto genera una retención de agua mayor al 40% lo que afecta la resistencia de manera relevante, pronosticando una interacción no viable para este tipo de suelo; se debe llevar a muestra a una condición de humedad de inmersión para poder estabilizar la muestra y que el cambio sea favorable. Como porcentaje aceptable de adición está el 2%, esto no quiere decir que sea necesario usarlo para obtener mejores resultados.

Caucho triturado a suelo MH

El suelo MH pertenece al grupo de los limos orgánicos elásticos, característicos por su alta compresibilidad, bastante impermeable, y cambios volumétricos considerables, representados en asentamientos. (Rondon & Torrado Gómez , 2020).

Como información relevante del material las propiedades geotécnicas de caracterización se exponen en la tabla 11.

Tabla 11. Caracterización del suelo.

Propiedades	Valores
Contenido de humedad (%)	64.49
Gravedad específica	2.25
Límite líquido (%)	60.60
Límite de plástico (%)	52.02
Índice de plasticidad (%)	8.58
Tipo de suelo según SUCS	MH

Fuente: (Das, 2001)

Descripción (Yusoff, Nik Daud, & Muhammed, 2015).

El material para este estudio se obtiene por medio de proceso de trituración hasta obtener partículas entre 1 – 5 mm y retirando impurezas como acero y fibras de nailon, la gravedad específica de estos neumáticos después del proceso de triturado oscila entre 0.90 – 1.12.

Los porcentajes aplicados son de 10%, 20% y 30%, (Ver figura 8).

Figura 8. Residuo de llanta.



Fuente: <https://pdfs.semanticscholar.org/04dc/df96dd869a21f8a397f26c2591e860cb3e8f.pdf>

Parámetros evaluados (Yusoff, Nik Daud, & Muhammed, 2015).

- Caracterización

Con la adición de residuo de llanta se observa que los límites aumentan con la adición del 20% máximo, mientras que la adición del 30% ocasiona un efecto contrario, que predice un regreso a las condiciones iniciales, con esto el índice de plasticidad empieza en aumento con el 10% de adición y decrece hasta un 10.65% con el 30% de adición; los valores tan variados pueden deberse al rango tan lejano entre los porcentajes que no permite hacer una predicción confiable de caracterización.

- Compactación

Mediante el ensayo con proctor estándar se evalúan las variables de densidad máxima y contenido óptimo de humedad que muestran una variedad de valores entre los tres porcentajes, que no permiten establecer una relación de proporcionalidad, cabe resaltar que para el contenido óptimo de humedad el mayor valor se presenta con el 30% de adición y la densidad máxima seca disminuye hasta 1.01 g/cm^2 con el mismo porcentaje.

- CBR

El parámetro de CBR que expresa la capacidad portante del suelo, refleja una mejora altamente considerable respecto a la inicial con la adición del 10%, partiendo de un CBR de 17.2% llegando a un 24.6%.

- Resistencia al corte

Las variables considerables en este ensayo son la cohesión y el ángulo de fricción, la cohesión refleja una relación directamente proporcional con respecto al porcentaje de adición, de un valor

inicial de 15 kN/m llega hasta 21.3 kN/m con el máximo de adición, y el ángulo de fricción disminuye considerablemente hasta 12°, lo que no es favorable para este parámetro evaluador.

El presente estudio refleja en los resultados que es necesario profundizar el tema de investigación, redireccionando este en los porcentajes en rangos más cercanos o en el tratamiento del material, debido a que el planteado no establece una viabilidad demostrable para su aplicación.

Técnica de mejoramiento con residuo de vidrio

Triturado y polvo de vidrio residual a suelo CH.

Este tipo de suelo, pertenece a la familia de las arcillas, característico por sus altos valores de IP, poco manejables, muy expansivos e impermeables, que se reflejan en cambios volumétricos considerables. (Rondon & Torrado Gómez , 2020)

Como información relevante del material las propiedades geotécnicas de caracterización se exponen en la tabla 12.

Tabla 12. Caracterización del suelo.

Propiedades	Valores
Grava (%)	0.5
Arena (%)	8.7
Finos (%)	90.8
Tipo de suelo (AASHTO)	A-7-6
Limite liquido (%)	51
Limite plasticidad (%)	25
Índice plasticidad (%)	26
Humedad (%)	3.7
Humedad óptima (%)	21.5
Tipo de suelo según SUCS	CH

Fuente: (Das, 2001)

Descripción

- Vidrio triturado

Residuo de vidrio previamente sometido a limpieza, para garantizar que sea 100% vidrio, pasa por un proceso de secado y aplastamiento; para la trituración del mismo se utilizó la máquina de los ángeles, esto hasta obtener un tamaño de partícula similar a los finos pero no uniforme, con el fin de cubrir una gama variable de tamaño de partículas para una mejor interacción entre partículas (Ver figura 9.).

Se aplica una dosificación variante en relación con el peso de la muestra, con el 2% como valor inicial, variando hasta un máximo de 10%. (Lingwanda, 2018).

