Revisión de las tendencias investigativas acerca de la respuesta mecánica de suelos estabilizados con biopolímeros

Angela Marcela Pineda lozano & Camilo Andrés Martínez Riascos

Dirigido Por: Phd Jorge Arturo Pineda Jaimes

Marzo 2021.

Universidad Distrital Francisco José De Caldas.

Facultad Tecnológica – Proyecto de Ingeniería Civil.

Trabajo De Grado, Modalidad Investigación.

Línea De Investigación: Geotecnia

Revisión de las tendencias investigativas acerca de la respuesta mecánica de suelos estabilizados con biopolímeros

ANGELA MARCELA PINEDA LOZANO

Cod. 20181579037

CAMILO ANDRES MARTINEZ RIASCOS

Cod. 20181579026

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero Civil

Dirigido Por

Phd Ing. JORGE ARTURO PINEDA JAIMES

Universidad Distrital Francisco José De Caldas.

Facultad Tecnológica – Proyecto de Ingeniería Civil.

Trabajo De Grado, Modalidad Investigación Documental.

Línea De Investigación: Geotecnia

Dedicatoria

Esta vez, sin ser egoísta, sino más bien, en un proceso autónomo de reconocimiento, dedico este documento, a cada uno de los pasos y esfuerzos que he realizado para llegar a este punto, a mi fuerza interior, a mi luz propia y a mi infinito amor, a esa capacidad grandiosa que la vida me ha dado para crecer y apropiarme de cada uno de los retos.

Me revindicó, y brindo este documento como un abrazo al esfuerzo de todos aquellos que siguen luchando y avanzando, creyendo en las oportunidades de la existencia.

Angela Marcela Pineda Lozano

Este proyecto está dedicado a las dos mujeres que más amo y estimo, mi madre y mi pareja, quienes, con gran amor en cada uno de sus concejos y caricias, han sabido ser mi pilar en los momentos más difíciles, evocando en mis todas las grandes capacidades que poseo, que me llevan a fabricar y materializar los deseos y anhelos propios.

A mi padre fallecido, el cual con orgullo compartiría la alegría y satisfacción del camino recorrido y el que aún falta.

Camilo Andrés Martínez Riascos

NOTAS DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Presidente del Jurado

_____

Firma del Jurado

_____

Firma del Jurado

Bogotá, 2021

Agradecimientos

Evocamos nuestros profundos agradecimientos a la Universidad Distrital Francisco José De Caldas, y todos los docentes, estudiantes, administrativos y demás personas, que se han comprometido a lo largo de los años con quienes hemos recibido formación para la vida y el campo laboral.

Extendemos nuestra gratitud a nuestras familias, quienes han sido fuerza de aliento y apoyo incondicional durante todas las etapas vividas en el desarrollo de esta fase de formación profesional.

Reconocemos en esta oportunidad de vida un espacio para luchar, crecer y sembrar; esperamos que, con la culminación de este proceso, nuestros caminos se orienten en los pasos del aprendizaje y la enseñanza, siendo recíprocos con las bendiciones obtenidas.

Agradecemos especialmente, al ingeniero Jorge Arturo Pineda Jaimes, por la paciencia, compromiso, apoyo, y conocimientos entregados durante la ejecución de esta investigación documental; por su orientación en nuevos caminos de aprendizaje, vitales en los campos de desarrollo y aplicación de la ingeniería civil, y geotecnia.

Resumen

El presente documento refleja un análisis fenomenológico sobre una investigación documental en relación con la trayectoria, avance, producción y aplicación de los biopolímeros en las diferentes industrias, resaltando las nuevas tendencias y líneas de investigación generadas para su uso dentro de los diferentes campos de la ingeniería civil.

El enfoque realizado se sustenta en los resultados obtenidos a través de investigaciones nacionales e internacionales, que apuntan a la evaluación de los cambios físicos, químicos y la respuesta mecánica del suelo, ante la exposición de cargas, cambios de humedad, entre otros, dependientes de la composición del suelo o de su clasificación, del ambiente en el que se encuentra y demás variables que pueden alterar la respuesta del material: suelo.

Basados en la información consultada, el documento además relaciona los ensayos pertinentes y adecuados para las evaluaciones mecánicas de las muestras tratadas y no tratadas del suelo, el lector encontrará una guía sencilla que le permitirá elegir los "ensayos" eficientes para la valoración de sus futuras investigaciones.

Además de mostrar los hallazgos relevantes y el análisis de algunos de los artículos de investigación consultados, las referencias bibliográficas relacionadas en el presente estudio permitirán a futuros investigadores soportar y aprobar los resultados obtenidos, garantizando de esta forma, parámetros de comparación científicos.

El compilado documental aportado por el presente estudio comprueba la aplicación de biopolímeros de origen natural, para el tratamiento del suelo, estabilizando sus propiedades y mejorando su respuesta ante fenómenos ajenos, bien sean naturales o de provocados por el hombre.

Además de abrir una puerta a diferentes investigaciones, el texto en desarrollo es una latente invitación para la evaluación de diferentes alternativas en respuesta a los cambios sociales, ambientales y culturales, en donde la ingeniería civil, geotecnia, da respuesta y se sustenta como un pilar de innovación y crecimiento.

Abstract

This document reflects a phenomenological analysis of a documentary investigation in relation to the trajectory, progress, production, and application of biopolymers in different industries, highlighting the new trends and lines of research generated for their use within the different fields of engineering. civil.

The approach carried out is based on the results obtained through national and international investigations, which point to the evaluation of the physical, chemical and mechanical response of the soil, in the face of load exposures, humidity changes, among others, depending on the composition of the soil or its classification, the environment in which it is found and other variables that can alter the response of the material: soil.

Based on the information consulted, the document also lists the pertinent and adequate tests for the mechanical evaluations of the treated and untreated samples of the soil, the reader will find a simple guide that will allow them to choose efficient "tests" for the evaluation of their future research.

In addition to showing the relevant findings and the analysis of some of the research articles consulted, the bibliographic references related in this study will allow future researchers to support and approve the results obtained, thus guaranteeing scientific comparison parameters.

The documentary compilation provided by this study, verifies the application of micro organisms, such as biopolymers of natural origin, for the treatment of the soil, stabilizing its properties and improving its response to foreign phenomena, whether natural or caused by man. .

In addition to opening a door to different investigations, the text in development is a latent invitation for the evaluation of different alternatives in response to social, environmental and cultural changes, where civil engineering, geotechnics, responds and is sustained as a pillar of innovation and growth.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 14
1. GENERALIDADES 16
1.1. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 16
1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 18
1.3. ANTECEDENTES 18
1.4. JUSTIFICACIÓN 27
2. OBJETIVOS 29
2.1. OBJETIVO GENERAL 29
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 29
3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS 30
3.1. INTRODUCCIÓN 30
3.2. MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN 30
3.3. PROPIEDADES DE LOS SUELOS A ESTABILIZAR 34
3.3.1. ESTABILIDAD VOLUMETRICA 35
3.3.2. RESISTENCIA 36
3.3.3. COMPRESIBILIDAD 38
3.3.4. DURABILIDAD 38
4. ENSAYOS MECÁNICOS SOBRE SUELOS ESTABILIZADOS 39
4.1. INTRODUCCIÓN 39
4.2. ENSAYOS DE RESISTENCIA AL CORTE 39
4.2.1. Corte directo 39
4.2.2. Ensayo triaxial CD 41
4.3. ENSAYOS DE RIGIDEZ 42
4.3.1. Columna resonante 42
4.3.2. Ensayo Triaxial 44

4.4. Ensayos para el estudio de la microestructura 50

4.4.1. Microscopia SEM 50

4.4.1. Lecturas de Rayos XDR 54

4.5. CONCLUSIONES 56

5. DISCUSIÓN DE LAS TENDENCIAS INTERNACIONALES DEL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS SUELOS ESTABILIZADOS 58

5.1. INTRODUCCIÓN 58

5.2. TENDENCIAS RELACIONADAS CON LA RESISTENCIA AL CORTE 59

5.3. TENDENCIAS RELACIONADAS CON LA MICROESTRUCTURA 68

6. conclusiones 74

BIBLIOGRAFÍA 78

ANEXOS 81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Producción de biopolímeros comerciales, reconocidos en el mercado datos recolectados a partir de la fuente: (J.A. Casas, V.E. Santos, & F. García-Ochoa, 2000). Fuente: Propia. 23

