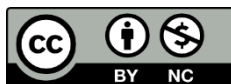


MONOGRAFÍA
REVISION TEÓRICA DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS COMPLEJOS EN
COLOMBIA MEDIANTE EL USO DE MATERIALES RECICLADOS



Por:
Luisa Fernanda Olaya Castro



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2021

MONOGRAFÍA
REVISION TEÓRICA DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS COMPLEJOS EN
COLOMBIA MEDIANTE EL USO DE MATERIALES RECICLADOS



Por:

Luisa Fernanda Olaya Castro

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de
ingeniero civil

Aprobado por:

Ing. Mg. Sergio Enrique Arguello Vera Director

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2021

Autoridades académicas

P. José Gabriel MESA ANGULO, O. P.

Rector General

P. Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. MANUEL EDUARDO HERRERA PABÓN.

Decano Facultad de Ingeniería Civil

La presente revisión teórica la dedico principalmente a Dios por permitirme disfrutar y vivir cada uno de los procesos a lo largo de este camino universitario, de igual manera a mis padres quien han estado en todo momento, por creer en mí, y enseñarme desde su perspectiva la realidad de la vida, por el privilegio de tenerlos juntos y poder compartir con ellos cada uno de los logros que me he propuesto.

Además, agradezco a cada uno de las diferentes personas que han contribuido y colaborado directa e indirectamente en este proceso, en cuando a nivel universitario, profesional y personal, familia, maestros y amigos, sin duda personas claves en este camino. A lo largo de este proceso, fue un momento de constancia, de sacrificio, de emoción y muchas vivencias que hicieron posible el producto final, gracias al director por su acompañamiento, paciencia y apoyo constante, a la facultad quien me preparo profesionalmente para el desempeño de mi vida futura y a la universidad Santo Tomas por sembrar el sentido humanista siendo consiente que antes de ser una gran profesional, es más importante ser una excelente persona.

Tabla de contenido

	Pág.
Glosario	9
Resumen.....	12
Abstract.....	13
Introducción	14
Planteamiento del problema.....	15
Descripción del problema.....	15
Objetivos.....	16
Objetivo general.....	16
Objetivo específico.....	16
Justificación	17
Metodología	18
Marco Referencia.....	20
Marco Conceptual	20
Estado del arte	22
Evaluación de suelos arcillosos con refuerzos de fibras de materiales reciclados.....	22
Comportamiento de los suelos arcillosos	23
Caracterización de suelos arcillosos	24
Conceptos generales	25
Arcillas	25
Sensitividad.....	27
Arcillas expansivas.....	28
Actividad de los minerales arcillosos	30
Capacidad de Absorción	30
Factores que afectan a las arcillas, la plasticidad y sus limites.....	31
Aplicación de materiales reciclables en suelos arcillosos	32
Drenaje	38
Impermeabilizante	38
Normograma para la implementación de un geotextil.....	38
Resultados e impactos.....	43

Impactos	46
Impacto ambiental	46
Impacto institucional.....	46
Conclusiones	47
Recomendaciones	49
Referencias.....	50

Lista de Figuras

Figura 1 Muestra de Diferentes Arcillas.....	25
Figura 2 Grupos de Arcillas	26
Figura 3 Estructura de arcillas	26
Figura 4 Métodos para evitar la Expansión en suelos	30
Figura 5 Beneficios de agregados reciclables	33
Figura 6 Tasa de incremento con 5 cm y 3 cm	35
Figura 7 Comparación de CBR	36
Figura 8 Clasificación de Geotextiles	37
Figura 9 Funciones del Geotextil	38
Figura 10 Caracterización de lodo aceitoso.....	42

Lista de tablas

Tabla 1. Metodología	18
Tabla 2. Tamaño de partículas de las arcillas.	27
Tabla 3. Factores que Afectan a los suelos arcillosos	31
Tabla 4. Contexto Normativo	32
Tabla 5. Normograma de Geotextiles	38
Tabla 6. Resultados	45

Glosario

Arcillas

Es un tipo de suelo que al contacto con el agua o algún fluido se vuelve plástico y al perder humedad se endurece de manera considerable, este tipo está conformado por las partículas más finas del suelo principales con diámetros inferiores a 0.005 mm. Estos suelos en su mayoría tienen origen inorgánico y presentan partículas de hierro, de magnesio, aluminio, son impermeables debido a la propiedad de compacidad.

Angulo de Fricción

El Angulo de fricción es la determinación de la inclinación dentro de un contexto o plano imaginativo, el cual representa la resistencia al desplazamiento entre partículas del suelo antes de un deslizamiento entre estas

Según (Das, 1985) los factores que se relacionan y que se deben tener en cuenta son el tamaño del grano, la densidad, la forma de las partículas, la microestructura, la permeabilidad entre otros.

Cohesión

Cuando un suelo está sometido a la tensión, su mayor resistencia ante dicha fuerza es la cohesión esta es netamente relacionada con el tipo de suelo ya que se determina de acuerdo a las propiedades de las moléculas que estos presentan. Se determina en unidades de esfuerzo. Es un factor de gran importancia para el diseño de cualquier estructura.

Circulo de Mohr

Es una metodología que permite a partir de círculos identificar los momentos de inercia, deformaciones y tensiones en un plano XY relacionando esfuerzos normales y esfuerzos cortantes así determinar los ángulos donde dichas fuerzas o tensiones son las más altas y por ende determinar en qué momento y lugar se podría producir una falla

Resistencia al Corte

Es la resistencia que se presenta internamente en relación de área que la masa del suelo genera para resistirse a una falla, esta es utilizada principalmente para identificar la capacidad portante del suelo, las resistencias a presiones laterales y finalmente la estabilidad de taludes, estas se producen por esfuerzos normales o cortantes relacionando factores que influyen tales

como la relación de vacíos, el nivel de confinamiento. Estas resistencias pueden ser por resistencia no drenada y resistencia drenada.

Dentro de las pruebas de laboratorio se encuentran en el sayo de corte directo simple, el ensayo de corte directo y el triaxial.

Proctor estándar

Este ensayo tiene la finalidad de conocer la compactación de una muestra de suelo en función del grado de humedad que esta posee y así el poder disminuir su contenido de vacíos.

Casa grande

Dicho ensayo de laboratorio tiene como fin determinar el límite líquido de una muestra de suelo a partir del análisis del mismo. Este ensayo permite caracterizarlas de baja o alta plasticidad principalmente entre limos y arcillas.

Humedad

Es un ensayo que permite evaluar el contenido de agua con el que puede ser compactado hasta alcanzar su peso específico seco de acuerdo a una compactación específica (ASTM D698 y D1557)

Compactación

Es una propiedad de caracterización mecánica que relaciona la intervención de fuerza aplicada a un suelo para aumentar su densidad. Es un método para mejorar los suelos y su desempeño (Braja, 1985)

Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg permite obtener los valores de los límites de humedad que presenta un suelo dentro de sus partículas finas y que estas están en un estado plástico, este ensayo de laboratorio varía a medida que se incrementa el contenido de humedad del suelo en estado sólido, este cambia su consistencia hasta pasar a un estado líquido. Este comprende el índice de plasticidad, el límite líquido y el límite plástico

Plasticidad

Es una propiedad que tienen los suelos finos (arcillas y limos) con el fin de evaluar y cambiar la rigidez de las partículas respecto a la humedad, esto sucede cuando el suelo se

encuentra entre su límite plástico y límite líquido. Donde presenta deformaciones sin que se fracture, propiedad que no se encuentra en materiales gruesos.

Impermeabilidad

Resistencia que posee el suelo ante el flujo de un fluido a través de la redundancia entre el interior de las partículas que este comprende.

Acondicionador de suelo

Es toda aquella sustancia que tiene como objetivo el mejoramiento de al menos alguna característica, bien sea biológica, química o física del suelo.

Resumen

La monografía pretende realizar una revisión teórica del mejoramiento de suelos arcillosos complejos en Colombia, con el uso de materiales reciclados empleados en la ingeniería civil y en general, de igual manera indicar las aplicaciones de los diferentes materiales reciclables, para el mejoramiento del suelo arcilloso a partir de los conceptos técnicos, las propiedades físicas y mecánicas y con esto relacionar la viabilidad de las diferentes aplicaciones en cuanto a la implementación de suelos arcillosos generando diferentes recomendaciones desde el punto de vista teórico- técnico para no solo el desarrollo sino adecuado de la aplicación en la ingeniería civil.

Se evidencian diferentes aplicaciones en el campo de materiales reciclables tales como el uso de plásticos como el PET, los geotextiles y materiales residuales de construcción principalmente, sin embargo, también se logran evidenciar materiales de residuos industriales como cascara de arroz, lodos aceitosos, caucho triturado, entre otros. Los cuales se analizan a partir de caracterización de propiedades mecánicas evidenciando el comportamiento comparativo de suelos con uso de materiales arcillosos y no.

De este modo se concluye a su vez, que para todas las aplicaciones son necesarios diferentes ensayos básicos que permitan el desarrollo de las diferentes investigaciones, así mismo la necesidad de tener en cuenta la normativa vigente para aceptación de los suelos, pero con este, también la normativa que tiene que ver con el uso y disposición de los diferentes materiales que fueron tenidos en cuenta a lo largo de la revisión.

Palabras clave: Arcillas, estabilización, mejoramiento, impacto, reciclables.

Abstract

The monograph aims to carry out a theoretical review of the improvement of complex clay soils in Colombia, with the use of recycled materials used in civil engineering and in general, in the same way indicate the applications of different recyclable materials, for the improvement of clay soil to starting from the technical concepts, the physical and mechanical properties and with this relate the viability of the different applications in terms of the implementation of clay soils generating different recommendations from the theoretical-technical point of view for not only the development but also adequate of the application in civil engineering.

Different applications are evidenced in the field of recyclable materials such as the use of plastics such as PET, geotextiles and construction waste materials mainly, however, industrial waste materials such as rice husks, oily sludge, crushed rubber are also evidenced., among others. Which are analysed from the characterization of mechanical properties showing the comparative behaviour of soils with the use of clay materials and not.

In this way, it is concluded, in turn, that different basic tests are necessary for all applications that allow the development of different investigations, as well as the need to take into account the current regulations for acceptance of soils, but with this, also the regulations that have to do with the use and disposal of the different materials that were taken into account throughout the review.

Keywords: Clays, stabilization, improvement, impact, recyclable.