Figura 9. Triturado de vidrio.



Fuente: <https://doi.org/10.15623/ijret.2018.0704005>

La gama de tamaños de partículas representativa del triturado de vidrio se puede observar en la tabla 13.

Tabla 13. Tamaño de partículas aditivo.

Cantidades	Valores (%)
Grava	23.6
Arena	36.4
Finos	40.0

Fuente: <https://doi.org/10.15623/ijret.2018.0704005>

- Polvo de vidrio

Recolección de residuo en las fábricas de vidrio, elementos como envases, cristales de ventana, sin utilidad, se somete a un proceso de trituración hasta obtener partículas menores a 0.075mm.

Las proporciones de polvo de vidrio aplicadas son 2%, 4%, 6%, 8%,10%. (Benny, Jolly K, Juny Mareena , & Thomas, 2017).

Figura 10. Polvo de vidrio



Fuente: <https://www.ijert.org/>

Parámetros evaluados

Se realiza la aplicación de diferentes porcentajes a criterio propio en busca de un contenido óptimo de triturado de vidrio, esto en base a los parámetros establecidos por manuales y normas correspondientes para subrasante de pavimento, que exponen que el IP máximo es 25% y que el CBR mínimo es 15%, para garantizar condiciones de suelo aceptables.

- Límites de Atterberg

Triturado: Por lo anterior, al adicionar el 10% de triturado de vidrio se garantiza la estabilización del suelo, modificando su caracterización favorablemente; se detecta una disminución de hasta 46%, para llegar a un IP de 14% que cumple claramente según los parámetros estipulados para un suelo apto. (Lingwanda, 2018)

- Compactación

Triturado: El proceso de compactación, también parámetro importante para identificar la capacidad portante de un suelo, mediante contenido de humedad óptima y densidad seca máxima, con el porcentaje óptimo del 10% de adición.

La densidad seca máxima presenta una relación directamente proporcional, alcanza un 16% de incremento en base al valor inicial (1425 kg/m^3).

El contenido de humedad óptimo, se ve afectado de manera inversamente proporcional, se observa una disminución de un 28% en base al valor inicial de 21.5%. (Lingwanda, 2018).

Polvo: Las variables relevantes e indicadoras para la compactación que expresa la densificación del nuevo suelo, se expresa por la densidad seca máxima y el contenido de óptimo de humedad; donde se observa que la adición de material aumenta la densidad del suelo mientras disminuye el contenido óptimo de humedad, adicionalmente el efecto favorable del aditivo se refleja hasta un máximo de 6%. (Benny, Jolly K, Juny Mareena , & Thomas, 2017)

- CBR

Triturado: El valor de CBR para el suelo natural (4%), expone una relación directamente proporcional con la adición de vidrio triturado, el 10% alcanza hasta un 16% de CBR, a nivel de contracción del suelo se disminuye hasta un 8.6% del valor inicial; lo anterior, garantizando el aumento considerable de la resistencia y capacidad portante del suelo original. (Lingwanda, 2018).

Polvo: Respecto al CBR se observa una relación directamente proporcional al adicionar el polvo de vidrio, se logra un CBR de hasta 12.8% como máximo valor con la adición de 6%, partiendo de un CBR de 3% al suelo natural.

Adicionar más de 6% provoca un efecto de reducción de este parámetro lo que permite predecir que el uso desmedido puede ocasionar un efecto contrario a la estabilidad y capacidad de soporte del suelo. (Benny, Jolly K, Juny Mareena , & Thomas, 2017).

- Corte directo

Polvo: Este parámetro está relacionado y se mide con las variables de cohesión y ángulo de fricción, representa el punto de falla del suelo, se lleva a su capacidad máxima mediante aplicación de cargas, para este aditivo se observa que la relación con las dos variables mencionadas es directamente proporcional hasta su máximo de adición del 10%, donde sigue representando mejoría.

Cabe resaltar que este parámetro debe ser relacionado con los demás para poder dar un valor óptimo de adición, debido a que su adición no muestra límites contradicciones o en base a la cantidad, situación que si se presenta en otros de los parámetros. (Benny, Jolly K, Juny Mareena , & Thomas, 2017).

Vidrio residual de molino a suelo MH.

El suelo MH pertenece a los limos inorgánicos, altamente plásticos, impermeables, con buena manejabilidad, su límite líquido alto e índice de plasticidad modelado, características propias de suelos expansivos.

Como información relevante del material las propiedades geotécnicas de caracterización se exponen en la tabla 14.