Figura 1-2 Composición de diferentes tipos de Gellan Gum. Fuente: (Ishwar B. Bajaj, Shrikant A. Survase., Parag S. Saudagar , & Rekha S. Singhal, 2007) 24

Figura 3-1 Estabilización química, a partir de (F. Rivera, Aguirre-Guerrero, Mejía de Gutiérrez, & Orobio, 2020). Fuente: PROPIA. 31

Figura 3-2 Proceso de electroósmosis. Fuente: (Piqueras Yepes, 2019) 32

Figura 3-3 Tipos de optimización de suelos arcillosos. Fuente: Propia. 35

Figura 4-1 Esquema aparato de corte directo. (Perez Ayala, 2016) 40

Figura 4-2 Envolvente de esfuerzos en el ensayo de corte directo. Fuente; (Das, 2013) 41

Figura 4-3 Configuración de las muestras para ensayo de columna resonante. Fuente: (Diaz, 2005) 43

Figura 4-4 Características de la muestra y de los equipos para realizar prueba Columna resonante, aplicando normatividad ASTM D4015. Fuente: (Candela Rozo , Clevel Noriega, & Torres Romero, 2020) 44

Figura 4-5 Tipos de ensayo triaxial. Fuente: PROPIA 46

Figura 4-6 Ensayo consolidado drenado CD. Fuente: Propia 47

Figura 4-7 Ensayo consolidado NO drenado CD. Fuente: Propia 48

Figura 4-8 Ensayo NO consolidado NO drenado UU. Fuente: Propia 49

Figura 4-9 Interacción de los electrones con la superficie. Fuente: (Cigarroa Mayorga, Vázquez- Vázquez, Rojas-Chávez, Hernández-Rodríguez, & Morales Bautista, 2021) 51

Figura 4-10 Electrones secundarios. Fuente: (Cigarroa Mayorga, Vázquez-Vázquez, Rojas-Chávez, Hernández-Rodríguez, & Morales Bautista, 2021)..... 52

Figura 4-11 Representación de electrones retro dispersados en diferentes elementos. Fuente: (Cigarroa Mayorga, Vázquez- Vázquez, Rojas-Chávez, Hernández-Rodríguez, & Morales Bautista, 2021)..... 53

Figura 4-12 Esquema de un microscopio electrónico de barrido. Fuente: (Cigarroa Mayorga, Vázquez- Vázquez, Rojas-Chávez, Hernández-Rodríguez, & Morales Bautista, 2021)..... 54

Figura 4-13 XDR muestra de suelo, composición mineralógica. Fuente: (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016)..... 55

Figura 4-14 XDR – lectura de rayos XDR, compuesto mineralógico. Fuente: (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016)..... 56

Figura 5-1 Ensayo triaxial UU en diferentes tipos de suelo, confinamiento de 103 kPa, con 1% de Xanthan Gum a) Arena limosa b) arena c) arcilla. Fuente: (Soldo & Miletic, 2019)..... 60

Figura 5-2 Resultados pruebas resistencia al corte, muestras tratadas y no tratadas. Fuente: (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016)..... 62

Figura 5-3 Dilatación y contracción de las muestras de suelo, tratadas con diferentes concentraciones de Agar, para un tiempo de curado de siete (7) días, para esfuerzos normales: 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, y 200 kPa. Fuente: (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016)..... 64

Figura 5-4 Resultados de compresión axial, muestras de suelos tratadas con Quitosano. a-b) Estado OC después de un (1) día. c-d) Estado OC después de 28 días, e-f) estado DC después de un (1) día, g-h) estado DC después de 28 días. 66

Figura 5-5 Imágenes SEM de muestras de suelos tratadas con Xanthan. a) Arcilla b) Arcilla c) Arena Limosa d) arena limosa e) arena f) arena..... 68

Figura 5-6 Imágenes SEM, **Lado izquierdo:** suelos tratados con biopolímero AGAR, concentración a)0% b)0.5% c)1% d)2% e)3%. **Lado derecho:** Unión entre

partículas del suelo tratado. a) Rellenos de poros b) Formación de agregados c) Revestimiento d) Puente de conexión. Fuente: (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016)..... 70

Figura 5-7 Imágenes ópticas de a) Partículas de suelo sin tratar, suelos tratados con Chitosan. b) condición de CC, c) a corto plazo y, d) estados de OC a largo plazo, diagrama esquemático de muestras de arcilla e-f) microescalas. Fuente: (Nader Hataf, Pooria Ghadir, & Navid Ranjbar, 2018)..... 71

Figura 5-8 Comportamiento ángulos de fricción y cohesión de las muestras tratadas y no tratadas de suelo. Fuente: PROPIA, a partir de datos de Fuente: (Nader Hataf, Pooria Ghadir, & Navid Ranjbar, 2018)..... 72

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Condiciones operativas para investigación. Fuente: (J.A. Casas, V.E. Santos, & F. García-Ochoa, 2000) 26

Tabla 4-1 Generalidades de ensayo triaxial. Fuente: (Notas Clase, 2020) 50

Tabla 4-2 Especificaciones del biopolímero de agar. Fuente: Laboratorios HiMedia 56

Tabla 5-1 Resultados pruebas resistencia al corte, muestras tratadas y no tratadas. Fuente (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016) 61

Tabla 5-2 Análisis de resultados de compresión axial y absorción de muestras tratadas y no tratadas con Chitosan, a partir de los datos de la Figura 5-3 Resultados de compresión axial, muestras de suelos tratadas con Quitosano. a-b) Estado OC después de un (1) día. c-d) Estado OC después de 28 días, e-f) estado DC después de un (1) día, g-h) estado DC después de 28 días. Fuente: Propia. 67

Tabla 5-3 Resultados ángulos de fricción y Cohesión de las muestras tratadas y no tratadas con diferentes concentraciones de Chitosan. Fuente. (Nader Hataf, Pooria Ghadir, & Navid Ranjbar, 2018) 72

INTRODUCCIÓN

Esto documento es un ejercicio de recopilación, análisis y depuración de información existente sobre las investigaciones realizadas con relación a la aplicación de biopolímeros para la estabilización de suelos como: arenas, gravas, residuos de excavación entre otros. Dentro del mismo se existe una revisión y evaluación frente a los cambios, avances, logros, ventajas y desventajas de cada uno de los procesos investigativos ejecutados a nivel mundial por diferentes profesionales interesados en la línea de investigación *Geotecnia.*

Los procesos de estabilización de suelos no tienen una fecha de inicio identificada, sin embargo, se reconocen procesos de mejoramiento en técnicas ancestrales para cultivos, construcción de acueductos, infraestructura y demás necesidades de los asentamientos. En la búsqueda de métodos para el aprovechamiento de los recursos, se puede aseverar que el proceso de estabilización de suelos ha evolucionado a tal punto de involucrar varias ciencias y profesiones, desde ciencias exactas como matemáticas, física, química, fisicoquímica hasta mineralogía, geología entre otras.

Dentro del mercado se puede encontrar una gran variedad de agentes estabilizantes, todos de diferentes orígenes, tales como: natural, artificial o mixto, la elección se da bajo parámetros multicriterio de los profesionales involucrados, asociando su decisión a una evaluación de costos, practicidad, tiempo y accesibilidad; no obstante, todos los insumos estabilizantes representan e infieren un cambio significativo en los suelos tratados.

Cabe resaltar, que en Colombia y a lo largo de su extensión territorial, son muy pocos los proyectos que realizan la estabilización de suelos, y mucho menos la estabilización de suelos con el uso de biopolímeros, lo anterior bajo la falta de información sistematizada y la actualización de los conocimientos para ejercicios de prueba y error en las actividades ejecutadas en campo y durante la formación académica.

Sin embargo, debido a los requerimientos mundiales para la protección del ambiente y todas las especies del entorno que lo habitan, a través de las entidades gubernamentales y los centros de estudio e investigación, se adelantan labores para el desarrollo de nuevas técnicas que permitan el aprovechamiento, re-uso, de los residuos, especialmente residuos de construcción.

La variedad de agentes estabilizantes que se describen en el presente trabajo de grado, conforma una lista interminable de nuevos insumos, cuyo potencial uso va ascendiendo según las necesidades y conocimientos de los profesionales a cargo; cada uno de los biopolímeros mencionados contará con descripciones someras sobre los procesos de investigación, los materiales, la estructura microscópica del suelo, y los resultados obtenidos.