Introducción

El mejoramiento de los suelos es fundamental para el desarrollo y solución de problemas referentes a las construcciones civiles dentro de los cuales pueden ser la compactación, estabilización, refuerzos y control de humedades (Akbulut et al, 2007), el documento tiene como fin realizar la revisión teórica del mejoramiento de suelos arcillosos a partir de materiales reciclables, junto con sus conceptos, aplicaciones en la ingeniería y recomendaciones para el uso y desarrollo del mismo, todo esto a partir de una revisión de fuentes secundarias.

Materiales como el caucho de llanta, adición de polipropileno, fibras de maíz, el uso de fibras PET, fibras de poliéster, fibra de nilón, cascara de arroz, entre otros, son algunos de los materiales para la elaboración de análisis de mejoramiento de suelos arcillosos tal como se pretende demostrar a lo largo de la monografía identificando efectividad en las propiedades analizadas.

A lo anterior, sumado a los avances tecnológicos e investigaciones para el análisis y mejoramiento de los suelos, que, a partir de materiales reciclados permiten desarrollar y mitigar los impactos ambientales con el fin de mejorar el comportamiento de estos, por tanto, no solo basta analizar las aplicaciones si no discutir sobre sobre los enfoques gracias al desarrollo de la recopilación de la información obtenida.

Razón por la cual, se plantea sintetizar de manera extensa pero no exhausta la información de modo que permita actualizar los conceptos y a su vez reduzca la limitación en algunas investigaciones por ausencia de la misma (Alba, 2011), lo cual no solo hace útil este documento si no necesario para la revisión de algunos conceptos técnicos, para la investigación en general y las diferentes aplicaciones que se pueden ver en estas

Planteamiento del problema

Descripción del problema

Actualmente se vive en un entorno cada vez más afectado por la contaminación de los procesos antrópicos y procesos industriales, sumado del desarrollo de las ciudades, lo cual afecta sin duda a los ecosistemas, en un contexto de buscar metodologías y procesos que sean eficientes ante soluciones encaminadas al uso adecuado de materiales reciclables aplicables a la ingeniería civil.

Según (Braja, 2015), la mayor problemática en suelos, son los arcillosos. Los cuales generalmente no cumplen con los requerimientos que son necesarios para garantizar la estabilidad en terraplenes, en taludes etc., Esto se debe a su limitada y baja resistencia al corte, sus altas deformaciones y sus propiedades físicas.

La implementación de materiales reciclables es cada vez un tema que se debe tener en cuenta en procesos de construcción y manejo de suelos inestables o problemáticos (Arbelaez & Gongora , 2019). Ahí la importancia de la implementación de prácticas encaminadas al reciclaje que permitan disminuir los impactos que estos desechos generan al planeta.

A esta problemática es importante resaltar la ausencia de información y recopilación de información (Martinez, 2019), las cuales son limitantes al desarrollo de una investigación, adicional de la ausencia de información confiable, recolección de datos esto en cuanto a la revisión de fuentes secundarias.

No solo la inestabilidad en los suelos arcillosos para la construcción de terraplenes y taludes, es un tema de propiedades físicas y mecánicas del suelo agregado del dinamismo de las empresas recicladoras donde según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible (2004) este sector es uno de los más activos donde debe buscarse diferentes aplicaciones y disposiciones teniendo que cuenta que también se analizan las propiedades físicas y mecánicas de estos materiales para comparación y uso en nuevas aplicaciones que en este caso tienen que ver con la ingeniería civil.

A pesar de que existen gran variedad de sistemas de mejoramiento de suelos no aptos para la construcción, como químicos y/o físicos en el tratamiento de estos suelos a lo largo del tiempo. Estos generan altos costos de recursos en materiales, mano de obra, tiempo de ejecución y la producción de nuevos residuos que nuevamente generan contaminantes.

Por lo anterior expuesto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué tipos de mejoramiento en suelos problemáticos arcillosos son utilizados en Colombia mediante la implementación de materiales reciclables?

Objetivos

Objetivo general

Realizar una revisión acerca del mejoramiento de suelos arcillosos complejos en Colombia con el uso de materiales reciclados, a partir de fuentes secundarias.

Objetivo específico

- Indicar las aplicaciones de materiales reciclables en suelos arcillosos para su mejoramiento.
- Determinar los conceptos técnicos, y las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos evaluados en Colombia a partir de la normativa vigente.
- Relacionar la viabilidad de las diferentes aplicaciones para la implementación de materiales reciclables en suelos arcillosos, generando recomendaciones para un adecuado desarrollo de la aplicación en la ingeniería civil

Justificación

La importancia de analizar y realizar estudios de suelos arcillosos en el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de estos se debe a la problemática que estos presentan para mejorar su estabilidad y capacidad. Junto con el cambio climático y la generación de prácticas de reducir el impacto ambiental, es de suma importancia la generación de prácticas y aplicaciones de dichos materiales en la ingeniería civil.

No solo en Colombia si no en todo el mundo la implementación y uso de estos materiales en diferentes usos es cada vez más tenido en cuenta (Carvajar & Garzón , 2019), todo esto tiene como finalidad una mejor disposición final de los diferentes residuos para refuerzo al suelo los cuales mejoran las propiedades físicas y mecánicas de estos (Carvajar & Garzón , 2019), para la generación de toma de decisiones y soluciones a problemas generados por este tipo de suelos, como son los suelos blandos relacionados a la mala estabilidad, deformación de taludes y grandes asentamientos adicional de la disminución de materiales contaminantes.

Adicional a lo anterior el desarrollo de esta monografía permitirá hacer una recopilación de la información como mecanismo de comunicación científica que permite no solo sintetizar cierto tipo de información sino también para discutir, divulgar y analizar cierta información ya existente. (Diaz & Brugueras , 2008) adicional colabora con futuras consultas, con la recopilación y actualización que en específicamente habla del mejoramiento en suelos arcillosos mediante materiales reciclables.

La mejora para suelos problemáticos arcillosos identifica un incremento en desarrollo no solo de la academia si no en la región para el posible uso de dichos materiales o la aplicación en diferentes proyectos, que hoy por hoy es un avance en las construcciones y la lucha contra los impactos ambientales para disminuir el cambio climático.

Metodología

La metodología que se va a desarrollar para la monografía es de carácter cualitativa la cual consiste en analizar, sintetizar, recopilar y divulgar cierta información (Lévano, 2007) el cual en este contexto se trata sobre el mejoramiento de suelos arcillosos a través de la implementación de materiales reciclables y a partir de fuentes secundarias, la metodología se compone en:

- Recopilación de la información la cual se da a partir de la revisión de fuentes secundarias de materiales reciclables.
- Caracterización de la monografía definición de procedimientos y propiedades físico mecánicas de los suelos arcillosos
- Comparación de los materiales empleados en función de la eficiencia y respuesta del suelo a la aplicación de los materiales reciclables
- Diagnóstico de recomendaciones para el buen uso y manejo de estos materiales en los suelos para la construcción de obras civiles en la rama de la ingeniería civil

Tal como se enuncio anteriormente la metodología principalmente se fundamenta en la revisión y recopilación a partir de fuentes secundarias. El desarrollo de los objetivos se observa de manera detallada en la tabla a continuación:

Tabla 1. Metodología

Objetivo	Actividad	Descripción	Actores
Determinar los conceptos técnicos, propiedades físicas y mecánicas además de la contextualización general de los suelos arcillosos	Recolección y recopilación de la información	Se recopila información a partir de fuentes secundarias que permitan caracterizar los suelos arcillosos a través de sus propiedades físico mecánicas. Las referencias empleadas son trabajos de grado Artículos de revistas científicas	Academia, Autor, comunidad en general.
Identificar las diferentes aplicaciones en el uso de materiales reciclables en suelos arcillosos en Colombia.	Identificación y análisis comparativo.	Se identificarán y posteriormente caracterizarán las diferentes metodologías y aplicaciones de los materiales reciclables en suelos arcillosos. A partir de revisión de fuentes secundarias como trabajos de grado, monografías y artículos de revistas científicas.	Academia, Autor, comunidad en general.

Tabla 1. Continuación

Objetivo	Actividad	Descripción	Actores
Relacionar la viabilidad de las diferentes aplicaciones para la implementación de materiales reciclables en suelos arcillosos, generando recomendaciones para un adecuado desarrollo de la aplicación en la ingeniería civil	Análisis y Formulación de recomendaciones	Posterior a la recopilación y organización de información se analiza la viabilidad de cada uno de los usos de materiales reciclables en suelos arcillosos para la generación de recomendaciones en cuanto al uso adecuado del manejo y aplicación de estos materiales en el desarrollo de las aplicaciones en la ingeniería civil.	Academia, Autor, comunidad en general.

Nota: Metodología planteada para el desarrollo de la monografía. Por Olaya L, 2021.

Marco Referencia

Marco Conceptual

El mejoramiento de los suelos, son inicialmente y fundamentalmente para el desarrollo y la solución de problemas referentes a construcciones civiles, los principales procesos contemplan la compactación, estabilización, refuerzos y control de humedades. A medida del tiempo estos procesos mejoran con la implementación de geotextiles, filtrantes. Estas soluciones deben verse relacionadas con la disminución de procesos ambientales, sociales y económicos. (Akbulut et al, 2007) implementaron el uso de caucho de llanta ya desechable para la mejora de los suelos arcillosos donde se evaluó la resistencia y el comportamiento dinámico a partir de muestras de la comparación de muestras alteradas y no alteradas afirmando que la implementación de este caucho efectivamente mejora los suelos arcillosos.

Por su parte (Zaimoglu, 2012) realizaron pruebas de compresión, de resistencia a suelos finos con adición de polipropileno determinando que la cohesión y las propiedades analizadas aumentaron con dicha aplicación. Adicional a lo anterior, (Tran, 2018) evaluó las propiedades mecánicas de un suelo que esta reforzado con fibras de maíz, el cual obtuvo como resultado la mejora en las propiedades como resistencia a la tracción, compresión, ductilidad, rigidez demostrando la efectividad en las propiedades que se analizaron.

De acuerdo a los análisis presentados referente a la implementación de materiales reciclados para la evaluación de suelos arcillosos (Ortiz, 2013) afirma que la cohesión es un parámetro que determina la resistencia a corte, el uso de fibras de PET determino que las fibras pueden mejorar ciertas propiedades mecánicas en el suelo, en relación directamente proporcional respecto al uso de fibras y a la deformación sin embargo sugiere porcentajes bajos. Las fibras no solo influyen por la cantidad sino también por forma de las mismas.

Adicional (Walia & Mohan, 2006) aplicaron fibras de poliéster en arcillas blandas para evaluar la resistencia en relación a compresión no confinada, de lo cual se obtuvo que dicha resistencia aumenta con las fibras a pesar de que estas se colocaron con dirección al azar. Caso similar de (Estabragh, 2012) realizaron en análisis de una arcilla con fibra de nilón estabilizada con cemento realizando las mismas pruebas que las fibras con poliéster indicando que dicha aplicación provoco un aumento de la resistencia a la tensión axial y la compresión no confinada.