Tabla 14. Caracterización del suelo

Propiedades	Valores
Arena (%)	3.18
Arcilla (%)	72.95
Limo (%)	23.87
Limite liquido (%)	80.27
Limite plasticidad (%)	40.29
Índice plasticidad (%)	39.98
Humedad óptima (%)	33.8
Peso específico seco (kN/m ³)	15.0
Tipo de suelo (SUCS)	MH

Fuente: (Rodríguez, 2005)

Descripción (Neves de Castro, y otros, 2019)

- Molino de bolas

Vidrio obtenido de la industria de botellas de refresco, se someten a un proceso de limpieza y desinfección, se secan a temperatura ambiente, se depositan en un molino de bolas que opera a 3500 ciclos con 12 bolas, se tamiza para recolectar el retenido en el tamiz N°40, se utiliza un solo porcentaje de adición del 5% (Ver figura 11.).

Figura 11. Vidrio de molino de bolas.



Fuente: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762019000200316

- Molino de alta energía

Se trabaja con el pasante por el proceso de tamizado (N°40), se lleva a un molino de alta energía, modelo SPEX sample prep 800M, donde se somete a un proceso de triturado por 15 minutos, se utiliza un solo porcentaje de adición del 5% (Ver figura 12.).

Figura 12. Vidrio de molino de alta energía.



Fuente: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762019000200316

Parámetros evaluados

- Caracterización

En base a las condiciones iniciales con altos valores del respectivo parámetro que expone un suelo altamente plástico, se proporcionó una estabilización de estas variables a con una reducción en presencia del aditivo; cabe resaltar que el vidrio triturado en el molino de alta energía, en su misma proporción provoco la mayor reducción de dichas variables.

La adición del vidrio en sus diferentes tratamientos no ocasiono ningún cambio de la granulometría del material. (Neves de Castro, y otros, 2019)

- Compactación

Nuevamente se evalúan los dos métodos de tratamiento para el aditivo, con un porcentaje del 5%, viable mas no optimo, debido a que no se tienen datos comparativos que nos permiten saber que ocurre al aumento o reducción de ese valor estándar.

Se detecta un aumento de la densidad seca máxima y una reducción del contenido óptimo de humedad del material, siendo el aditivo resultante del molino de alta energía el que refleja una mayor viabilidad.

Son considerables los beneficios en la densificación del suelo que otorga una mayor resistencia y capacidad de soporte. (Neves de Castro, y otros, 2019)

- CBR

Para este parámetro el polvo de vidrio residual actúa como potenciador; porque refleja una relación directamente proporcional de aumento a la capacidad portante del suelo, esto con porcentajes de máximo 6%, una adición mayor genera cambios no justificables al suelo.

Cabe resaltar que el polvo de vidrio residual provoca una fricción interna de materiales, la cual se ve afectada en escenarios de estado saturado, donde la interacción entre partículas pierde

su eficacia, provocando que la mejoría de este parámetro no sea notoria. (Parihar, Garlapati, & Ganguly, 2018).

Polvo de vidrio residual a suelo CL

Suelo que pertenece a la familia de las arcillas inorgánicas, se caracteriza por su media – baja plasticidad, es poco compresible, impermeable y poco manejable. (Rondon & Torrado Gómez , 2020).

Las propiedades geotécnicas del suelo expansivo se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Caracterización del suelo

Propiedad	Valor
Arena	21%
Limo + Arcilla	79%
Gravedad específica	2,64
Límite líquido (LL)	49,52%
Límite de plástico (PL)	28%
Índice de plasticidad (PI)	21,52%
Contenido óptimo de humedad (OMC)	17,53%
Densidad seca máxima (MDD)	1,83 (g / cm ³)

Fuente: <https://www.researchgate.net/publication/340967394>

Descripción

De una planta de procesamiento de vidrio se recaudó gran cantidad de vasos usados, los cuales se desinfectaron mediante un lavado y secado a temperatura ambiente, se sometieron a un proceso de pulverización manual, con la ayuda de un martillo, finalmente se realizó el proceso de tamizado, tomando como material aditivo el material que paso el tamiz N°200.

Este aditivo se utilizó en varias proporciones como 2%, 4%, 6%, 8% y 10% en relación con el peso seco del material. (Ver figura 13.). (Javed & Chakraborty, 2020).

Figura 13. Polvo de vidrio



Fuente: <http://www.silminiberica.com/vidrio-granular-y-polvo-de-vidrio.html>

Parámetros evaluados (Javed & Chakraborty, 2020)

- Límites de Atterberg

Para este parámetro se observa una relación inversamente proporcional al adicionar mayor cantidad del agente estabilizador, con valores iniciales como 49,52% y 28%, se logra una reducción a 33,9% y 18,4% para el LL e IP respectivamente, cambio positivo para la estabilización que se debe al cambio de respuestas del suelo como la retención de agua, compresibilidad e hinchamiento del suelo, esto se da por su nueva caracterización.

- Compactación

Las variables considerables de densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad, hace referencia a una viabilidad del uso de aditivo, con un 8% de adición se logra estabilizar el suelo mediante el aumento de la densidad desde $1,83 \text{ g / cm}^3$ a $2,03 \text{ g / cm}^3$, y un decrecimiento de

contenido de humedad óptimo de 17,53% a 10,5%, esto se explica por el comportamiento en presencia del aditivo que disminuye la presencia de poros de agua.