En este documento constituye una revisión documental a manera de construcción del estado del arte, donde se presentan los siguientes capítulos.

Capitulo No. 1: *Generalidades:* Se realiza una descripción breve de la problemática, antecedentes y justificación del presente estudio.

Capitulo No. 2: *Objetivo:* Determina el alcance del documento en desarrollo.

Capitulo No. 3: *Estabilización de suelos:* Describe los diferentes métodos aplicados para la estabilización de los suelos y las propiedades sobre las cuales se realiza la optimización.

Capitulo No. 4: *Ensayos mecánicos sobre suelos estabilizados:* Enuncia los diferentes ensayos a tener en cuenta a la hora de analizar las muestras tratadas y/o mejoradas con la aplicación de biopolímeros.

Capitulo No. 5: *Discusión de las tendencias internacionales del estudio del comportamiento mecánico de los suelos estabilizados:* Enuncia las principales investigaciones sobre suelos mejorados con la aplicación de biopolímeros y los resultados obtenidos.

1. GENERALIDADES

1.1. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los residuos de suelo provenientes de excavación habitualmente son dispuestos en zonas de material de disposición de sobrantes (ZODME), en terrenos baldíos o zonas deshabitadas, variando según la supervisión del proyecto, las políticas de cumplimiento de las actividades encargadas y demás que se den en el desarrollo, lo que implica que dicha materia se convierte en un problema a la hora de colocación final.

Paralelamente, sin importar el tratamiento que se realice, estos suelos cambian las condiciones ambientales del entorno, transformando y afectando el ecosistema natural de la región donde se genere, por ende, conforman un poco de contaminación y exposición de desastres.

En los trabajos de construcción, se potencia el uso de estos residuos, no obstante, a la hora de emplear presentan grandes variaciones, como: cambios volumétricos, aumento de relación de vacíos, disminución de resistencia al corte, contaminación y alteración de su estado natural, lo que finalmente afecta en sus comportamientos mecánicos, razones suficientes para ser desechados y poco usados en las obras.

A la fecha, la mayoría de las investigaciones nacionales sobre estabilización de suelos sugieren la adición de polímeros y/o sustancias químicas que aumentan y mejoran las características del suelo, a lo que normalmente se le conoce como mejoramiento químico del suelo; no obstante a nivel internacional surge el interés en el comportamiento mecánico del suelo estabilizado de forma natural, en donde se añade bacterias o enzimas; esta estabilización es conocida en el medio como MICP (Precipitación de Carbonato de Calcio Microbiológico), proceso usado normalmente en los suelos de grano grueso como la arena; en donde el micro organismo celular (bacteria o enzima), cuenta con la capacidad de producir o desarrollar estructuras minerales dentro de su cuerpo, tejido y ambiente en el que se desenvuelve. . (Dimitrios & Lyesse, 2019)

La estabilización conocida como cementación requiere de un riguroso cuidado, dado que es necesario crear ambientes controlados en donde el micro organismo pueda desarrollar sus propiedades físicas y biológicas que impactan sobre el mejoramiento mecánico del suelo a mejorar; cabe agregar que la estabilización biológica constituye un horizonte viable en la rama de la ingeniería geotécnica, dado que es allí donde se sostiene de forma tangible, bajo modelos matemáticos e investigaciones que dan pruebas necesarias de concepto sobre MICP y su potencial vinculación a las aplicaciones de la ingeniería.

Simultáneamente se encuentran estudios referentes sobre la estabilización física de suelos con bio polímeros, lo que se refiere a la inclusión de polisacáridos de origen natural; dicha estabilización presenta grandes ventajas sobre MICP, dado que es aplicable sobre suelos de cualquier tamaño granular, sin mayor rigurosidad en el control del ambiente propio para su desarrollo, además de presentar oferta en el mercado a través de proveedores encargados de la producción de biopolímeros (origen natural) listos para aplicar en obras de ingeniería geotécnica.

Dentro de los múltiples biopolímeros encontrados en la naturaleza, se encuentra que son altamente eficientes en el aumento de la capacidad portante de suelo en condiciones de mezcla húmeda y seca; en donde se destaca la eficiencia del biopolímero en mezclas húmedas donde es dos o tres veces mayor que en la mezcla seca (Mohamed & Masaki , 2017), además de la interacción microbiológica se realiza un recubrimiento a las partículas, creando enlaces entre las mismas que se encuentren distantes. (Soldo & Miletic, 2019).

En Colombia, a la fecha se ejecutan proyectos de estabilización de suelos a través de mejoramientos químicos, en los que se incluyen aditivos como cemento, que representan contaminantes nocivos para el ambiente, razón por la cual desde el planteamiento de la agenda de Desarrollo Sostenible (Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030) se incentiva la aplicación de métodos de ingeniería sustentables y la creación de nuevas tecnologías y/o procesos que garanticen la conservación de materias primas e insumos ofrecidos por la naturaleza sin que se afecte la población. En virtud de lo anterior, se plantea la optimización del uso de suelos provenientes de

excavación, desechados por sus bajas propiedades mecánicas al ser expuestos a cargas y descargas, razón por la cual, a través de la adición de biopolímeros de origen natural, podrían ser usados en la cotidianidad de las obras de ingeniería.

Ahora bien, algunos ingenieros realizan la utilización de este material, sin antes evaluar y mejorar sus condiciones, exponiendo a los usuarios finales de los bienes o servicios relacionados, a proyectos de baja calidad y con futuros costos de mantenimiento, reparación y posiblemente demolición y construcción nueva, lo que proporcionalmente aumenta la contaminación ambiental.

Por lo anterior, se hace necesario indagar la estabilización física de los suelos provenientes de excavación, a través del uso de biopolímeros de origen natural (amigables con el ambiente), que potencien las cualidades mecánicas de dichos compuestos, de tal forma que se utilicen nuevamente en las obras y se evite su disposición final sin aprovechamiento alguno

1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuáles son las tendencias investigativas a nivel nacional e internacional acerca de la respuesta mecánica de suelos estabilizados con biopolímeros?

1.3. ANTECEDENTES

Por muchos años a las diferentes necesidades que se han planteado en el área de ingeniería civil se han dado respuestas prácticas, rentables, y eficientes a corto y largo plazo, pero, sobre todo, han resultado invasivas con el ambiente en el que se ejecutan.

Se conoce a nivel mundial diferentes cifras de contaminación ambiental que se generan en virtud de procesos constructivos derivados de cualquier línea, bien sea: desarrollo de viviendas, industria, comercio, saneamiento básico, vías, transporte, entre otros; bajo las anteriores situaciones es indispensable citar: “las ciudades del mundo ocupan solo el 3% de la tierra, pero representa entre el 60% y el 80% del consumo de energía y el 75% de las emisiones de carbono” (ONU, 2020); por lo anterior, es indispensable fortalecer líneas de investigación que proyecten mitigar los impactos ambientales negativos per capitas en los diferentes territorios, redoblando esfuerzos

que protejan y preserven los ecosistemas y permitan de manera paralela el desarrollo socio-económico y cultural de la población mundial.

A causa de lo expuesto diferentes profesionales, entidades privadas, públicas y mixtas han incursionado en el planteamiento de alternativas amigables con el ambiente y que a su vez permitan continuar ejecutar actividades naturales del crecimiento poblacional; dichas soluciones se trabajan desde diferentes líneas de la ingeniería civil, tal como hidráulica, estructuras, vías y geotecnia.

El desarrollo del presente documento tiene como fin contextualizar, evaluar, discutir y concluir las ventajas, desventajas y demás matices que se generan sobre el aprovechamiento de residuos granulares provenientes de excavación, dado que durante mucho tiempo han sido desechados, convirtiéndose en agentes contaminantes; así mismo es pertinente precisar que sobre el insumo a estudiar se tendrán en cuenta las propiedades dinámicas en muestras tratadas y no tratadas con la acción del biopolímero.

En el desarrollo del presente documento, el lector conocerá múltiples investigaciones realizadas a nivel internacional en donde el objetivo principal se encuentra concentrado en el estudio de las propiedades dinámicas de muestras de suelo tratadas con diferentes biopolímeros o aditivos amigables con el ambiente, que de forma general aumenta la posibilidad de uso y reúso de diferentes suelos o residuos granulares.