Por otra parte (Kumar & Gupta, 2006) estudiaron en una arcilla de caolín la adición de ceniza de cascara de arroz, ceniza de estanque, cemento y fibras de propileno, evaluándolos

con pruebas de resistencia a la tracción y las propiedades en general de resistencia de la arcilla, lo cual obtuvo como resultado que la densidad seca máxima disminuye, y los esfuerzos pierden resistencia después del pico, adicional que esta aplicación puede usarse como material de relleno liviano en estructuras como paredes de contención o terraplenes.

Los avances tecnológicos e investigaciones en el análisis y mejoramiento de los suelos a partir de la inclusión de materiales principalmente reciclados permiten desarrollar y mitigar los impactos ambientales con el fin de mejorar el comportamiento de los mismos, por lo tanto, se pretende analizar los tipos las aplicaciones y discutir los diferentes enfoques a partir del desarrollo de recopilación de información secundaria. Identificando los tipos de aplicaciones empleados con sus técnicas en el mejoramiento de los suelos.

Estado del arte

Evaluación de suelos arcillosos con refuerzos de fibras de materiales reciclados

La monografía pretende realizar una revisión sobre el proceso para mejorar un suelo problemático (Areno Arcilloso de baja plasticidad) a través de metodologías experimentales en la inclusión de fibras PET para mejorar el comportamiento físico y mecánico. (Carvajal & Garzón , 2019)

El fin mostrado por la autora presenta el mitigar la contaminación principalmente ya que el PET puede mejorar ciertas propiedades en el análisis de un suelo. Los resultados demostrados por los autores representan una mejora en la resistencia del suelo.

Por su parte, el trabajo “Refuerzo de estructuras terreas utilizando tereftalato de polietileno” demuestra como una arcilla de alta plasticidad CH con inclusiones de polietileno tereftalato pretende mejorar las propiedades físico mecánicas del suelo a estudiar (Arbelaez & Gongora , 2019)

El uso de este material se da debido a su alta demanda no solo en Colombia si no en el mundo en general como lo expresan los autores, partiendo de dicha idea su fundamento es el mitigar el impacto ambiental de ese material para hacer una mejor disposición y disminuir el impacto ambiental que este genera.

Los resultados son sumamente favorables en cuanto a la resistencia al corte además de una mejora respecto a un suelo que no se le añadió el material reciclable.

Adicional a lo anterior, “Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado.” Muestra las características principales y parámetros de resistencia para definir las propiedades físico mecánicas de un suelo, estas son la resistencia al corte, el ángulo de fricción y la cohesión, dichas condiciones en su mayoría no son las aptas para el proyecto, razón por la cual es necesario diferentes mecanismos para mejorar la estabilidad del suelo. (López Ortiz J, 2013)

El trabajo busca el perfeccionamiento de propiedades mecánicas en suelos arcillosos, a partir de materiales de plástico reciclado a diferentes porcentajes y con la metodología de comparación.

Los resultados obtenidos demuestran la mejora en los parámetros de resistencia evaluados en cada uno de las probetas analizadas.

Además, Muñoz, et al (2014) en su artículo “Mechanical behavior of polyethylene terephthalate (PET) and geotechnical applications” afirma que la producción de residuos sólidos en los últimos años ha aumentado considerablemente con dicha problemática se plantea la

reutilización de los envases de PET como una sustitución de materiales ligeros convencionales utilizados en la nivelación o reemplazo de suelo.

Para lo cual se llevó a cabo no solo una caracterización de las propiedades físicas de los envases PET si no también del suelo, con resultados que demuestran que los usos de estos materiales aumentan la resistencia a la compresión en construcción de estructuras ligeras.

Comportamiento de los suelos arcillosos

En el artículo “Evaluación del comportamiento de arcillas sometidas a diferentes tiempos de exposición a altas temperaturas” se representa las características físico mecánicas de los suelos arcillosos en sus propiedades índice, la expansión y la resistencia a la compresión confinada, se analiza la implementación de altas temperaturas como evaluación de estabilización o de fabricación de material llenante (Rondon, 2011)

Sin embargo, los resultados no son muy favorables para el desarrollo de las propiedades físicas y mecánicas con temperaturas medias dentro del concepto de altas temperaturas.

Por su parte, el artículo “Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de cal” propone una metodología para el tratamiento de suelos susceptibles mediante la incorporación de estabilizantes, para la definición y caracterización de las características físico mecánicas y a su vez el mejoramiento de estas.

La caracterización del suelo consistió en la elaboración de una serie de ensayos de laboratorio que determinaran sus características físico-mecánicas y químicas.

El resultado obtenido es la optimización del suelo en cuanto al comportamiento a las propiedades de plasticidad, resistencia y estabilidad, cambiando un suelo problemático a uno adecuado para estructuras de pavimento por ejemplo (Higuera Sandoval, Gómez Cristancho, & Pardo Naranjo, 2012)

Alarcón, et al (2020) presenta como el análisis y estudio de la estabilización de suelos es una alternativa para la construcción de vías y estabilidad de taludes en general en búsqueda de reemplazar los materiales convencionales implementados, (Alarcón, Jiménez, & Benítez, 2020) para esto los autores definen la importancia de la caracterización de los suelos determinando su comportamiento con lodos aceitosos determinando su comportamiento en campo, el CBR y módulos resilientes.

Caracterización de suelos arcillosos

Sánchez et al (2005), presentan los cambios en las propiedades físicas de un suelo arcilloso por aportes de lombricomposto de cachaza y estiércol, se evaluaron las propiedades físico mecánicas a partir de una mezcla lombricompostada de cachaza y estiércol bovino.

Donde se evidencio el cambio en la configuración estructural de la superficie del suelo.

Los resultados del fraccionamiento por tamaños de agregados en húmedo indican que hay una mayor cantidad de macro agregados estables en los suelos que recibieron dosis mayores de la enmienda.

Posteriormente, en el trabajo “Características de los suelos y sus factores limitantes de la región de murgas, provincia La Habana se ejecuta en la región de murgas provincia de la habana y contextualiza diferentes tipos de suelo evidenciando las propiedades físicas y mecánicas de estas vistas desde un contexto del clima similar a algunas regiones de Colombia (Bernal et al, 2005) donde se observa que las limitaciones de los suelos están dadas por problemas de drenaje, que resulta insuficiente en las partes bajas del relieve y en gran parte del área.

Conceptos generales

Arcillas

Las arcillas se consideran como cualquier depósito o sedimento mineral el cual se encuentra formado por partículas cuyo tamaño no supera a los 0.002 mm, (Zapata, 2018) estas se componen de silicatos de aluminio hidratados principalmente, las arcillas además se caracterizan por ser plásticas. Esto ocurre cuando se humedece o se calienta por encima de los 800 °C (Zapata, 2018). Estas provienen de alteraciones físicas y químicas, pues no se refieren a un solo único material de composición si no uno bastante amplio.

Adicional a lo anterior, las arcillas hacen parte de los silicatos, un tipo de mineral, y están compuestas por planos atómicos que es la superficie que contiene las diferentes alineaciones de átomos, las hojas que son las presencias de unidades estructurales y con esto las láminas que es básicamente el apilamiento de las hojas presentes en la arcilla.

De acuerdo a Zapata (2018), los grupos más significativos que se presentan en las arcillas son los denotados en la gráfica a continuación, los cuales son clasificados a partir de métodos como los ensayos de granulometría, equivalencia de arena, límites de Atterberg. Estos definidos de una manera teórica. Sin embargo, existen otros más puntuales como la difracción de rayos x, azul de metileno que permiten visualizar las partículas y con esto catalogarlas. A continuación, se presentan diferentes arcillas de manera gráfica con los grupos más representativos

Figura 1 Muestra de Diferentes Arcillas



Nota: Arcillas de diferentes colores, por Zapata (2018)

Figura 2 Grupos de Arcillas

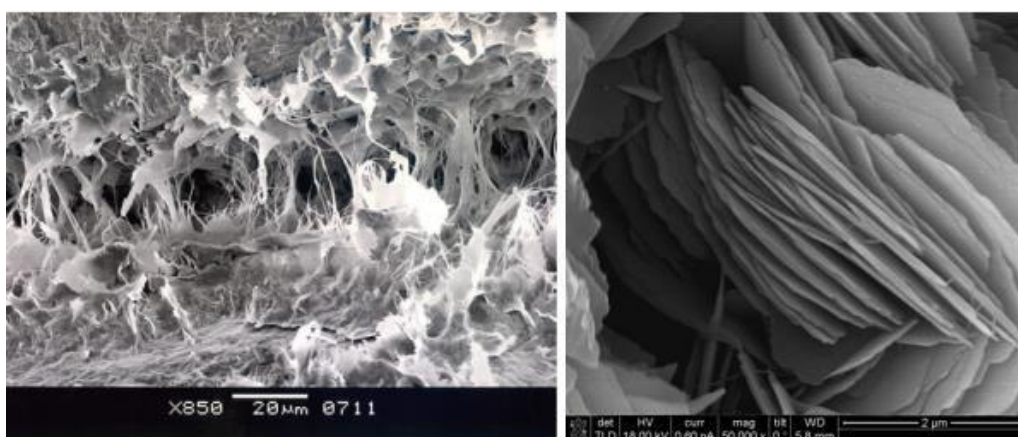
ILLITAS	CAOLINITAS	ESMECTITAS
•Enlace fuerte •origen de alteración de feldespatos y micas.	•Enlace Fuerte •origen de alteracion de feldespatos y muscovitas en medios marinos.	•Enlace Débil •Son alteraciones de illita y de feldespatos presentes en cenizas volcanicas.