Cabe resaltar que, para la densidad seca máxima, el porcentaje de 10% de aditivo no ocasiona ningún cambio relevante a esta variable.

- CBR

Las condiciones iniciales del suelo, exponen una capacidad portante del suelo muy baja, el proceso de adición paulatina muestra una relación directamente proporcional hasta su máximo planteado del 10%, se logra un 22.5% valor de CBR, re direccionando el suelo a una utilidad determinada; Puede darse por un mecanismo de transferencia de cizallamiento entre el suelo y el polvo de vidrio que otorga resistencia.

- Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se evalúa llevando la muestra a su capacidad máxima hasta fallar, parámetro que para esta condición de suelo con vidrio aumenta proporcionalmente, esto resultado positivo se observa hasta un máximo de 8% de adición, partiendo de un valor inicial de 63.2 kN/m² a 133.5 kN/m²; Superar el 8% de adición ocasiona una reducción considerable del parámetro, lo que resulta contradictorio para un suelo viable. Esto puede presentarse por el trabajo que hace el polvo de vidrio, trabajando como ligante con arcillas después de la hidratación para mejorar los lazos de cohesión, pero hasta un punto determinado.

- Prueba de corte directo

Se determina una relación directamente proporcional con el aumento de polvo de vidrio, relación que influencia favorablemente las variables de cohesión y ángulo de fricción en todas las proporciones aplicadas.

Con valores iniciales de cohesión y ángulo de fricción 42.7 kN/m^2 y 27.4° respectivamente, se lleva a un aumento a 106.4 kN/m^2 y 43.5° . Considerando que existen otros parámetros igual de influyentes el porcentaje óptimo de aplicación seleccionado es del 8% para reflejar una estabilidad viable en el comportamiento del suelo modificado.

Polvo de vidrio residual a suelo CL-ML

Este tipo de suelo, es un particular y pequeño integrante de las arcillas limosas con contenido de material orgánico, ligeramente plásticos; son suelos impermeables, característicos por su baja manejabilidad y compresibilidad, lo anterior se expresa mediante grandes cambios volumétricos. (Rondon & Torrado Gómez , 2020).

Las propiedades de caracterización del suelo se exponen en la tabla 16.

Tabla 16. Caracterización del suelo

Propiedades	Valores
Limite liquido (%)	34.30
Limite plasticidad (%)	30.158
Indicé plasticidad (%)	4.142
Contenido de humedad (%)	6.38
Contenido de humedad óptimo (%)	8.9
Tipo de suelo (SUCS)	CL-ML

Fuente: (Rodríguez, 2005)

Descripción (Muhammad , Muhammad , & Mateeullah , 2018).

Residuo adquirido de una planta de procesamiento, mediante un proceso de aplastamiento con el Ball Mill, se convirtió en ceniza, posteriormente se sometió a un proceso de tamizado, del que se recolecta el pasa #200 para tener apariencia de finos en el aditivo (Ver figura 14.).

La proporción se maneja en relación al peso de la muestra, se aplica el aditivo en porcentajes de 4%, 8% y 12%, para el análisis de parámetros indicadores.

Figura 14. Polvo de vidrio residual.



Fuente: <https://www.researchgate.net/publication/327978220>

Parámetros evaluados (Muhammad , Muhammad , & Mateeullah , 2018).

- Límites de Atterberg

Se obtiene una relación inversamente proporcional de las variables que componen este parámetro, de un valor inicial de IP de 4.14% se llega a tener un 2.87% con el porcentaje máximo de adición del 12%.

Cabe resaltar que el suelo a nivel de límites y granulometría se muestra un cambio de caracterización, pues pasa a pertenecer al grupo ML.

- Compactación

Las variables características de este parámetro evaluador que son la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad, exponen un comportamiento contradictorio, al aumento de

aditivo se genera aumento de densidad y decrecimiento del contenido óptimo de humedad; llegando en su máximo porcentaje de adición a 2.399 g/cm^3 y 5.5% respectivamente.

- Corte directo

En este parámetro el comportamiento del aditivo al suelo virgen, expone un comportamiento variado, el porcentaje inicial y hasta el 8% generan de inmediato un cambio notorio de aumento al ángulo de fricción y reducción a la cohesión del suelo, pero, el 12% que es el máximo de adición ocasionan un efecto contrario recuperando condiciones muy similares a las iniciales.

Por lo anterior se considera que el porcentaje óptimo de adición para este parámetro es del 8%, valor que debe ser evaluado en base a los resultados de los demás parámetros relevantes.

- CBR

La capacidad portante del suelo se da bajo una relación directamente proporcional con el porcentaje del aditivo, partiendo de un valor inicial de 45.10% hasta un CBR máximo detectado de 59.61%, es un crecimiento paulatino y lineal de este parámetro.