(Estelle Delfosse - Ribay, Irini Djeran-Maigre, Richard Cabrillac, & Daniel Gouvenot, 2004), realizan un estudio experimental en donde se evalúa el comportamiento mecánico de un suelo tratado y no tratado (arena), al ser estabilizado con tres agentes diferentes: silicato de sodio, lechada de cemento, lechada de mineral; a través de los ensayos: columna resonante y ensayo triaxial cíclico. En el desarrollo de la investigación se realiza la estabilización química del suelo, obteniendo mayor resistencia en las muestras tratadas con lechada de cemento, sin embargo, no realizan aplicación de biopolímeros o bacterias.

(Ilhan Chang & Gye-Chun Cho, Geotechnical behavior of a beta - 1,3/1.6-glucan biopolymer - treated residual soil, 2014), fue un estudio realizado para evaluar la resistencia del suelo residual proveniente de Corea tratado con el biopolímero Beta – 1,3/1,6 glucan, encontrando de esta forma efectos positivos sobre el aumento de resistencia al corte del suelo, sin embargo, no existen cambios positivos en la compresión axial. La investigación recalca el inicio de nuevos campos de aplicación e investigación para el uso de los biopolímeros en la ingeniería de geotecnia, visionando a su vez, métodos amigables con el medio ambiente.

(Ilhan Chang & Gye-Chun Cho, Geotechnical behavior of a beta - 1,3/1.6-glucan biopolymer - treated residual soil, 2014), el estudio se concentró en el análisis y comparación de resultados sobre muestras de suelo residual tratado y no proveniente de Corea; estabilizado mediante la aplicación de un biopolímero de origen natural. La muestra de suelo fue caracterizada mediante los siguientes ensayos: límites de atterberg, índice de plasticidad, entre otros. Bajo el análisis de la investigación, se concluye: El biopolímero no mejora la compresión axial, sin embargo, optimiza notablemente la cohesión y la fricción interna entre las partículas de suelo, incidiendo directamente sobre la resistencia al corte.

(Jooyoung Im, An T.P. Tran, Ilhan Chang, & Gye-Chun Cho, 2016), en respuesta a los requerimientos ambientales y en pro de la preservación del medio ambiente, se realiza la validación de otros estudios a través de la exploración e investigación de la estabilización de una muestra de suelo (arena) mediante el uso de un biopolímero denominado Gellan Gum y Goma Xantana; el estudio realizó diferentes pruebas de columna resonante en las muestras tratadas y no tratadas, concluyendo afectaciones dinámicas sobre la arena, dado que la porosidad inicial es resuelta por el biopolímero agregado. El biopolímero aumenta la disipación de energía, lo que permite una relación de amortiguación mayor a diferencia de las muestras de suelo no tratadas. Es de resaltar que esta investigación arrojo mejores resultados frente a la reacción genero la Goma Xantana en comparación de la Gellan Gum.

(Ishwar B. Bajaj, Shrikant A. Survase., Parag S. Saudagar , & Rekha S. Singhal, 2007), el documento plasma la investigación realizada entorno a la producción,

optimización del biopolímero Gellan Gum, teniendo en cuenta el medio del cultivo y el ambiente en el cual se desarrolla, entendiendo a su vez toda la micro estructura y los enlaces creados a la participación de nuevas encimas y/o fermentantes. El artículo es una revisión documental y experimental frente a los procesos de producción y transformación de los componentes que generan el biopolímero antes mencionado, mostrando su incidencia en industrias alimentarias y farmacéuticas, generando la posibilidad de nuevos campos de aplicación, dado las múltiples ventajas y características que desarrolla la bacteria, según sea su campo. Cabe resaltar, que el informe identifica los altos costos posteriores al proceso de producción, los cuales pueden ser solventarse aumentado el volumen generado del biopolímero, el uso de insumos agrícolas, entre otros; esto puede incentivar su uso en nuevas industrias y aumentar el rendimiento, entre ellas: ingeniería en geotecnia.

(Ilhan Chang, Awlia Kharis Prasidhi, Jooyoung Im, Hyun-Dong Shin , & Gye-Chun Cho, 2015), teniendo como precedente las erosiones presentadas en el suelo, muchas de ellas generadas a partir del cambio climático o las variaciones bruscas del ambiente o entorno del suelo, la poca retención de humedad o la ausencia de cohesión entre las partículas, los autores buscan alternativas sustentables y amigables con el medio ambiente, por ende, continuando con líneas de investigación novedosas, analizan la influencia de los biopolímeros para la recuperación de suelos y evitar su posible erosión. En su proceso de investigación, validan un nuevo método que mejora la cohesión de las partículas, agregando a los suelos un biopolímero de origen natural, incentivando a su vez el crecimiento de vegetación en zonas áridas o desérticas, gracias a las propiedades del gel para la retención de líquidos y fortalecimiento de enlaces en la microestructura de la zona de estudio.

A diferencia de los estudios mostrados anteriormente, el documento “Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purpose” explora campos de recuperación y prevención de suelos erosionados; para Colombia, este estudio abre puertas en la recuperación de áreas de estudio destinadas a ZODMES, creados para la disposición de materias sin aprovechamiento alguno, por lo que se invita a los investigadores analizar la reacción de los biopolímeros sobre suelos con

características desérticas y/o donde existe la ausencia de vegetación o cambios del ecosistema generados por cambios climáticos.

Bajo el análisis efectuado en el documento, se encuentra un proceso interesante a favor de la agricultura (siembra de cultivos), aumento de resistencia para evitar la erosión del suelo, y retención de humedad; sin dejar de un lado las recomendaciones severas para la realización de estudios que comprueben la factibilidad, fiabilidad y aplicabilidad de los biopolímeros, entendiendo el crecimiento de la industria de producción y el volumen que se garantiza a futuro de estos insumos.

Por otro lado, se conoce que la mitad de la humanidad, 3500 millones de personas, vive hoy en día en las ciudades y se prevé que esta cifra aumentará a 5000 millones para el año 2030 (ONU, 2020), razones que sustentan el crecimiento acelerado de la construcción, la expansión territorial de municipios, ciudades y la migración de la población del campo; tras décadas de progreso, e investigaciones en diferentes líneas de profundización, para el tema en contexto existen diferentes estudios que soportan y validan la aplicación de biopolímeros para la estabilización de suelos.

(Dimitrios & Lyesse, 2019), es una articulo dedicado a la evaluación de causas y efectos generados gracias a la aplicación de biopolímeros en los suelos, se entiende a través del desarrollo del documento, un vacío notable a lo largo de los años en los campos de investigación dedicados a la geotecnia, en donde siempre se había ignorado la presencia de microorganismos vivos en el suelo, agentes que influyen en las características mecánicas, físicas y por supuesto químicas del suelo. Los autores, validan a través de un contexto argumentativo, y una investigación documental, la evolución y trascendencia que han tenido los microorganismos en el subsuelo y el suelo, aumentando el interés por parte de la ingeniería civil, después del año 2016.

Por otro lado, la producción de los agentes estabilizantes es una labor adicional que a la fecha realizan laboratorios químicos y asociaciones de investigación científica que experimentan diferentes campos, partiendo de análisis micro estructurales de diferentes materias primas.

En este ítem, se puntualizará la observación y procesamiento de información de estudios realizados en la explotación de biopolímeros, es decir, en la transformación de recursos primarios provenientes de origen natural a través de procesos físicos como cambios de temperatura, ambiente, saturación entre otros, que permiten la creación de nuevos enlaces químicos que cambian la naturaleza del insumo y garantizan su aprovechamiento en nuevos escenarios.