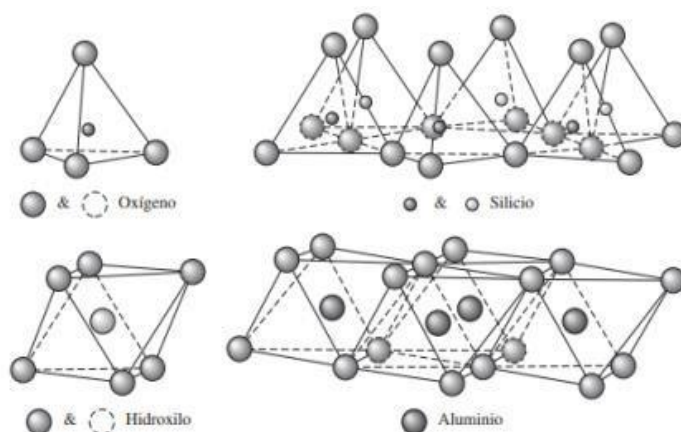
Nota: Se definen los grupos más representativos de arcillas con algunas características como alteraciones y enlaces para definir su caracterización, por Olaya, 2021. A partir de Zapata (2018)

Por su parte un tipo de arcilla esmectitica es la montmorillonita, esta tiene a dilatarse cuando se expone al agua (García, 2015) es utilizado generalmente en fluidos de perforación. Sin embargo, en el campo de la ingeniería civil su uso se enfoca a cementar fisuras de las rocas gracias a la absorción de humedad, así mismo impermeabilizando trincheras o estabilizando los suelos en general. Su composición molecular y su estructura microscópica se presenta en la figura 3.

Otros usos comprenden:

- Aumentar la plasticidad y capacidad de cemento
- Soporte de excavaciones
- Relleno de grietas en tuberías.
- Membranas impermeables.
-

Figura 3 Estructura de arcillas



Nota: imágenes microscópicas de suelos arcillosos, Montmorillonitas (derecha), illita (izquierda), Por Zapata (2018)

Las arcillas además pueden ser clasificadas según su tamaño de partículas, que principalmente son submicroscópicas en forma de escamas, estas no contienen necesariamente minerales arcillosos, de acuerdo a diferentes organizaciones pueden clasificarse de la siguiente manera de acuerdo a su tamaño como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2. Tamaño de partículas de las arcillas.

Organización	Tamaño de grano (mm)
Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S, Army corps of Engineers)	< 0.0075 mm (Aplica para limos y arcillas)
Invias Inv. E -123	<0.002 mm
Asociación Americana de funcionarios de transporte y carreteras estatales (AASHTO)	<0.002 mm
Departamento de Acuicultura de E.U (USDA)	<0.002 mm
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	<0.002 mm

Nota: tamaño de partículas de las arcillas según diferentes organizaciones monografía. Por Olaya L, 2021. Tomado y modificado de Moreno y Márquez (2018)

Sensitividad

La Sensitividad es el efecto que se produce entre en amasado sobre la consistencia de una arcilla siempre y cuando esta se encuentre en estado de no alteración, este es diferente para cada arcilla y puede depender de su contenido de humedad.

Se mide entre la relación de resistencia de una muestra remoldeada y una inalterada y se expresa de la siguiente manera:

$$S_t = \frac{R_I}{R_R} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

St= Grado de Sensitividad

Ri= Resistencia de una muestra inalterada

Rr = Resistencia de una arcilla remoldeada

Esta se puede clasificar así:

<2 insensitiva

2 – 4 Medianamente sensitiva

4-8 Sensitiva

8-16 Muy Sensitiva

Esto indica la tixotropía que de acuerdo a zapata (2018), consiste en la perdida de resistencia de un coloide al ser amasado y su recuperación en un periodo., unas arcillas pueden volverse líquido, otras recuperan su cohesión y otras se comportan de manera sólida, para lo cual también influye el limite plástico de estas.

Arcillas expansivas

Un suelo expansivo es aquel que de manera parcial o incluso totalmente saturados incrementan su volumen de manera significativa en cuanto directamente aumenta la humedad de manera constante (Zapata, 2018). Las arcillas son susceptibles a este tipo de comportamientos debido a su capacidad de recibir agua, y su enlace débil según el tipo de arcilla que sea. La diferencia en el contenido de humedad, hace que varié el estado físico de las arcillas, y con este afectar los límites de Atterberg (Limite líquido, plástico y límite de contracción), siendo el punto de partida para la expansión de un suelo. De igual manera se puede identificar la expansión de acuerdo a los siguientes ensayos:

De acuerdo a la norma I.N.V.- E 132, un suelo expansivo es cuando este supera el límite liquido > 60 %, IP >35% y succión del suelo (t nat.) > 4 ton/pie², de la misma manera por su potencial de cambio volumétrico (PVC) con valores < 2 no crítica; 2-4 crítica y > 6 muy crítica. La norma también lo referencia de acuerdo a su límite de contracción como: un PCV bajo cuando el límite es > 12; moderado en un intervalo de 10-12 y alto cuando < 10.

De modo que la magnitud de expansión puede representarse de la siguiente manera:

$$S = \frac{\Delta e H}{1 + e_f} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

S = Expansión en pulgadas

Δe = diferencia de relación de vacíos

H = espesor de la capa en pulgadas

e_f = Relación de vacíos en las condiciones de esfuerzos existentes en el terreno.

Información que puede corresponder con la norma AASHTO T-258

Granulometría, Humedad natural y límites de Atterberg:

Ensayos que indican el comportamiento de las arcillas.

Presión en edómetro

Este ensayo permite calcular la presión de hinchamiento que presenta un suelo a partir de cargas que no permitan que esta se expanda, donde la presión máxima aplicada es la presión de hinchamiento.

VSR (valor de soporte relativo) CBR (California Bearing Ratio)

Estos ensayos principalmente se realizan para pavimentos, donde se efectúa para la caracterización mecánica de los suelos.

Índice de actividad

Dicho índice permite medir la expansión a partir de actividad eléctrica relaciona el índice de plasticidad y el porcentaje de partículas menores a dos micras

Hinchamiento Libre

Este ensayo mide el potencial de expansión que experimenta una arcilla que se encuentra parcialmente saturada frente a una sobrecarga de 1 KPa el cual solo permite deformaciones verticales y limita el análisis a nivel horizontal.

La finalidad de analizar la expansión de los suelos es debido a los daños que estos generan, siendo desde fisuras, grietas o incluso la fractura de elementos estructurales, de la cimentación o deformaciones en pavimentos, que en algunos de los casos pueden ser daños irresolutos. Así mismo deben tenerse en cuenta factores como los demostrados en la siguiente figura:

Figura 4 Métodos para evitar la Expansión en suelos.

Ejecución	• Evitar la exposición de sustratos a la acción de la naturaleza, y con esto excavar y vaciar el concreto en el menor tiempo.
Drenaje	• Proponer sistemas de drenajes efectivos y evitar la colmatación, para un correcto flujo de aguas superficiales
Cimentación	• Evitar el empuje del suelo sobre las riostras de la cimentación
Cargas	• Cargas coherentes y ser compensadas con la capacidad máxima del suelo, evitando expansión y asentamientos.

Nota: conceptos a tener en cuenta para evitar la expansión en suelos, por Olaya, 2021. Tomado y Modificado de Zapata (2018).

Actividad de los minerales arcillosos

Las arcillas están compuestas por minerales muy finos, los cuales son los que reaccionan con el agua y esto genera que su volumen aumente (Rojas & Rivera, 2014) que de acuerdo a los autores son los aluminosilicatos cristalinos o amorfos o los minerales no arcillosos como lo son los geles, oxidas y silicatos, de esta manera la actividad de los suelos relaciona el peso de los gramos < 2 micrones y el índice de plasticidad. Lo cual representa la capacidad que tienen las diferentes partículas para retener humedad.

Capacidad de Absorción

La absorción se da cuando los iones se unen o moléculas se introducen en el espacio de los canales estructurales, algunas arcillas alcanzan al 200% respecto a su peso en estado seco (Gomez & Parra, 2015), las arcillas son importantes y relevantes en el sector de la absorción, esta capacidad está relacionada con las características propias de su superficie específica y la porosidad la absorción sucede cuando los pasa por procesos físicos como la capilaridad y la adsorción que es una interacción química entre la arcilla y un fluido adsorbente, esta capacidad se representa en porcentaje de adsorbato respecto a la masa, generalmente la de las arcillas supera el 100 % respecto a su propio peso.

Factores que afectan a las arcillas, la plasticidad y sus límites

De acuerdo a Gómez & Parra los factores que afectan a las arcillas son los que se representan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Factores que Afectan a los suelos arcillosos

Factores	Descripción
Contenido de Arcilla	La plasticidad se da por el suelo fino, de acuerdo a la proporción de arcilla que tenga un suelo depende su plasticidad, el límite aumenta en la escala de humedad. Así mismo aumento en la plasticidad y consecuencia por la cantidad de arcilla
Minerales del suelo	De acuerdo a Atterberg, la plasticidad depende los minerales de los suelos, estos que poseen una estructura laminar presentan este tipo de comportamiento, lo cual se atribuye a mayor superficie de contacto entre las partículas laminares.
Minerales de la Arcilla	Dependen de las propiedades de los suelos como la plasticidad, compresibilidad y el potencial de expansión -Caolinita: Consistencia suave y textura terrosa, se rompe fácilmente, se encuentra en superficies oxidadas por silicatos de aluminio -Montmorillonita: Formadas por Rocas ígneas ricos en Ca y Mg tienen alto potencial de expansión -Ilita: Arcillas más comunes formadas por aguas micas y feldespatos predominantes en suelos marinos y chales
Composición Química del coloide	La capacidad de adsorción y la superficie coloidal de los cationes disminuye cuando la relación es menor, Suelos que tienen menor relación de cationes se vuelven plásticos cuando su humedad es menos.
Contenido de materia orgánica	Afecta directamente la plasticidad, la presencia de materia orgánica y su oxidación causa un descenso en los límites, es decir, se vuelve plástico con menos agua.

Nota: Factores que hacen que varíe la plasticidad y los límites de atterberg en un suelo arcilloso. Por Olaya L, 2021. Tomado y modificado de Gómez y Parra (2015)

Aplicación de materiales reciclables en suelos arcillosos

Contexto Normativo. A modo de contextualizar el manejo de materiales reciclables en suelos arcillosos es importante tener en cuenta las diferentes normas enunciadas en la tabla a continuación:

Tabla 4. Contexto Normativo

Norma	Descripción
Decreto Ley 2811 de 1974	Código de los recursos naturales: se señala el aprovechamiento de suelos manteniendo la integridad física y la capacidad productora
Política del Ministerio de ambiente (1995)	Política nacional de producción más limpia del ministerio de ambiente: Minimizar impactos y riesgos de tecnologías limpias
Acuerdo 344 de 2008	Se Dispone diseñar y ejecutar para la gestión de residuos en pro a minimizar el impacto ambiental.
Invias (2012)	Señala la normatividad de reforzamiento de suelos, en su artículo 350 se dicta lo referente al pavimento y sus agregados y adiciones.
Resolución 1407 de 2018	Se fomenta la innovación y el aprovechamiento de materiales reciclables del mercado.
Resolucion 932 de 2015	Dictaminada por la secretaria de Ambiente adoptando los lineamientos para el aprovechamiento y tratamiento de (RCD), requisitos del plan de gestión, sanción y anexo de formularios.
Resolución 472 de 2017	Se reglamenta la gestión de los residuos generados por la actividades de construcción y demolición (RDC)

Nota: Contexto ambiental y suelos arcillosos. Por Olaya L, 2021. Tomado y modificado de Carvajal & Garzón (2019) & Ministerio de Ambiente (2017)

Agregados Reciclados. Mediante la demolición de algunos agregados provenientes del concreto es posible mejorar las propiedades físicas de un suelo (Carreño, 2016) tanto su mezcla como su aprovechamiento lo cual evita la sensibilidad del agua, además permite la circulación por terrenos y le da estabilidad al suelo.