Cabe resaltar que el 12% de adición se identifica como el porcentaje óptimo para esta condición; la cual debe ser evaluada en conjunto con los demás parámetros indicadores que pueden afectar el valor óptimo de adición para garantizar la estabilidad del suelo en estudio.

Cuadro comparativo de las técnicas de mejoramiento en estudio

La tabla 17 expone un cuadro comparativo en base a la información colectada en los numerales anteriores, donde se expone de manera resumida los aspectos que se consideran

relevantes al momento de iniciar una selección de aditivo, este cuadro se realiza con el tipo de suelo como variable independiente debido a que es el elemento que influye entre los dos aditivos.

Cabe resaltar que en este cuadro comparativo se exponen las cuatro principales clasificaciones de suelos arcillosos expuestas en la carta de plasticidad.

Tabla 17. Cuadro comparativo.

Tipo de suelo	Parámetros evaluados	Grano de caucho			Residuo de vidrio		
		Dosificación	% Optimo	Observaciones	Dosificación	% Optimo	Observaciones
ML	Caracterización	--	--	--			Todos los porcentajes de adición presentan una relación inversamente proporcional favorable.
	Compactación			Todos los porcentajes aplicados son favorables.			Todos los porcentajes considerados son favorables llegando a un máximo de 2.399 g/cm ³ y 5.5% en DMS y OCH.
	Compresión	2.5% 5% 7.5%	2.5%	Con un 2.5% se llega a una capacidad máxima de 62.69kPa.	4% 8% 12%	8%	--
	CBR	10%		Con un 2.5% logra un aumento de hasta 38%.			Todos los porcentajes son favorables, de un CBR inicial de 45.10%, se llega a un máximo de 59.61%
	Presión hinchazón			Todos los porcentajes aplicados son favorables.			--
	Corte directo	--	--	--			El máximo porcentaje favorable es del 8%

							con cambio favorable en cohesión y Angulo de fricción, el 12% de adición genera un efecto contrario.
	(Yadav & Tiwari, 2017)			(Muhammad , Muhammad , & Mateullah , 2018)			
MH	Caracterización	10% 20% 30%	10%	Variedad de resultados que no permite dar una relación de proporcionalidad; se obtiene un valor máximo de IP de 12.86% con 10% de adición.	Hasta 6%	5%	Se observa una viabilidad del material obtenido del proceso de triturado en molino de alta energía, que se aplicó en un solo porcentaje de adición el cual refleja el comportamiento favorable de estabilización, con la reducción de plasticidad y OCH, a su vez el aumento de DMS. (1)
	Compactación			Se observa hasta un 25% de contenido óptimo de humedad y una densidad seca máxima de 1.01 g/cm ² con 30% de adición.			Se evalúa bajo la aplicación de polvo de vidrio residual, que expone hasta un 6% de valor con cambios favorables en este parámetro; adicionar más puede generar un efecto contrario. (2)
	CBR			El porcentaje con un CBR aceptable se da con el 10% de adición donde se pasa de un 17.2% a 24.6%.			
	Resistencia al corte			El efecto de la adición para este parámetro es contrario pues no es			---

				favorable, lleva el ángulo de fricción a una reducción de 17° a 12°.			
(Yusoff, Nik Daud, & Muhammed, 2015)				(Neves de Castro, y otros, 2019) (1) (Parihar, Garlapati, & Ganguly, 2018) (2)			
CH	Compactación	1% 3%	3%	3% expone la mayor mejora estabilizadora con DMS 1.55 g/cm ³ y OCH 25.72%.	2% 4% 6% 8% 10%	6%	El 6% de adición arroja los valores máximos para estabilización.
	CBR	5% 7% 9%		Con el 3% presenta el mayor aumento de CBR, hasta un 5% del valor inicial.			Con el 6% de adición aumenta el CBR de 3% a 12,8%; adicionar más puede generar un efecto adverso.
	Corte directo	--	--	--			Todos los porcentajes de adición hasta 10% representan mejora.
(Díaz Suárez & Torres Frias, 2019)				(Benny, Jolly K, Juny Mareena, & Thomas, 2017)			
CL	Caracterización	2% 4% 6%	4%	Relación inversamente proporcional, viable en todos los casos.	2% 4% 6% 8% 10%	8%	Todos los porcentajes practicados presentan una mejora viable con la reducción de LL e IP.
	Compactación	8% 10%		Con 10% adición, se observa la disminución máxima (1.59 g/cm ³ y 17.12%)			El 8% como porcentaje con cambios más favorables en la DMS y OCH, el 10% de adición no ocasiona ningún

							cambio relevante de este parámetro.
	Corte directo			10% adición, se observa aumento considerable de cohesión y ángulo de fricción.			El 8% aumenta la cohesión y ángulo de fricción considerablemente, de 42.7 kN/m ² y 27.4° a 106.4 kN/m ² y 43.5°
	Consolidación			3% adición, mejora la capacidad portante de 0.49 a 2.14 kg/cm ²			----
	CBR	--	--	--			Todos los porcentajes son favorables, con el 10% se logra un CBR máximo de 22.5%
	Compresión	--	--	--			Con el 8% como máxima adición se logra la capacidad máxima, de un valor inicial de 63.2 a 133.5 kN/m ² ; mayor adición genera un efecto contrario.
	(Llerena Castillo & Paredes Chura, 2019)				(Javed & Chakraborty, 2020)		