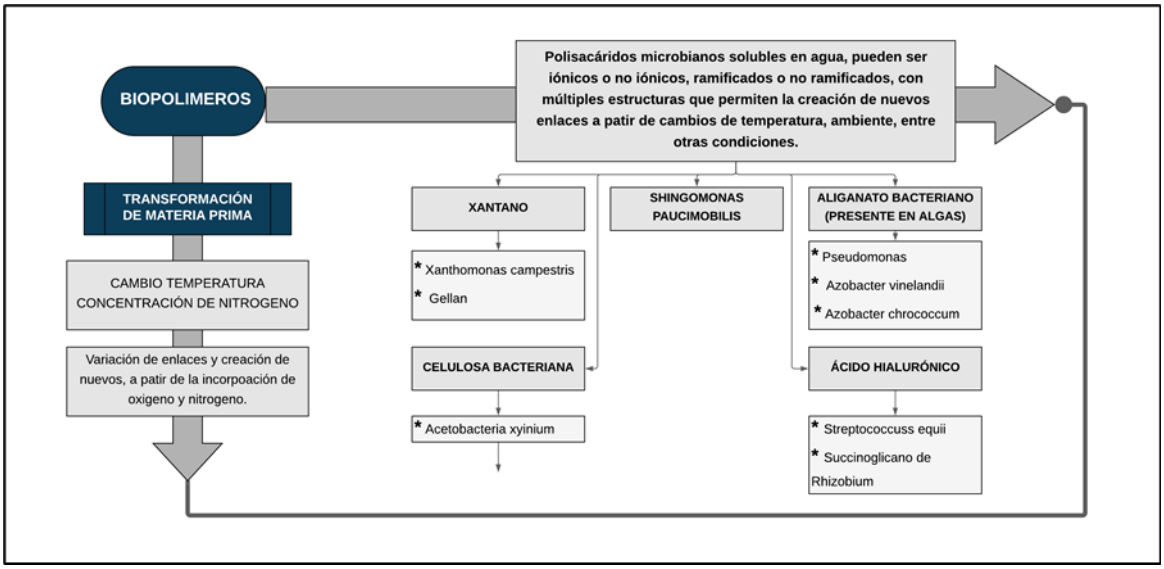


Figura 1-1 Producción de biopolímeros comerciales, reconocidos en el mercado datos recolectados a partir de la fuente: (J.A. Casas, V.E. Santos, & F. García-Ochoa, 2000). Fuente: Propia.

La Gellam Gum es el nombre comercial del polisacárido producido por la bacteria Pseudomonas elodea. Kaneko y Kang descubrieron el biopolímero en el laboratorio de la división Kelko de Merck y Co., en California, Estados Unidos, en 1978. Se realizaron diferentes pruebas de toxicidad para aprobación de uso alimentario, fase superada en el año 1988 en Japón (Ishwar B. Bajaj, Shrikant A. Survase., Parag S. Saudagar , & Rekha S. Singhal, 2007).

Como se indicó, la bacteria de la cual se extrae la Gellam Gum es sphingomonas paucimobilis, sin embargo, sus propiedades impiden el metabolismo fermentativo, es estrictamente aeróbica, es decir, requiere de ambientes ricos en oxígeno, en la se muestra la composición del biopolímero según los tipos encontrados en el mercado.

Según su composición, se han encontrado diferentes tipos de Gellam Gum, algunas de ellas se reflejan a continuación.:

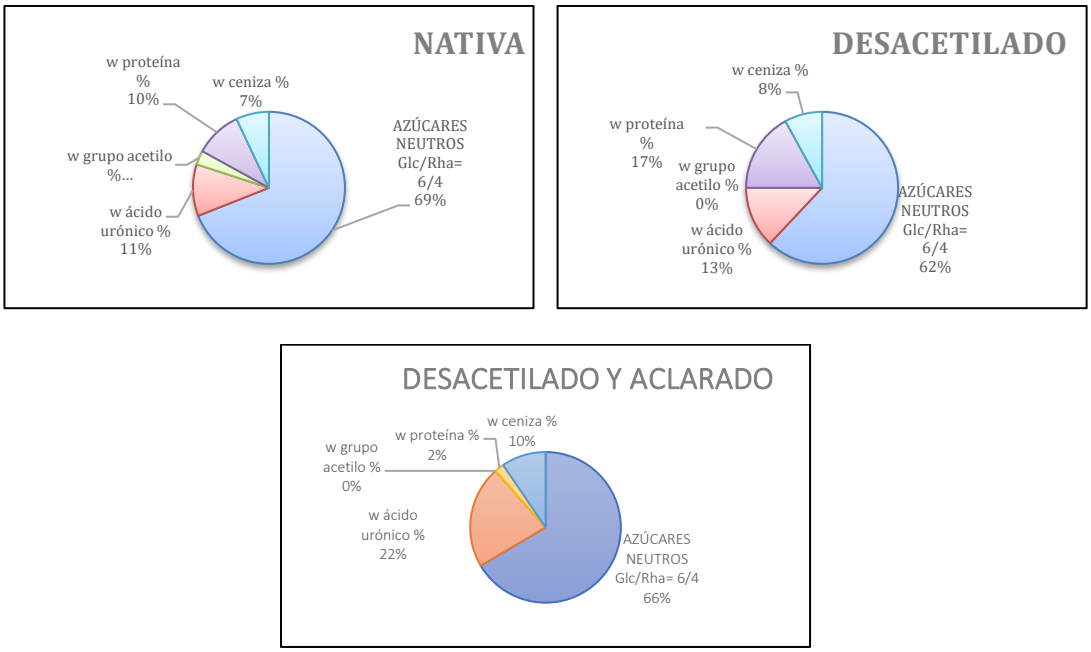


Figura 1-2 Composición de diferentes tipos de Gellan Gum. Fuente: (Ishwar B. Bajaj, Shrikant A. Survase., Parag S. Saudagar , & Rekha S. Singhal, 2007)

La desventaja de la bacteria de la cual se extrae el Gellan Gum es el alto contenido de glucosa, estas enzimas impiden la correcta síntesis del Gellan, por lo que a la fecha del estudio, las investigaciones apuntan a la transformación genética de la bacteria; adicionalmente, los ambientes en los cuales se desarrolla el microorganismo, deben ser ricos en carbono (C) y nitrógeno (N).

El carbono garantiza la cadena de producción, fortaleciendo directamente los rendimientos y las composiciones de los enlaces, su fuente primaria parte de carbohidratos tales como la glucosa, frutosa, maltosa, sacarosa, y manitol, los cuales pueden ser suministrados individualmente o combinados, en proporciones que varían entre el 2% y el 4%; esas combinaciones pueden aumentar la producción del Gellan Gum de 8 a 10 g/l.

Dentro de los múltiples estudios realizados, se han encontrado nuevas fuentes de carbono, suministradas usando latosa y suero de queso dulce, aumentando la producción de Gellan Gum a 10.2 y 7.9 g/l., respectivamente.

Si se aplicara la producción de Gellan Gum haciendo uso de latosa y suero de queso dulce, Colombia, podría incursionar en dicho mercado, lo anterior, teniendo en cuenta

la riqueza y alta producción de leche en toda la zona andina y los llanos orientales; no obstante, es importante crear rutas de control en dichas producciones, entendiendo que los productos lácteos provienen de la Ganadería, siendo este uno de los mayores campos de contaminación y daño al medio ambiente. Es indispensable controlar y retornar los recursos usados al ecosistema, tales como: agua y flora.

Ahora bien, se encontró que el almidón soluble aumenta la producción en un 24-28 g/l, siendo la fuente de carbono superior a las descritas.

Sin embargo, el carbono necesita ser transportado dentro del micro organismo, es por esto que los ambientes deben ser ricos en Nitrógeno, su calidad, concentración y flujo son el segundo aspecto más importante en la producción de Gellan Gum; bajo la recomendación y análisis del estudio, se sugiere usar Nitrógeno orgánico, siendo este un potencializador del crecimiento celular, a pesar de su comportamiento viscoso.

Como se mencionó, el ambiente juega un papel crucial en la producción de Gellan Gum, por lo que se deben garantizar ciertas condiciones para el crecimiento de dicha bacteria, entre estas el PH, recomendando así pH desde 6.5 a 7, valores que permiten el crecimiento celular.

Ahora, la Goma Xanthan gum, es biopolímero por el microorganismo Xanthomonas, su micro estructura presenta ventajas sobre la ya descrita Gellam Gum, lo anterior a sus propiedades espesantes, comportamientos seudoplasticos, y la adaptación estable que presenta ante diferentes pH y temperatura que se maneje en el ambiente en el cual se produce.

Las aplicaciones de este biopolímero son variadas y bastantes, sin embargo, sus fuertes son: la industria alimentaria y la producción de papel, dado que sus cualidades viscosas permiten reacciones favorables en agua fría y caliente, lo que aumenta el rendimiento y adaptabilidad al ambiente usado.