Países como Alemania se encuentra en los países que más produce agregado reciclable de los cuales un 70% se destinan al mejoramiento de suelos y arcillas principalmente tal como lo afirma Carreño (2016), Japón por su parte también lo hace casi en la totalidad.

Dentro de los cuales se analizaron diferentes caracterizaciones para su caracterización y análisis dentro de ellos el tamaño máximo, el módulo de finura, el desgaste de los ángeles, límites y ensayos de compactación, granulometría, entre otros, hinchamiento en caso de arcillas y valor de soporte relativos, donde se obtuvo como resultado en términos generales que los materiales reciclables se ajustan al suelo con algunas propiedades mayores en su compactación. En Colombia tal como lo afirma el Invias (2016) se propone la utilización de este tipo de materiales para el uso de pavimentos mas no para el mejoramiento, sin embargo, datos que son eficientes y con varias ventajas viéndolo desde el punto de vista de la sostenibilidad tal como se evidencia en la siguiente figura:

Figura 5 Beneficios de agregados reciclables

Ambiental	•Disminución de espacios para disposición de escombros
Optimización	•Bajo indice de plasticidad, disminuye el indice de hinchamiento y mejora la compactacion ademas de la coservacion de diferentes recursos
Economia	•Ahorros en transporte de materiales
Comportamiento	•Plataformas resistentes

Nota: Beneficios del uso de agregados materiales en suelos, por Olaya, 2021. A partir de Carreón (2016)

Por su parte (Moreno, 2018), analizo el comportamiento y mejoramiento de suelos arcillosos con residuos de construcción y demolición a través del método que se ha logrado ver a lo largo del documento, caracterización granulométrica, así mismo química mineralógica y diferentes ensayos, como la alcalinidad, definiendo que el desempeño de los agregados reciclados pulverizados para suelos arcillosos corroboraron y determinaron que este tipo de material tiene influencia en la granulometría y composición del suelo sus composiciones no alteran sus propiedades pero enfatiza en el uso como método de reciclar este tipo de material y disminuir de alguna u otra manera el impacto ambiental que el campo de la construcción general.

Suelos Arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET)

PET (Polietileno Tereftalato). Es un material termo plástico utilizado principalmente para envases fibras y plásticos en ingeniería, este gracias a sus propiedades puede ser fundido y moldeado nuevamente, está compuesto por petróleo crudo aire y gas (López, 2013). Un kilo de este tiene el 65% de petróleo 23 % de fluidos derivados del gas natural y 12% de aire donde se extrae el paraxileno del petróleo y este se oxida dando como resultado el tereftalico, el etileno de los derivados del gas natural se oxida con aire y así se obtiene el etilenglicol. La combinación del ácido tereftalico y etilenglicol es el resultado del PET de acuerdo al Ministerio de Ambiente (2014) Según López (2013) tomo una muestra de suelo arcilloso con algunas fibras de diferentes tipos de medidas de PET, la cual fue sometida a ensayos de:

- granulometría,
- hidrómetro para determinar el porcentaje de dispersión de las partículas en cierto periodo,
- límites de Atterberg
- gravedad específica
- compactación estándar
- compresión simple

Del análisis los resultados fueron los siguientes:

Granulometría. Se caracterizó de acuerdo a la clasificación que propone USCS (Lambe & Whitman, 1979) determinando que es un suelo con bastantes finos siendo una CL arcilla con ligera plasticidad tal como lo afirma López (2013).

Gravedad Específica. Este ensayo permite los posibles minerales que se encuentran en los suelos, donde la mayoría de estos oscila entre valores de 2.6 a 2.9 (Das,1985) obteniendo un valor de 2.95 donde se puede concluir que se predomina el hierro y el magnesio, (López,2013) minerales que son comunes en las arcillas. Valor calculado como el peso específico de los sólidos en relación al peso específico del agua.

Proctor estándar. Obteniendo como resultado humedad optima de 21.52%, (López,2013) es hallada con el fin de moldear probetas que posteriormente serán alteradas de alguna manera para analizarla con la fibra de PET y así identificar qué características del suelo varían.

Compresión simple. De acuerdo a lo obtenido por la cohesión no drenada con fibras de 5.0 y 3.0 cm se observa que el aumento es de 24 Kpa inicialmente con 0.2 % Aumenta un 11% Kpa con 0.5% de fibra y 20 % Kpa con 1% la tasa de incremento se observa en la siguiente figura.

Figura 6 Tasa de incremento con 5 cm y 3 cm

5.0 cm		3.0 cm - 5.0 cm	
Cantidad de Fibra (%)	Incremento (%)	Cantidad de Fibra (%)	Incremento (%)
0.20	33.6	0.20	15.1
0.50	38.0	0.50	15.4
1.00	42.5	1.00	6.0
1.50	41.9	1.50	-1.0

Nota: Tasas de incremento de la cohesión con fibras de 5 cm y con las dos longitudes respecto al volumen de la muestra tomada del suelo, López, 2013.

Esfuerzo – Deformación. Para la fibra con 3.0 cm obtenidos del ensayo de compresión, se logra determinar que la resistencia aumenta directamente proporcional al porcentaje de fibra en el suelo (López, 2013) y los cambios varían considerablemente entre porcentajes del 1 % y el 1.5 %. Por su parte con la fibra de 5.00 cm es aún más considerable la deformación unitaria para la misma razón de cantidad de PET incluido para 5% de deformación unitaria con 3 cm respecto a 3 % de fibra a 5.0 cm. Sin embargo, cuando se probaron ambas longitudes se comportó de manera variada pero en proporciones menores y poco significantes los valores del esfuerzo de 3.0 cm es de

160-205 Kpa, a diferencia que con fibras de 5.0 cm son de 187 - 200 Kpa (López, 2013).

Lo anterior representa la cohesión como un parámetro a considerar para la resistencia, el cual con fibras de PET aumenta el valor y con este logra mejorar en cierta medida las propiedades mecánicas del suelo, así mismo que el % de fibra es directamente proporcional a la resistencia del suelo, y con este la deformación lo que hace que la ductilidad crezca y los esfuerzos cortantes sean también lo hagan.

Por su parte (Carvajal & Garzon, 2019), evaluaron un suelo arcilloso de acuerdo a las especificaciones que presenta el Invia (2013) con adiciones de PET. Determinando las propiedades físicas y mecánicas del suelo para posteriormente ser aprovechado para su mejoramiento con fibras de 3 cm, para el caso realizó los siguientes ensayos:

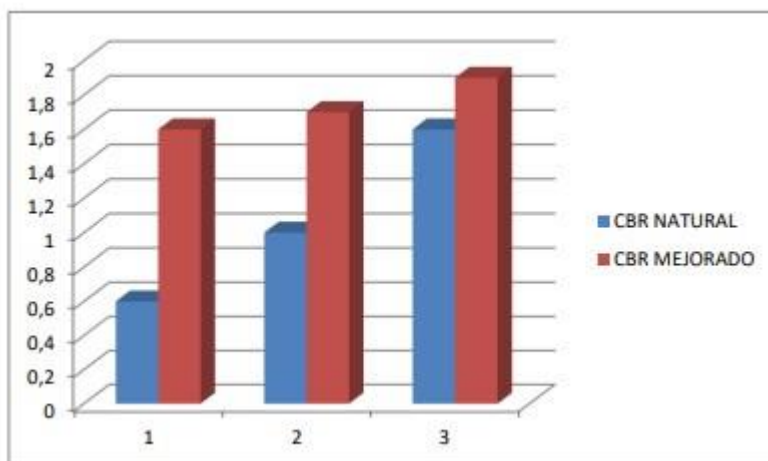
- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Humedad
- Proctor estándar
- CBR

Proponen como se comentó anteriormente fibras de 3 cm con un porcentaje del 1% sobre el peso total de la muestra, con el fin de comparar las mezclas e identificar cómo se comporta el uno respecto al otro.

Posterior al cálculo de los diferentes resultados de los ensayos, identificando que con la evidencia de comparación (CBR) y con una adición del 1 % la muestra presenta mejoramiento en la resistencia del suelo arcilloso, sin embargo la adición de fibras del PET no cumple con las especificaciones

Adicional a lo anterior, Jaramillo Et al, (2014) analizaron el comportamiento mecánico del PET en diferentes aplicaciones geotécnicas por lo cual se enfatiza en suelo arcilloso, donde ya se tienen datos del uso de este material mejoramiento de concretos y asfaltos a lo que concluyen que los envases no solo representan una alternativa significativa y potencial para remplazo de este material, aunque las propiedades mecánicas mejoran se sugieren que estos se traten en construcciones livianas, el PET también se comporta como un aislante y receptos de resistencias químicas que puedan dañar el suelo. De acuerdo a los resultados comparativos que se muestran en la figura a continuación.