Fuente: propia

Capítulo 7 Postura Crítica

El punto de partida de un proceso de estabilización de suelos son las condiciones naturales en las que se encuentra el terreno, condiciones que se ven directamente afectadas por un sin número de factores internos y externos que no se pueden controlar, y que pueden ser variantes en el tiempo, todo esto forma un historial que se identifica mediante ensayos de laboratorio, y en apoyo al fundamento teórico existente otorgan una nomenclatura que describe las propiedades características para el comportamiento del material, las cuales se pueden modificar favorablemente para obtener un máximo aprovechamiento.

Por lo anterior; se ha creado un extenso campo de investigación con única finalidad brindar amplias posibilidades de estabilización para los diferentes tipos de suelo, esto se realiza de manera empírica relacionando algunos materiales externos, que son considerados útiles al expresar en sus propiedades técnicas comportamientos admisibles ante esfuerzos de compresión, flexión, tracción y otros que son influyentes proporcionalmente en el comportamiento de la vida útil de la base de todo tipo de estructura civil, el suelo.

Los materiales aplicados en las dos técnicas expuestas en este documento generan gran expectativa, primero por ser un generador de impacto ambiental considerable y por no ser el típico estabilizador químico como cal y cemento.

El crecimiento socioeconómico del mundo genera a diario gran cantidad de elementos que están compuestos por diferentes materiales, pero no todos pueden ser considerados como aditivo para una técnica de estabilización, pues, el punto de partida para predecir la utilidad del material, se da mediante estudios previos donde se identifican las características origen de los

mismos, entre ellas absorción, adherencia, flexibilidad, entre otras; como resultado se obtiene un grupo de materiales estabilizadores que cumplen con los parámetros iniciales de aceptación, y que al profundizarse garantizan resultados en su aplicación y la reducción el margen de error.

El documento aumenta su interés de las técnicas de estabilización planteadas al tener un valor agregado; debido a que el aporte ambiental es bastante considerable, esto debido a que son materiales necesarios para el desarrollo de la sociedad, los cuales se generan en gran cantidad periódicamente; por ende, se contempla que el impacto que ocasionan como desperdicio al no encontrar una vía de reutilización es irreversible y que puede llegar a colapsar.

Certificar y demostrar la garantía de utilización de la técnica genera consigo el aprovechamiento de estos residuos, provocando un balance económico por la reducción de costos y una estabilidad al entorno, siendo una razón de peso para abarcar y profundizar el desarrollo de estas técnicas en su mayor proporción.

Como cierre de esta postura en base a la información consolidada, se detecta un punto de partida, resultado de las investigaciones aquí propuestas, donde la mayoría de casos reflejan cambios favorables en las propiedades descriptoras de la capacidad del suelo, donde ya se tiene una guía que abre un campo de investigación viable para el desarrollo de una técnica de mejoramiento eco sostenible donde el grupo de clasificación del suelo es un parámetro determinante para un desarrollo confiable.

Dicho esto, genera bastante expectativa impulsar la profundización de estas dos técnicas, para encontrar y ratificar los factores influyentes que pronostican una favorabilidad de la aplicación, y finalmente obtener datos verídicos que disminuyan el margen de error e impulsen su aplicación bajo la garantía de beneficio y factibilidad

Capítulo 8 Conclusiones

Para este ítem que abarca la recopilación del trabajo realizado se puede direccionar en dos partes fundamentales:

A nivel investigativo:

- Cumpliendo con el desarrollo de un estado del arte, teniendo un aproximado de diez plataformas entre nacionales e internacionales con información confiable, se realizó la extracción del material componente de la referencia bibliográfica, lo que permite al lector tener un punto de partida para la aplicación provechosa de estas técnicas de mejoramiento.

- Como se planteó inicialmente se expone un cuadro comparativo que, bajo resumen y de la información consolidada anteriormente entrega al lector una perspectiva de las técnicas aplicadas donde se tiene una variable independiente y determinante que es el tipo de suelo, más específicamente los suelos arcillosos, con esto tener un punto inicial de desarrollo para poder profundizar en el ítem de interés.

- Se cumplió con el desarrollo de la metodología propuesta, esto permitió establecer un orden para la elaboración satisfactoria del documento cumpliendo con lo establecido inicialmente.

- Se adquiere conocimiento y claridad sobre el tema principal hasta el punto que llega la investigación, este se refleja mediante la postura crítica donde se abarca el tema desde nuestro punto de vista a la información propuesta.

A nivel práctico e ingenieril:

- Se determina que características como humedad, gradación, aislamiento térmico, resistencia y control volumétrico reflejan una afectación directa al ser involucradas estas técnicas de mejoramiento.