A la fecha, diferentes autores han evaluado las condiciones de producción de dicho biopolímero, cambiando variables como: tiempos de fermentación, concentraciones de oxígeno, concentraciones de nitrógeno, sin embargo, en cada uno de los casos se ha

obtenido transformaciones en la estructura molecular, y sus reacciones frente a características como la viscosidad y velocidad de reacción.

El estudio a analizar, es una investigación denominada Xathan Gum production under several operational conditions: molecular structure and rheological properties, en donde se estudia la producción del biopolímero bajo diferentes condiciones y variaciones, lo anterior con el fin de identificar los parámetros adecuados que aumenten el rendimiento y volumen de producción del compuesto.

Normalmente la bacteria se mantiene en temperaturas de 24°C, a continuación, se relacionan condiciones como temperatura, concentración de nitrato de amonio (NH_4NO_3.), y cambio de velocidad del agitador; es importante aclarar que el nitrato de amonio (NH_4NO_3.), es un compuesto químico que suele ser usado como fertilizante, soluble en agua e incoloro.

Tabla 1-1 Condiciones operativas para investigación. Fuente: (J.A. Casas, V.E. Santos, & F. García-Ochoa, 2000)

RUN	T(°c)	Velocidad del agitador (rev/min)	NO_3NH_4 (g/l)
1	25	210-1000	1.114
2	28	210-1000	1.114
3	31	210-1000	1.114
4	34	210-1000	1.114
5	28	210-1000	0.572
6	28	210-1000	2.288
7	28	100	1.114
8	28	300	1.114
9	28	500	1.114
10	28	800	1.114

El experimento se realizó para concentraciones de Goma Xanthan Gum entre 0.5 y 3. g/l, todas disueltas en agua destilada y 1 g/l NaCl (Cloruro de Sodio -Disolvente), evaluadas.

1.4. JUSTIFICACIÓN

En el marco de la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible 2030, es indispensable contemplar el uso de nuevas herramientas que mejoren y eviten la sobre explotación de los recursos naturales, contaminación y producción de nuevos bienes y demás que aumentan el riesgo de fatiga del ambiente.

Teniendo como premisa la protección, restauración y utilización de los recursos naturales, se plantea el mejoramiento de suelos provenientes de excavación a través de la implementación de biopolímeros de origen natural, garantizando pautas de consumo asequibles, con resultados fiables y sostenibles para todos los beneficiados.

Los procesos de mejoramiento del suelo a menudo resultan esenciales en las obras, de allí se incursionan nuevas investigaciones para la obtención de resultados similares con otros compuestos u otras materias primas, lo anterior sin generar afectación en una nueva forma de construcción.

Simultáneamente se conoce el excesivo volumen de residuos de suelos producidos en la ejecución de proyectos viales, edificaciones con grandes profundidades, obras de saneamiento básico, entre otros, los cuales finalmente son dispuestos sin mayor aprovechamiento y en ocasiones sin tratamientos adecuados, lo que genera un riesgo latente en la preservación de la vida humana.

Bajo la visión de una ingeniera civil sostenible, a nivel mundial se emprenden nuevas modalidades para la construcción de obras, entre estas, en la línea de geotecnia se incursiona la optimización de suelos arcillosos, limosos y compuestos por arenas, que no presenten las cualidades mecánicas requeridas para la ejecución final, por ello, se da lugar a la aplicación de estabilización de suelos a través de diferentes formas con la inclusión de aditivos, de origen, químico o biológico.

En esta modalidad, en Colombia, es muy poco o nada lo que se ha investigado, por ello la necesidad de afianzar los conocimientos y fortalecer los aportes científicos y académicos sobre el tema; generando alternativas de uso sobre residuos de suelos provenientes de excavación, que representan en un gran porcentaje contaminación en el ambiente, de tal manera que se fomente su utilización en actividades primarias, tales

como rellenos que remplacen las bases y sub bases que se generan en canteras.; lo anterior, sin alterar la calidad y funcionamiento del proyecto.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar el estado del arte y del conocimiento de la resistencia al corte y la rigidez de suelos sometido a la estabilización física mediante la aplicación de un biopolímero de origen natural.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la revisión bibliográfica de los tipos de biopolímeros empleados para la estabilización de suelos, características y principales aplicaciones.

- Comparar y analizar, desde el punto de vista teórico, de los resultados de ensayos mecánicos de resistencia y rigidez obtenidos por diferentes investigadores a partir de la revisión de artículos publicados en revistas especializadas y otras fuentes confiables de información.

- Establecer las características de las envolventes de allá de muestras tratadas con biopolímeros a partir de la revisión de artículos publicados en revistas especializadas y otras fuentes confiables de información.

3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

3.1. INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelo, consiste en actividades de ingeniería que propende aumentar las características, como: permeabilidad, resistencia, estabilidad volumétrica, entre otras.

Esta técnica permite el aprovechamiento de material, evitando el transporte, y la disposición del mismos en zonas, donde su re ubicación puede generar agentes contaminantes y alteración del entorno. En el desarrollo del presente numera se describirán los métodos de estabilización de suelos y las propiedades físicas y/o químicas optimizadas.

3.2. MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN

Una vez se caracteriza una muestra de suelo, y se definen sus propiedades mecánicas y físicas, el grupo de profesionales a cargo, según sea el proyecto, dimensionan las necesidades de mejoramiento o estabilización del suelo a intervenir.

Los suelos normalmente reciben las cargas externas e internas que se generan dentro de la ejecución de diferentes obras de ingeniería, bajo diferentes condiciones y recomendaciones se realiza el proceso de estabilización que infiere de forma química y física dentro de la micro y macro estructura del suelo.

De acuerdo a los avances tecnológicos, las investigaciones y la accesibilidad a la información, los suelos pueden ser mejorados a través de medios mecánicos, químicos, eléctricos o térmicos; a la fecha el empleo de las estabilizaciones de suelo comprende una solución económica y tangible para mejorar las propiedades mecánicas del mismo.

El método a elegir está ligado netamente con las características del suelo, sus propiedades y la necesidad a cubrir, dentro de los múltiples analizados a la fecha se tienen:

- **Mecánicos:** mezcla de materiales granulares con materiales naturales para aumentar la resistencia, o sustitución del suelo mediante el uso de bases

granulares u otros elementos; esta actividad está acompañada por acciones estática o dinámica.

- **Químicos:** mezclas entre materiales que afectan la microestructura y crean nuevas composiciones, actúan directamente sobre los componentes del suelo, especialmente en suelos cohesivos, creando compuestos de naturaleza cementante, generalmente se encuentra una clasificación de estabilizantes: neutros, alcalinos y ácidos.