Figura 7 Comparación de CBR



Nota: se presenta las diferencias entre un CBR de suelo arcilloso natural y uno con adición del 1% de fibras, (Carvajal & Garzon, 2019)

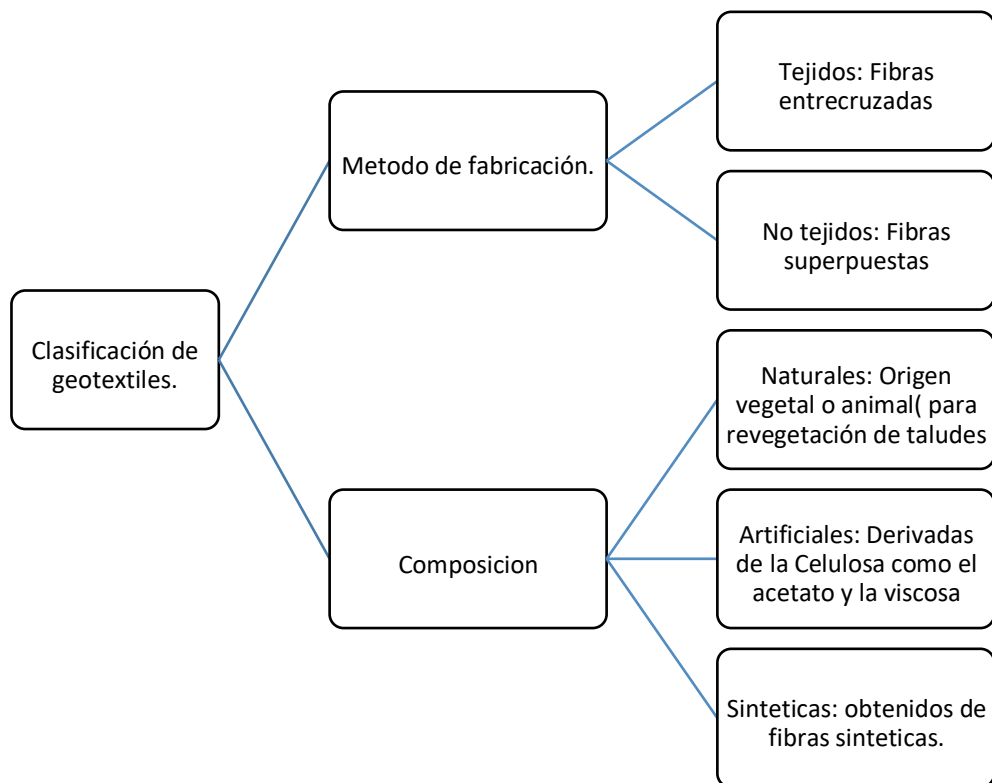
Ademas se demuestra que los resultados son de acuerdo a lo propuesto por la norma estipuladas en el INVIAS, el suelo tiene mayor resistencia sin embargo es un balor que no representa ni el 1% respecto al natural lo que puede ser por la magnitud de la muestra.

Suelos Arcillosos con adicion de geotextil tejido

Para entender este tipo de aplicación es necesario contextualizar el concepto de geo sintéticos, el cual es un producto que es a base de polímero o en algunos casos de manera natural, y su propósito es ser filtro, lamina o estructura tridimensional para el suelo y aún más en la ingeniería civil, puede ser usado en obras civiles, viales, hidráulicas entre otras (Triana & Villamizar , 2010), por su parte los geotextiles se definen como material plano, permeable que puede ser tejido o no.

Estos se clasifican de acuerdo su método de fabricación y su composición de acuerdo a (Triana & Villamizar , 2010) observados en la figura a continuación:

Figura 8 Clasificación de Geotextiles



Nota: Son de alta durabilidad y resistentes a bacterias, Olaya 2021. A partir (Triana & Villamizar , 2010)

La función que tienen los geotextiles es actuar como separación, refuerzo, filtro, drenaje, protección o impermeabilización, dentro de las funciones se pueden observar las descritas en la figura a continuación:

Figura 9 Funciones del Geotextil

Separación
• Separar dos tipos de capas en el suelo evitando la mezcla de material
Refuerzo
• Uso efectivo de tracción y trabaja como complemento a propiedades del suelo así controlar esfuerzos.
Drenaje
• Captación y conducción de fluidos dentro de una capa, impide el transporte de partículas, sin ocasionar pérdidas de presión.
Filtro
• Impedir paso de partículas, fluidos o gases
Protección
• Proteger geomembranas de posibles perforaciones o roturas, durante la construcción mantenimiento o reparaciones.
Impermeabilizante
• Ofrece resistencia y rigidez para la colocación, dando capacidad de deformación suficiente para compensar tensiones térmicas.

Nota: Principales funciones de los geotextiles en los suelos, por Olaya, 2021.

Normograma para la implementación de un geotextil

Las normas que se presentan a continuación describen los ensayos y especificaciones de construcción para cualquier tipo de geotextil. Estas se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 5. Normograma de Geotextiles

Norma	Descripción
ASTM D-4632 INV E -901	Método para la determinación de la carga de rotura de geotextiles
ASTM D- 4833 INV E – 902	Método para el cálculo de índice de resistencia de punzonamiento de geotextiles y productos relacionados
ASTM D – 4533 INV E-903	Método para la determinación de la resistencia al rasgado trapecoidal de geotextiles.
ASTM D – 3786 INV E – 904	Método para la determinación de la resistencia al estallido de geotextiles

Tabla 5. Continuación

Norma	Descripción
ASTM D – 4491 INV E – 905	Método para la determinación de la permeabilidad al agua de los geotextiles por medio de la permitividad.
ASTM D – 5199 INV E – 906	Método de ensayo estándar para determinar el espesor nominal de geotextiles
ASTM D – 4751 INV E – 907	Método estándar para la determinación del tamaño de abertura aparente de un geotextil
ASTM D – 4354 y 4439 INV E – 908	Método de muestreo de geo sintéticos para ensayos
ASTM D – 4759 y 4439 INV E – 909	Practica para establecer la conformidad de especificaciones de geo sintéticos.
ASTM D – 4355 INV E – 910	Método de ensayo para medir el deterioro de geotextiles a la exposición de luz ultra violeta y agua.
ASTM D – 5261 INV E – 912	Método estándar para medir la masa por unidad de área de geotextiles.
ASTM D – 5321-02	Método de ensayo estándar para determinar el coeficiente de fricción suelo- geosinteticos por el método de corte directo.

Nota: ensayos y especificaciones para el geotextil. Por Olaya, 2021, Tomado y modificado de Triana y Villamizar (2010)

Para el desarrollo de la evaluación Tirana & Villamizar (2010) decidieron necesario tomar una muestra de suelo con una arcilla de tipo CL tomadas de una cantera de ladrillera, a su vez se realizaron los siguientes ensayos para conocer las propiedades físicas del suelo:

- Límites de Atterberg
- Granulometría
- Proctor modificado
- Humedad Optima
- Peso específico máximo del suelo
- Corte directo

Los ensayos anteriormente nombrados se realizaron antes de adicionar las fibras sintéticas del geotextil, con porcentajes de adición establecidos y dimensiones que se iban a utilizar, se realizaron ensayos de corte directo con el fin de analizar con fibras de un 1 cm en proporciones de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ del peso total de la muestra y así con 2 cm y 3 cm.

Los resultados obtenidos fueron la clasificación de una arcilla con un contenido de 70% de finos y 30 % de material grueso, LP de 21 % y 44% de LL y un IP de 22%, en cuanto a su compactación se logró determinar una humedad optima de 12 % y pesos máximo seco de 1.95

ton / m³, para la resistencia al esfuerzo cortante se determinó un ángulo promedio de 32 ° cohesión promedio de 1.210 Kg/cm², lo anterior sin refuerzo de fibras. Al usar porcentaje mayor y una distancia mayor se logra observar que por ejemplo con 0.25% y longitud de 2 cm el ángulo fue de 38° y de cohesión promedio de 1.280 Kg/cm² así con las proporciones diferentes y con 3 cm. Resultado que para el caso de 0.75% y 3 cm su ángulo fue menor con valor de 24° pero su cohesión aumento de manera significativa con valore promedio de 1.44 Kg/cm² (Triana & Villamizar, 2010).

Lo anterior determina que el ángulo de fricción que con valores superiores a 3 cm sin importar el porcentaje de fibra el ángulo de fricción disminuye comparado con los valores del suelo sin refuerzo, este a su vez es mayor cuando se realizan muestras de 2 cm y en p% de 0.25 % aproximadamente lo que indica que son las proporciones óptimas para mejorar las condiciones del suelo

Geo polímeros. Los geo polímeros, es un término adoptado por la unión soviética hacia la década de los cincuenta (50s) como cementos del suelo (Soil cements) (Ospina & Villabon , 2017) donde gracias a soluciones alcalinas de hidróxido de sodio y de potasio, pretendían lograr una mayor reactividad, con una mayor resistencia a la compresión. Su composición principalmente es de aluminio y silicato, tienen baja permeabilidad y han demostrado buena resistencia a los ácidos, en comparación con el cemento portland, también a sulfato, corrosión y presenta una baja erosión.

De acuerdo a la norma INV E -102-13 se es necesario demostrar la identificación de los suelos mediante un procedimiento visual y manual, determinando características como color.

Olor, condición de humedad, consistencia, resistencia, tenacidad y plasticidad.

Estos además son fabricados con procedimientos químicos producidos al mezclar aluminosilicatos con activadores alcalinos concentrados, donde se afirma que la resistencia a compresión simple, mejora su condición, adicional es resistente al agua, y reduce el impacto ambiental en cuando a la implementación de uso en ladrillos de arcilla cocida a la de arcilla polimerizada. Esto sucede dependiendo el tipo de arcilla, pues actúa diferente con el mismo procedimiento en las diferentes arcillas. (Avellaneda et al,2018) lo que demuestra que no es aplicable los resultados de polimerización generalmente en las arcillas, sin embargo, en algunos porcentajes de CaO aportas resistencia y consolida el polímero. Por otra parte, el uso de geo polímeros disminuye el impacto ambiental en el material. De modo que los materiales de arcilla polimerizada pueden ser una alternativa tecnológica y coherente en función a la realidad ambiental que representa la ingeniería, y sus diferentes aplicaciones.