- Para los porcentajes de adición; se detecta, que la cantidad es en proporción a la masa y que la aplicación se da en hasta 20% valor promedio.

En base a los resultados de los ensayos se puede partir de un 2% y hasta un 10% de adición; pues se refleja que aumentar esta cantidad puede provocar un efecto contrario a la estabilización.

- Respecto al tamaño y tratamiento previo del material aditivo, se concluye que es totalmente influyente en el comportamiento del suelo; cabe resaltar que los estudios existentes no permiten entregar una metodología de preparación exacta que garantice resultados favorables.

- Contemplar un rango de porcentajes óptimos entre un 6% a 10% como lo arrojan las investigaciones expuestas en este documento, pues se debe considerar que existen otros factores influyentes que provocan la variación del mismo, entre ellas y la más importante las propiedades del suelo natural.

- De gran importancia, al ser un material residual ayuda a reducir el efecto ambiental, sumado a esto ventajas considerables técnicas y económicas; ya que este material puede

conseguirse en cualquier lugar, en grandes cantidades y sin ningún costo o muy bajo según su tratamiento, lo que es influyente en el costo del proyecto.

- En algunos casos, se identifica que todos los parámetros se ven afectados diversamente con los diferentes porcentajes de adición, lo que obliga a profundizar para poder encontrar un valor promedio que genere favorabilidad en todos los parámetros considerables.

Capítulo 9 Recomendaciones

- El presente documento deja abierto el campo de investigación para con la información existente y de la mano con trabajo de laboratorio profundizar las técnicas para mejorar las aproximaciones planteadas en los parámetros evaluados y promover la aplicación bajo indicadores verídicos y viables.
- Elaborar un análisis comparativo de costos con las técnicas tradicionales y las planteadas en este documento, para detectar la rentabilidad y así sumar motivos para promover la utilización de las mismas.
- Evaluar las diferentes presentaciones de los aditivos, para documentar la influencia de esta condición y encontrar una idoneidad del material como estabilizador en los diferentes tipos de suelo.

Capítulo 10 Referencia Bibliográfica

- Benny, J. R., Jolly K, J., Juny Mareena , S., & Thomas, M. (2017). Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil. *International journal of engineering research y technology* .
- Díaz Suárez, K. J., & Torres Frias, R. M. (2019). *Incorporación de partículas de caucho de neumáticos para mejorar las propiedades mecánicas en suelos arcillosos*. Jaen : Universidad Nacional de Jaen .
- Javed, S. A., & Chakraborty, S. (2020). Effects of Waste Glass Powder on Subgrade Soil Improvement. *World Scientific News*, 30-42.
- Parihar, N. S., Garlapati, V. K., & Ganguly, R. (2018). Stabilization of black cotton soil using waste glass. *Handbook of environmental materials management* , 1 - 16.
- Abas , D. O., Abass, M. O., Abass, R. O., & G., S. (2011). Improvement of soil by waste tires addition . *Eng & tech journal*.
- Adams, T. (04 de Abril de 2014). *Global Road Technology*. Obtenido de <https://globalroadtechnology.com/3-types-of-soil-stabilization-techniques/>
- Bhavani, D. P., & Prasad , D. D. (2017). Stabilization of soil using chemical methods. *International journal of recent trends in engineering & research*.
- Borse , K., Ahirrao, S., & Bagrecha , S. (2013). Eco-friendly pavement blocks of waste glass fly ash and dust. *International Journal of Civil, Structural Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development*, 5-8.
- Carrascal, C. A. (2016). *Viabilidad para la creacion de una empresa de producción y comercialización de granulo de caucho a partir del reciclaje de llantas usada en el area Metropolitana de Bucaramanga* . Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana - Ingenieria Industrial .
- Das, B. M. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. En B. M. Das, *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (págs. 36-44). California: Thomson Learning.
- Dickson, T. H., Dwyer, D. F., & Humphrey, D. N. (2001). Prototype Tire-Shred Embankment Construction. *Journal of the transportation research board*, 160-167.
- Edeskär, T. (2006). *Use of Tyre Shreds in Civil Engineering Applications*. Luleå University of Technology.
- Edincliler, A., Baykal , G., & Saygili, A. (2010). Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction . *Science Direct* , 1073 - 1080.