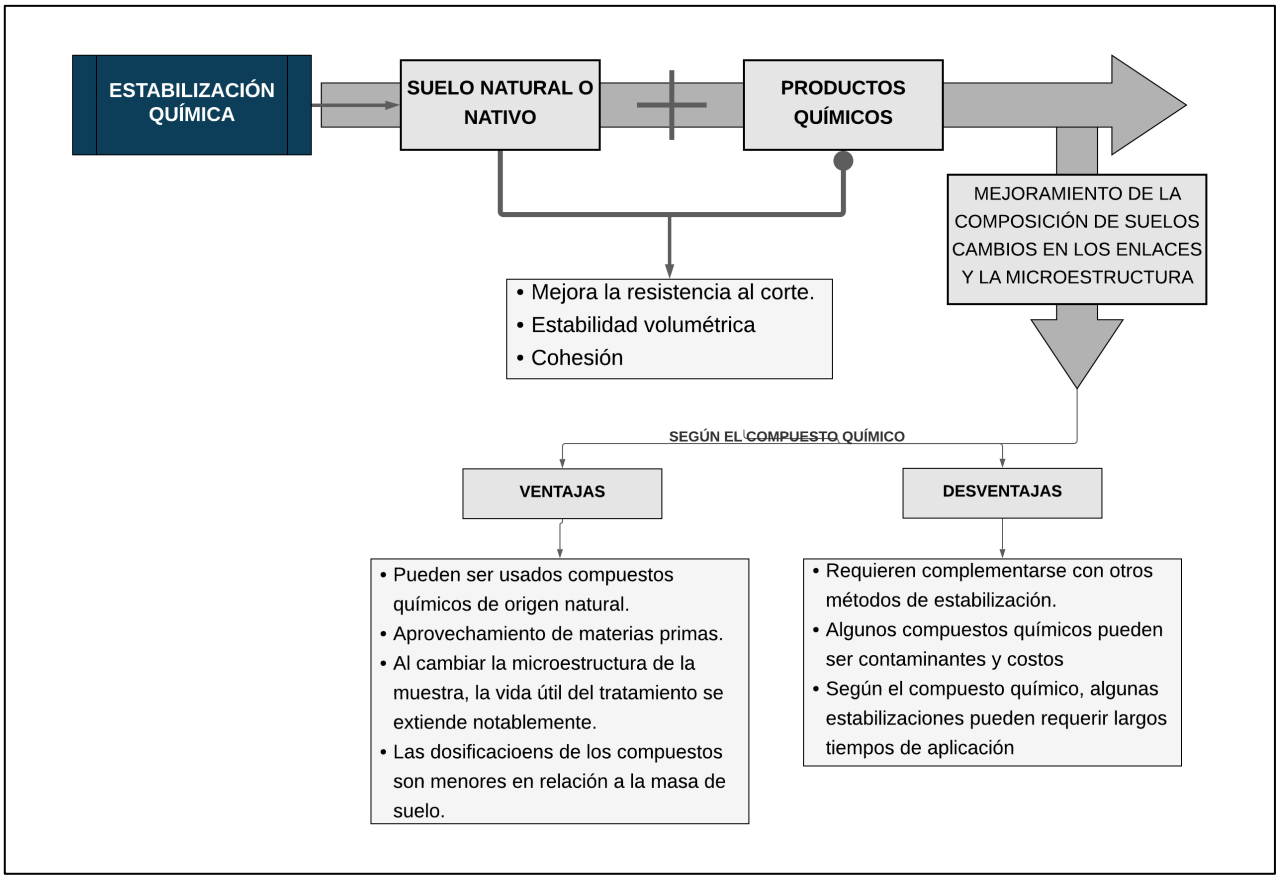


Figura 3-1 Estabilización química, a partir de (F. Rivera, Aguirre-Guerrero, Mejía de Gutiérrez, & Orobio, 2020). Fuente: PROPIA.

- **Eléctricos:** estos métodos afectan directamente los electrodos existentes en los compuestos del suelo, normalmente se aplican sobre suelos arcillosos blandos saturados, permiten drenar los excesos de agua, dentro de las múltiples estabilizaciones eléctricas, se destaca la estabilización por electro ósmosis.

Este método data por primera vez en el año 1808, gracias al fisco Reuss, quien realizó ensayos sobre una arcilla humedad, instalado dos tubos abiertos, cada uno con

agua, en los extremos de la muestra, simultáneamente realizó la inducción de corrientes eléctricas, identificado que en uno de los tubos aumentaba su altura de agua, y en el otro disminuía.

La electro ósmosis consiste en la inducción de una corriente eléctrica a una masa de suelo, caracterizada por su saturación y el tamaño de sus granos (finos); este proceso requiere el suministro de ánodos y cátodos en cada uno de los extremos de la zona de estudio, esto genera una migración de iones, lo que se traduce en un transporte de ánodos hacia los cátodos y viceversa, gracias a este proceso se disminuye la presión de poros, este recorrido se muestra en la Figura 3-2 Proceso de electroósmosis. Fuente: (Piqueras Yepes, 2019)

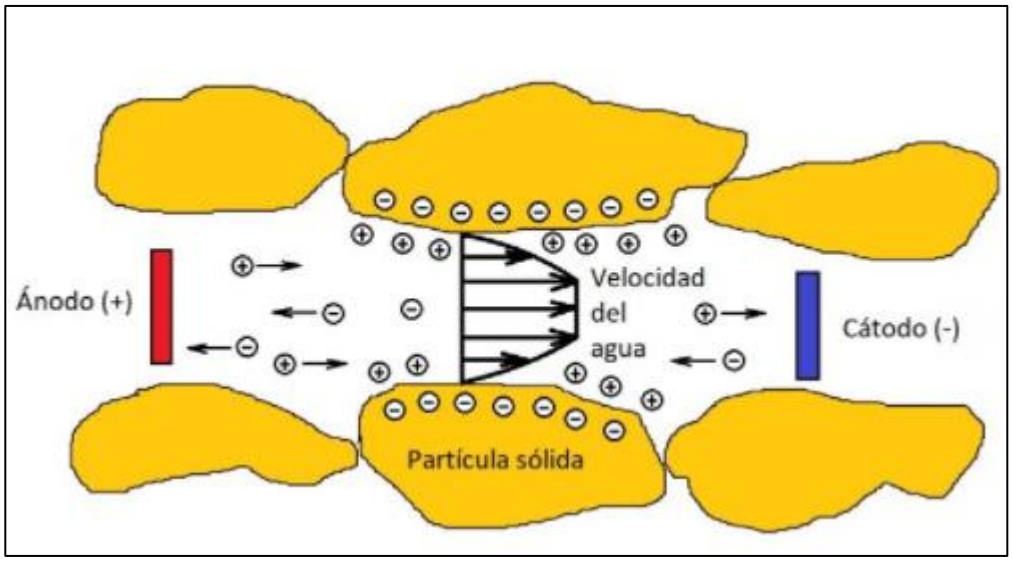


Figura 3-2 Proceso de electroósmosis. Fuente: (Piqueras Yepes, 2019)

Gracias al recorrido que realiza el agua desde los ánodos (+) hacia los cátodos (-), se reconoce a la electroósmosis como un método de drenaje eléctrico. Según (Piqueras Yepes, 2019), se obtienen resultados óptimos con cátodos de un diámetro de 120 mm espaciados 3-5 m y ánodos de diámetro de 100 mm en acero o aluminio; las corrientes eléctricas mejoran el proceso cuando su potencial se encuentra entre 30 V y 180 V.

La consolidación se genera gracias al flujo de agua, el cual incide directamente sobre las tensiones efectivas; este proceso requiere especial cuidado dado que se pueden producir procesos de hidrólisis, no obstante, a mayor voltaje, mayor cantidad de agua drenada.

Para el cálculo del voltaje requerido y las especificaciones de los ánodos y cátodos, es necesario realizar la aplicación de la Ecuación de Darcy y la ley de flujo, teniendo presente las variables físicas y químicas.

Entre sus múltiples desventajas, se encuentra la seguridad de los operarios y los elevados costos de aplicación de esta técnica, dado que se requiere la alimentación continua de corriente. La baja aplicación de este método implica el desconocimiento y posibles mejoras. Se resaltan aplicaciones en las obras de ingeniería, como la excavación de túneles y estabilización de suelos en líneas férreas, especialmente en países europeos.

- **Térmicos:** en esta condición se generan afectaciones geotérmicas en el suelo, cambiando de forma rápida y bajo una lectura profunda la composición de la materia prima, a través de cambios de temperatura elevados

Las variaciones de temperatura pueden llevarse desde el congelamiento hasta su opuesto, dependiendo claro está de la clasificación del suelo y el nivel freático de la zona de estudio. Dentro de los procesos de estabilización térmica se encuentra el congelamiento, la cual se aplica a suelos débiles o compresibles, usando el agua contenida en la microestructura del suelo o la incorporación de aire, como cementante; este método fue ejecutado por primera vez en 1878 en Estocolmo para la construcción de túneles. Su desventaja se concentra en los costos elevados que conlleva dichas actividades de estabilización.

En el desarrollo del presente documento, se encontrarán diferentes estabilizaciones químicas, desarrolladas en su gran mayoría en suelos granulares de bajas especificaciones físicas y comportamientos mecánicos deficientes.

3.3. PROPIEDADES DE LOS SUELOS A ESTABILIZAR

Los suelos usados para los procesos de estabilización, en su mayoría corresponden a materias primas con bajas características mecánicas, físicas y químicas, que no cuentan con la capacidad para soportar cargas, movimientos o efectos físicos de transformación causados por obras de ingeniería civil u otras necesidades. Estos suelos normalmente constituyen un residuo granular que es dispuesto en Zonas de Manejo de Escombros y Material de Excavación – ZODME, que finalmente se constituyen como puntos de acopio sin ningún uso agrícola, social, vivienda u otro tipo.

Bajo estas condiciones, y en virtud del aprovechamiento total de los residuos, durante varios años en la ingeniería ha surgido la premisa de mejorar y/o estabilizar dichos materiales a un costo razonable obteniendo un beneficio rentable y de alta calidad.