Comportamiento de suelos Arcillosos con uso de residuos industriales

Suelos mejorados con cascara de arroz y caucho triturado. (García Santos, 2019) analizo una Arcilla inorgánica de alta plasticidad CH, determino su contenido de humedad además de su peso seco máximo y su grado de compactación, empleado el uso de residuos de construcción donde agrego 30% de ceniza de cascara de arroz y un 2% de plástico y un 10 % de caucho triturado. Tal como se observa a continuación

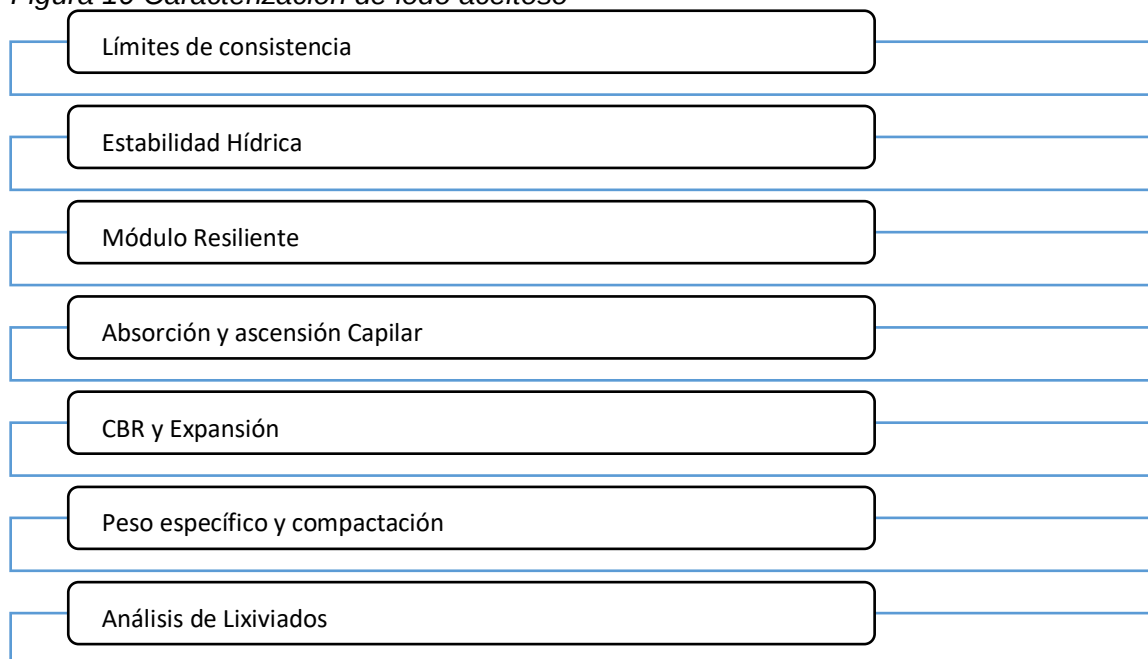
- Suelo CH + 30% de Cascara de Arroz
- Suelo CH + 2 % de plástico Triturado
- Suelo CH + 10% de caucho triturado

Con esto logro identificar que después de los ensayos mencionados al largo del documento la cohesión mejora en un 40% así mismo su Angulo de fricción mejora en valores que superan el 100% con cascara de arroz en un 30% del mismo modo aumentan en 30% con adición de “& de plástico reciclado y en un 10% con la adición del mismo porcentaje de caucho triturado respecto a los datos obtenidos del suelo puro.

La adición de residuos industriales al suelo analizado además mejoro el módulo de elasticidad de 29% con adición del 2% de plástico reciclado y en 5 % con 30% cascara de arroz, este a su vez disminuyo respecto al caucho triturado puesto que su módulo se redujo en un 52%.

Estabilización de suelos con material arcilloso mediante el uso de lodos Aceitoso. La estabilización de suelos surge como alternativa en la construcción para cambiar los materiales convencionales y mejorar la estructura de los suelos. Alarcón Et al, (2020) analizaron de suelo arcilloso para determinar las propiedades al agregar lodo aceitoso, con el fin de determinar el CBR y los módulos resilientes. Se realizó mediante una previa revisión bibliográfica, la caracterización de los materiales y la misma estabilización para determinar un análisis de los resultados teniendo en cuenta el marco teórico.

El lodo aceitoso tratado actualmente de manera ambiental ya que permite reducir residuos que son peligrosos y que representan no solo en suelos si no en aguas bien sea residuales, superficiales o subterráneas, para esto se tuvo en cuenta las diferentes metodologías de caracterización como se evidencia en la figura a continuación:

Figura 10 Caracterización de lodo aceitoso

Nota: Diseño planteado para el análisis experimental de la investigación con lodos aceitosos, por Olaya, 2021 Tomado y modificado Alarcón Et al, 2020.

Los resultados demostraron que el lodo aceitoso permite efectivamente la estabilización de suelos de subrasante, donde los resultados y ensayos que se llevaron a cabo del CBR se refleja la importancia de reposarlas para que aumente su resistencia en el tiempo, además el lodo aumenta la estabilidad hídrica, esto gracias a la saturación que presenta el suelo lo cual permite la preservación de las propiedades en una situación extrema o critica. Además, Alarcón Et al. (2020), analizo económicamente la implementación evidenciando que en la relación costo – beneficio es positivo para el desarrollo de la investigación.

Resultados e impactos

- Resultados para el objetivo específico 1

De acuerdo al objetivo específico 1 que tiene como finalidad indicar las aplicaciones de materiales reciclables en suelos arcillosos. De acuerdo a esto, se evidencian diferentes campos como en el sector de la construcción y el industrial como lo es la elaboración de cerámicas y ladrillos con lo que se pueden crear

- Membranas impermeables
- Protección de tuberías
- Soportes para muros de contención
- Soportes de excavaciones
- Estabilización de suelos

Los suelos arcillosos no dependen del tipo del tipo de aplicación, sino de su sometimiento ante diferentes ensayos de laboratorio para ser evaluado el mejoramiento. Los materiales principales de material reciclado para dichas aplicaciones son: el plástico específicamente el PET, los desechos industriales como lodos aceitosos, caucho triturado, cascara de arroz, adicional a esto los materiales de construcción que se obtienen de las diferentes demoliciones empleando el ladrillo y el concreto, adicional a este, se encuentran, los geopolímeros y geotextiles. Es importante mencionar que los resultados varían de acuerdo a la magnitud y/o proporción empleada en la aplicación, tal como se demuestra a lo largo de la revisión.

- Resultados para el objetivo específico 2

De acuerdo al objetivo específico 2 se pretende determinar los conceptos técnicos, y las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos evaluados en Colombia a partir de la normativa vigente, que de acuerdo a la tabla cuatro se evidencian diferentes normas, entre ellas leyes y decretos los cuales rigen no solo el uso de suelos arcillosos, sino el manejo, disposición y mejoramiento de los materiales dentro de las cuales se encuentran:

- Decreto Ley 2811 de 1974
- Política del ministerio de ambiente (1995)
- Acuerdo 344 de 2008
- Invias (2012)

- Resolución 1407 de 2018
- Resolución 932 de 2015
- Resolución 472 de 2017

Adicional a lo anterior se evidencian las propiedades mecánicas que se analizan en suelos arcillosos tales como resistencia a la tracción, compresión, ductilidad, rigidez lo que permita demostrar la efectividad de estas.

En cuanto a los conceptos y clasificación, se puede evidenciar en la figura uno dos y tres del documento evidenciando los grupos, estructura y tipos de estas, las cuales tienen ciertas propiedades que fueron descritas mediante los siguientes ensayos de laboratorio principalmente como el de granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica, compactación estándar, compresión. De modo que sea posible definir a las arcillas como un tipo de suelo que al contacto con el agua o algún fluido se vuelve plástico y al perder humedad se endurece de manera considerable, el cual se encuentra conformado por las partículas más finas del suelo principales con diámetros inferiores a 0.005 mm. generalmente, que a su vez en su mayoría tienen origen inorgánico y presentan partículas de hierro, de magnesio, aluminio, son impermeables debido a la propiedad de compacidad.

- **Resultados objetivo específico 3**

El acuerdo al objetivo 3 que busca relacionar la viabilidad de las diferentes aplicaciones para la implementación de materiales reciclables en suelos arcillosos, generando recomendaciones para un adecuado desarrollo de la aplicación en la ingeniería civil se evidencia un análisis teórico principalmente que cumplen con cada uno de los objetivos y a su vez son referencia de actualización y síntesis conceptual sobre el mejoramiento de suelos arcillosos determinando la necesidad del cumplimiento de las normas de construcción como el Invia y el ASTM, así mismo el continuar con este tipo de estudios con el fin de ampliar los materiales y aplicaciones para futuras investigaciones lo que permite un mayor campo comparativo y rango de aprovechamiento. Dicha viabilidad se hace efectiva en cada una de las aplicaciones vistas las cuales comprueban y demuestran el mejoramiento de los suelos, junto con las diferentes recomendaciones que se describen en el apartado que lleva el mismo nombre

Finalmente, a partir de la revisión teórica es posible identificar algunas conclusiones de la revisión y proponer recomendaciones que permitan incentivar el uso de estos mecanismos de investigación y este a su vez reforzar, actualizar y sintetizar las diferentes aplicaciones, las cuales

no solo permiten el desarrollo del objetivo específico tres sino darle un contexto y fin al proyecto. Lo anterior se puede identificar de manera general a través de la tabla 6: resultados.

Tabla 6. Resultados

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Revisión Teórica	Documento en general	Responde al objetivo general
Conceptos generales de suelos arcillosos.	Marco de referencia Marco Conceptual Conceptos Generales: Arcillas, Sensitividad, Arcillas expansivas, Ensayos de laboratorio	Responde al objetivo específico 1
Aplicaciones en la ingeniería	Evaluación de suelos arcillosos Comportamiento de suelos arcillosos Caracterización de suelos arcillosos Factores que afectan a las arcillas Suelos reciclados con PET Suelos con adición de geotextil tejido Suelos con uso de residuos industriales, mejorados con cascara de arroz y caucho	Responde al objetivo específico 2
Conclusiones y recomendaciones de acuerdo a la revisión teórica	Resultados e impactos Conclusiones y recomendaciones	Responde al objetivo específico 3

Nota: Resultados obtenidos de la revisión teórica. Por Olaya L, 2021

Impactos

Impacto ambiental

Con el desarrollo del documento se espera concientizar de la importancia que tiene la reutilización de materiales reciclables y el uso en el campo de la ingeniería civil, sin perder el rumbo de la calidad y el cumplimiento de las construcciones y los materiales

Impacto institucional

De acuerdo a la revisión teórica se pretende dar una noción, clara y actualizada del mejoramiento de suelos arcillosos, los conceptos generales junto con su caracterización, la evaluación de propiedades físicas y sus diferentes aplicaciones en la ingeniería civil.

Con lo que se pretende facilitar el desarrollo de futuras investigaciones y/o aplicaciones de un tema en específico y con esto, fomentar estas revisiones, además de impulsar el campo de la ingeniería en general. Dando pie a nuevas prácticas y en la industria y el sector de la construcción. Dentro de un marco que se rija en lo normativo, dando cumplimiento a los ensayos, incentivando la academia, y a la industria a través de nuevas aplicaciones y prácticas.

Conclusiones

Las arcillas se consideran como cualquier depósito o sedimento mineral el cual se encuentra formado por partículas cuyo tamaño es menor a los 0.002 mm, sin embargo, algunas organizaciones como el Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S, Army corps of Engineer's) las categorizan desde 0.005 mm teniendo en cuenta que sean suelos finos. Este además es un material presente en todo tipo de suelo lo que puede ser una ventaja o por el contrario un limitante en el desarrollo de una construcción civil. Para evitar que represente un inconveniente ingenieril en la construcción de obras civiles se debe evitar que sufra de expansión ya que poseen una baja permeabilidad, poca aireación e infiltración de agua, las arcillas son consideradas como un catalizador en la formación de estructuras óptimas gracias a la retención alta de nutrientes y mineralización de materia orgánica, a pesar de esto, pueden tener alta probabilidad de erosión.