- Hernández L, J. A., Ramírez R., D. R., & Zelaya A, C. E. (2016). *Propuesta de estabilización de suelos arcillosos para su aplicación en pavimentos rígidos en la facultad multidisciplinaria oriental de la universidad de el salvador* . El salvador : Universidad del Salvador .
- Hidalgo S., C., Martínez F, P., Medel P, E., & Insa F, R. (2015). Characterization of an unbound granular mixture with waste tire rubber for sub ballast layers. *Cross mark* , 3847–3861.
- Huamán Casas, R. D., & Muguerza Zevallos, K. W. (2019). *Influencia del caucho granulado en suelos cohesivos relacionado a la propiedad de la resistencia a la penetración (CBR)*. Universidad Cesar Vallejo.
- Humphrey, D. N., Sandford, T. C., Cribbs, M. M., & Manion , W. P. (1993). Residuos artificiales ligeros para terraplenes sobre suelos blandos . *Registro de investigación de transporte* , 29 - 35.
- Islam , G. M., Rahman , M. H., & Kazi, N. (2017). Waste glass powder as partialreplacement of cement for sustainable concrete practice. *Intenational Journal of sustainable built environment* , 37-44.
- Lingwanda, M. I. (2018). Use of waste glass in improving subgrade soil properties. *International journal of research in engineering and technology* .
- Llerena Castillo, G. A., & Paredes Chura, M. V. (2019). *Reforzamiento de suelo arcilloso con caucho reciclado para fines de cimentación en el distrito de yarabamba en la ciudad de arequipa*. Santa María: Universidad Católica de Santa María.
- Mahmoud Anvari, S., Shooshpasha, I., & Soleimani Kutanei , S. (2017). Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand. *Science Direct* , 936-944.
- Malaver, C. (25 de Septiembre de 2014). Las llantas en desuso, las nuevas invasoras del espacio en Bogotá. *El Tiempo* .
- Mengcheng, L., & Junjun, T. (2016). *Metodo para mejorar la base expansiva del suelo a través de ardealita y polvo de caucho de llantas de desecho* . Universidad de tecnologia de zhejiang.
- Muhammad , S. K., Muhammad , T., & Mateeullah , M. (2018). Effects of Waste Glass Powder on the Geotechnical Properties of Loose Subsoils. *Civil Engineering Journal*, 2044 – 2051.
- Neves de Castro, C. E., Ferreira da Silva, R. R., Fernandes Santos, L., Sales Mendes, A., Lima, C. A., & Alves da Frota, C. (2019). Comportamento mecânico de solo argiloso estabilizado com resíduo de vidro pulverizado em moinho de alta energia e de bolas. *Revista Materia*.
- Patiño Ycaza, J. J. (2017). *Estabilización del suelo mediante adiciones de caucho reciclado*. Guayaquil: Universidad católica de Santiago de guayaquil.

- Pelaez , G. J., Velásquez , S. M., & Giraldo Vásquez, D. H. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 27-50.
- Poveda, R. A., Granja, M. V., Hidalgo , D., & Ávila , C. (2015). Análisis de la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste en adoquines de hormigón tipo A. *Revista politecnica*.
- Ragnhild, G. P. (2016). El estado del arte en la investigación: ¿análisis de los conocimientos acumulados o indagación por nuevos sentidos? *Folios*, 165-179.
- Ramirez, J. C. (2007). *Propuesta del montaje de una fabrica de láminas de vidrio en Riohacha y productos secundarios a partir de vidrio reciclable*. Rioacha: Pontificia Universidad Javeriana - Ingeniería Industrial .
- Rivera , J. F., Aguirre Guerrero, A., Mejia de Gutierrez, R., & Orobio , A. (2020). *Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente*. Informador tecnico.
- Rodriguez, J. B. (2005). Mecanica de suelos tomo I . En J. B. Rodriguez, *Fundamentos de la mecanica de suelos* (págs. 151-166). Limusa - Noriega Editores.
- Rondon , J. A., & Torrado Gómez , L. M. (20 de Octubre de 2020). *Ingeas SAS*. Obtenido de <https://ingeassas.com/docencia/>
- Satyam, K., & Sharma, A. (2018). Soil stabilization using waste tyre strip and glass powder. *Jetir*.
- Serrano Guzman , M. F., Pérez Ruiz, D. D., Torrado Gómez , L. M., & Sandoval Posso, J. D. (2018). Estrategias de reflexión para la enseñanza de movilidad de contaminantes en medio poroso. *Educación en Ingeniería*, 35-41.
- Snodi , L. N., & Hussein, I. S. (2019). Tire rubber waste for improving gypseous. *International conference on civil and environmental engineering technologies* (pág. 584). IOP conference series.
- Whetten , N., Weaver, J., Recker, K., & Humphrey, D. N. (2000). Tire shreds as lightweight fill for construction on weak marine clay. *Proceedings of the international symposium on coastal geotechnical engineering in practice* (págs. 611 - 616). Balkerna : Rotterdam pp.
- Yadav, J. S., & Tiwari, S. K. (2017). Effect of waste rubber fibres on the geotechnical properties of clay stabilized with cement. *Applied Clay Science*, 97-110.
- Young, H. M., Sellaise, K., Zeroka, D., & Sabris, G. (2003). Physical and chemical properties of recycled tire shreds for use in construction. *Journal of Environmental Engineering*, 921-929.
- Yusoff, Z., Nik Daud, N., & Muhammed, A. (2015). *Ground Improvement of Problematic Soft Soils Using Shredded Waste Tyre* . Malaysia: Universiti Putra Malaysia.