Dentro de la ingeniería civil las arcillas son utilizadas en un gran campo de aplicación tal como la construcción y a nivel industrial como la elaboración de ladrillos o cerámicas, así mismo el tipo de aplicaciones a diferentes escalas como la creación de membranas impermeables, soporte de excavaciones, protección de tuberías, cementos, y estabilización de suelos generalmente, con el fin de analizar e incrementar los estudios y aplicaciones, ya que permite una actualización del tema identificando los conceptos generales de las arcillas y los diferentes campos de análisis que se puede abordar

El mejoramiento de suelos arcillosos no solo depende del tipo de aplicación al que este vaya a ser utilizado, sino que debe ser analizado desde diferentes ensayos que deben ser tenidos en cuenta en cualquier uso, tales como el de granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica, compactación estándar, comprensión simple entre otros. Además, es importante tener en cuenta los materiales con los cuales se pretende mejorar las arcillas, tales como PET, geopolímeros, desechos industriales (cáscara de arroz, lodos aceitosos, caucho triturado, materiales residuales de construcción producto de las demoliciones como ladrillos y concreto), geotextiles, entre otros. Para los desechos industriales es común analizar y caracterizar las mezclas suelo-desechos a partir de la evaluación de las propiedades mecánicas como resistencia a la tracción, compresión, ductilidad, rigidez que permita demostrar la efectividad de estas.

Puntualmente, en la revisión se observó y logró determinar que cada uno de los materiales empleados son efectivos para el mejoramiento de suelos. En el caso específico de las fibras de plástico las propiedades mecánicas varían en función al porcentaje y la longitud, ya

que entre mayor sea su longitud sus propiedades mejoran, siempre y cuando sean homogéneas, algo que sucede cuando están a menor longitud, por tanto, se propone que al implementar longitudes amplias se asegure de la homogenización de estas debido a que presentan cohesión con poca variabilidad, sin embargo, los resultados de los límites con fibra no son confiables por el hecho de controlar los porcentajes.

Por su parte, la implementación de residuos de construcción reduce el índice de plasticidad, al igual que el índice de hinchamiento, mejora la compactación, mejorando la resistencia y permitiendo estructuras más resistentes, esto sucede de la misma manera teniendo en cuenta los diferentes porcentajes de mejoramiento con geotextiles.

Una vez analizados los residuos industriales, se identificó que la cohesión del suelo mejora, junto con el ángulo de fricción, mejoran el módulo de elasticidad, resultados que se obtienen mediante la metodología experimental específica de diferentes porcentajes, pero que se hace necesario expandir el campo en este tipo de investigaciones. Finalmente, para el uso de lodo aceitoso permite efectivamente la estabilización de suelos, donde los resultados y ensayos que se llevaron a cabo del CBR se refleja reflejan un aumento de la resistencia. Se considera como necesario e importante el uso de este tipo de materiales reciclables por las industrias y del campo de investigación para la ingeniería civil con el fin de reducir los impactos ambientales, generando así no solo la concientización con el medio ambiente si no con el crecimiento indirecto en los todos los campos.

Gracias a la revisión teórica, se reduce el impacto ambiental mediante el uso de materiales reciclables dentro de un marco normativo que busca disminuir este impacto y aumentar la reutilización de los mismos, sin embargo, es necesario actualizar algunos términos legales en cuanto al uso de las diferentes aplicaciones, puesto que limita el desarrollo de próximas investigaciones dentro del campo que se evidencio a lo largo de la monografía. No solo refiriéndose a los suelos arcillosos si no a cada material con el cual se pretende mejorarlo.

Recomendaciones

En términos generales se deben, es necesario el cumplimiento de aceptación de materiales de construcción para uso y ejecución de obras que principalmente se encuentran en la normativa del INVIAS y de los ensayos ASTM, es necesario la motivación en este tipo de aplicaciones que permitan en desarrollo del campo de todo el campo de la ingeniería civil con el fin de aumentar el alcance de las aplicaciones e investigaciones.

Se recomienda incrementar los estudios con diferentes materiales, teniendo en cuenta las ventajas que tienen el poder recicla y utilizar un material, adicional para futuras investigaciones tener en cuenta en el alcance, los materiales e insumos para los laboratorios y ensayos debido a que fue un limitante a lo largo de la revisión, así mismo analizar diferentes escalas con los mismos materiales lo que permite un mayor campo comparativo y con este un mayor rango de aprovechamiento.

Es necesario además de contemplar los requisitos de aceptación de suelos para construcción y uso es necesario tener en cuenta que tipo de normativa rige y regula los materiales reciclables con el fin de dar un mayor aprovechamiento a la investigación al suelo y una posible construcción.

Finalmente se hace necesario continuar con este tipo de documentos que permiten la actualización en el campo de la geotecnia principalmente, teniendo en cuenta el norte normativo y las aplicaciones que den fe del uso efectivo para próximas construcciones, sin contar del impacto ambiental que este genera en pro de la calidad de vida humana.

Referencias

- Alarcón, J., Jiménez, M., & Benítez, R. (2020). Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitoso. *Ingeniería de Construcción RIC*, 35(1), 5-20. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v35n1/0718-5073-ric-35-01-5.pdf>
- Arbelaez Barón, J., & Góngora Plazas, D. (2019). Refuerzo de estructuras terreas utilizando tereftalato de polietileno (PET). [Trabajo de grado, Universidad de Ibagué]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unibague.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12313/1069/1/Trabajo%20de%20grado.pdf>
- Braja. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica (Cuarta Edición ed.). Cengage Learning. https://www.academia.edu/36776734/Fundamentos_de_ingenieria_geotecnica_braja_m_das
- Carreño, P. (9 de Agosto de 2016). *Estabilización de suelos con agregados reciclados*. Revista Vial. <http://revistavial.com/estabilizacion-de-suelos-con-agregados-reciclados/>
- Carreño, P. (2016). Estabilización de suelos con agregados reciclados. Revista Vial. Obtenido de <http://revistavial.com/estabilizacion-de-suelos-con-agregados-reciclados/>
- Carvajal, A., & Garzon, R. (2019). Evaluación de la resistencia de un suelo areno arcilloso con refuerzos de fibras PET. [Trabajo de grado, Universidad Piloto]. Repositorio Institucional. <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/6482/Trabajo%20final%20monografia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Díaz, J., & Bruguera, M. (Febrero de 2008). (2008). Síntesis de información y artículos de revisión. *ACIMED*, 17(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1024-94352008000200007&lng=es&tlng=es.
- Estabragh, A. N. (2012). Behavior of cement-stabilized clay reinforced with Nylon fiber. *Geosynthetics International*, 85-92. <https://doi.org/10.1680/gein.2012.19.1.85>
- García Romaero, E., & Suárez Barrios, M. (2015). Las Arcillas: Propiedades y usos. [Informe de práctica, Universidad Complutense (Madrid) y Universidad de Salamanca]. Obtenido de <http://campus.usal.es/~delcien/doc/GA.PDF>
- García Santos, X. J. (2019). Mejoramiento de un suelo arcilloso de la localidad de Pacaisapa – Ayacucho utilizando residuos industriales para evaluarlo en muro hipotético de tierra estabilizado mecánicamente (MSEW). [Trabajo de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Institucional.

- https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/626124/garcia_sx.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Gomez, L., & Parra, Y. (2015). Influencia de fluidos en el comportamiento de la doble capa difusa en arcillas. [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2373/1/Influencia-fluidos-en-comportamiento-doble-capa-difusa-en-arcillas.pdf>
- Higuera Sandoval, C., Gómez Cristancho, J., & Pardo Naranjo, Ó. (Junio de 2012). Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. *Facultad de Ingeniería Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, 21(32), 21-40. <https://www.redalyc.org/pdf/4139/413940771003.pdf>
- Lévano, A. C. (2007). Investigación cualitativa: diseños, evaluación del rigor metodológico y retos. *Liberabit*, 71-78. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1729-48272007000100009&script=sci_arttext&tlng=en
- López, J. A. (2013). Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET). [Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería de Antioquia]. Repositorio Institucional. https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/265/LopezJose_2013_SuelosArcillososReforzados.pdf;jsessionid=0DBE4A5A68BBFE048ADBB633E135B959?sequence=7
- Martínez, M. L. (2019). ¿Por qué enunciar las limitaciones del estudio?. *Medisuir*, 17(1), 10-12. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/ms/v17n1/1727-897X-ms-17-01-10.pdf>
- Moreno, E. (2018). Estabilización de Suelos Arcillosos con Residuos de la construcción y demolición. [Tesis doctoral, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Repositorio Institucional <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/2319/Estabilizaci%C3%B3n%20de%20suelos%20arcillosos%20con%20residuos%20de%20la%20construcci%C3%B3n%20y%20demolici%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ospina, C., & Villabon, J. (2017). Evaluación de la resistencia de un suelo blando típico de la formación Sabana de Bogotá tratado con un geopolímero de base arcillosa. [Trabajo de grado, Universidad La Gran Colombia]. Repositorio Institucional. <https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5533/Escrito%20de%20Proyecto%20de%20Grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rojas, L., & Rivera, S. (2014). Caracterización de suelos arcillosos desecados al occidente de la Sabana de Bogotá. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/707/Caracterizacion%20de%20su>

- elos%20arcillosos%20desecados%20al%20occidente%20de%20la%20Sabana%20de%20Bogota.pdf?isAllowed=y&sequence=1
- Rondon, H. A. (2011). Evaluacion del comportamiento de arcillas sometidas a diferentes tiempos de exposicion a altas temperaturas. *Ecuela de ingenieria de Antioquia, Medellin* (16), 175-187. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n16/n16a14.pdf>
- Santos, X. (Julio de 2019). <https://repositorioacademico.upc.edu.pe>. Obtenido de Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/626124/garcia_sx.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Tran, K. S. (2018). Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils. *Transportation Geotechnics*, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.07.003>
- Triana, C., & Villamizar, D. (2010). Estudio del comportamiento de suelos arcillosos despues de la adición de geotextil tejido T-2400. [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana]. Repositorio Institucional. http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital_19974.pdf
- Zaimoglu, A. &. (2012). Strength Behavior of Fine Grained Soil Reinforced with Randomly Distributed Polypropylene Fibers. *Geotechnical and Geological Engineering*,, 197-203. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9462-5>
- Zapata, R. (2018). Tipos de suelos: caracterización de suelos arcillosos y limosos. [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Rosario]. Repositorio Institucional. <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/TIPOS%20DE%20SUELO.pdf>