Es preciso indicar que el proceso de estabilización consiste en el mejoramiento de propiedades como: resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, densidad, etc. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

En la fase de estabilización, el suelo optimizado logra conservar sus nuevas características mecánicas, y físicas a lo largo del tiempo, reduciendo los impactos que se generan por la acción o exposición a fenómenos naturales como lluvia, sequía, entre otros y las acciones del entorno, tales como: cambios de carga, transito, etc.

Ahora bien, es importante distinguir que los procesos de mejoramiento en los suelos, están totalmente ligados con su clasificación y su previo estudio, en esto se distinguen grandemente los suelos cohesivos, los cuales a partir de sus características permiten la modificación y/o estabilización; a continuación, se explica en la Figura 3-3 Tipos de optimización de suelos arcillosos. Fuente: Propia. estos dos términos para suelos arcillosos.

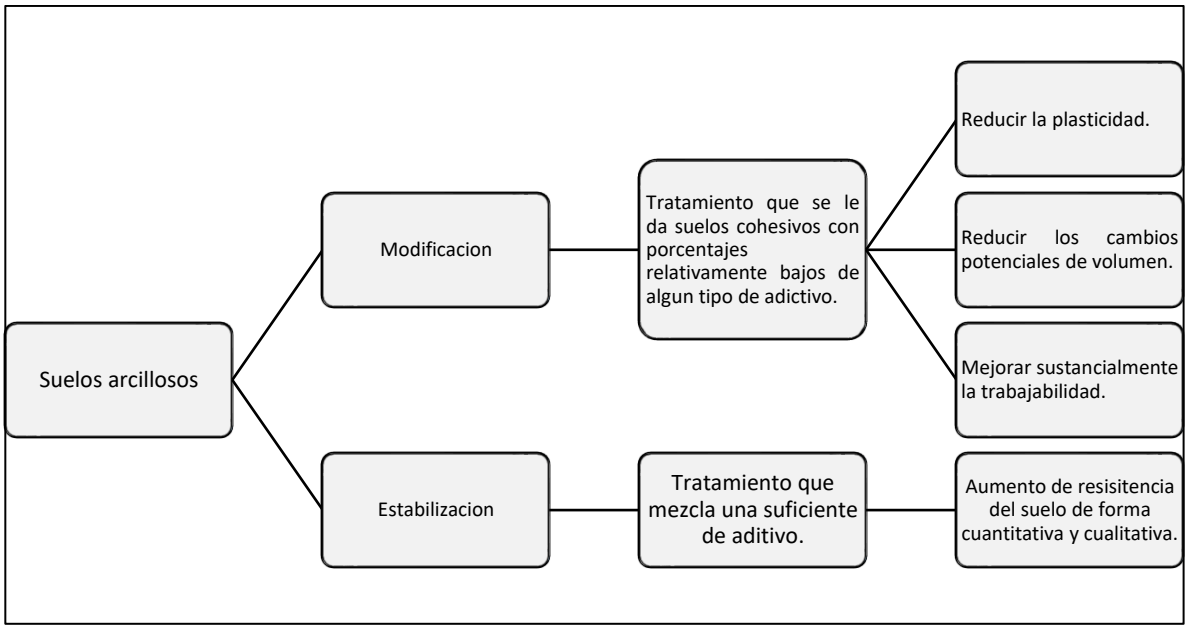


Figura 3-3 Tipos de optimización de suelos arcillosos. Fuente: Propia.

En un comienzo los tratamientos de suelo podían ser medibles en virtud de especificaciones cualitativas, gracias a los nuevos hallazgos, la estabilización del suelo se asocia con valores cuantitativos de resistencia y durabilidad, datos relacionados con el funcionamiento del suelo.

Estos valores cuantitativos se expresan en función de la resistencia a la compresión o al esfuerzo cortante o de algunas medidas de capacidad de soporte o de flexión bajo carga (para indicar la capacidad de soporte) y en función de la absorción, ablandamiento y reducción de resistencia directa al hielo o deshielo, humedecimiento y secado para indicar la durabilidad de una construcción estabilizada. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

A continuación, se describen las características físicas, mecánicas o químicas que se mejoran en el proceso de estabilización del suelo

3.3.1. ESTABILIDAD VOLUMETRICA

Según los textos consultados, varios autores definen la estabilidad volumétrica, como la constancia del volumen frente a la aplicación de cargas. Normalmente, los cambios de volumen se dan en suelos expansivos por cambios de humedad; esta propiedad es difícil de contralar durante las actividades de obra que se realicen, dado

que las aplicaciones de carga, excavaciones y rellenos transforman las propiedades mecánicas del suelo.

Los cambios abruptos de esta propiedad son causas del levantamiento de pavimentos, inclinación de postes, rotura de tubos, asentamientos de muros e inestabilidad de taludes, entre otras, (Escobar & Escobar, 2016); frente a estas problemáticas, se han desarrollado diferentes alternativas de estabilización, frecuentemente se realizan cambios de material, y rellenos para mejorar la subrasante, con materiales de mayores propiedades físicas, estas acciones que resultan costosas.

Gracias a las investigaciones presentadas en el desarrollo del documento, se presentan las posibilidades de transformar las arcillas expansivas, en masas rígidas o suelos compactos, capaces de resistir cargas superiores, disminuyendo los efectos de consolidación secundaria a largo plazo. (Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures, 2016).

Los tratamientos químicos han demostrado disminuir los costos de estabilización, (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018), sin embargo, muchos de ellos constituyen el uso de agentes contaminantes, o elementos poco amigables con el medio ambiente; el uso de biopolímeros realiza acciones similares de estabilización en los suelos, produciendo mejoras significativas en las características mecánicas, es de valorar que estos insumos representan una nueva alternativa, económica, eficiente y fiable para la estabilización de suelos expansivos o compuestos por arenas. (Dirk, Guido, & Christian, 2008).

3.3.2. RESISTENCIA

Como ya es sabido, no existen criterios absolutos ni uniformes que permitan evaluar la compactación de un suelo en un terreno. Es claro indicar que el comportamiento de la resistencia del suelo y sus procesos de modificación o mejoramiento, depende principalmente del uso del mismo. En la ingeniería el comportamiento esperado está sujeto a diferentes variables y condiciones mecánicas como:

- Peso unitario.

- Contenido de agua.
- Tamaño de partícula.
- Cohesión.
- Densidad.
- Deformabilidad
- Permeabilidad.
- Contenido de materia orgánica.
- Acidez-Alcalinidad.
- Dirección y magnitud de cargas o esfuerzos.

Teniendo en cuenta lo anterior y pese a que existen diferentes métodos de inspección y medición de una porción de suelo, ya sea visual, manual o mecánico, la mayoría de los autores coinciden que el principal indicador, es la resistencia del suelo a la penetración; aunque también existen otros indicadores de alta importancia según el objeto de estudio del suelo como la resistencia al corte y la compresión. Todas estas cualidades del suelo presentan un mejor desempeño en su resistencia y están directamente asociadas a un proceso del suelo el cual se denomina compactación.

- Compactación:

La compactación se puede definir como el proceso de eliminación del aire presente en el suelo, a través de la aplicación de energía mecánica por procesos manuales, o mecánicos, que como resultado un aumento en el peso unitario seco. Durante este proceso se suele añadir agua, el cual actúa como un agente que incorpora propiedades cohesivas y suavizantes a las partículas del suelo. Durante la compactación de los suelos se pueden obtener las siguientes ventajas:

- Aumento de la capacidad portante.
- Disminución en la permeabilidad.
- Aumento de estabilidad por reducción de asentamientos.
- Reduce el riesgo de cambio volumétrico por expansión o contracción.

Este proceso varía en función del uso final del suelo y puede ser medido a través de la prueba Proctor, la cual es, un procedimiento que permite ejercer un control de

calidad sobre la compactación del suelo y tiene como objeto determinar el contenido óptimo de humedad que permita alcanzar la densidad máxima. Esta prueba consiste compactar una muestra de suelo a través de tres capas en un molde de dimensiones estándar mediante la aplicación de un número determinado de golpes por la caída libre con un martillo estándar según el tipo de molde, este ensayo se repite entre 5 o 6 veces.

3.3.3. COMPRESIBILIDAD

Esta propiedad del suelo está relacionada con la susceptibilidad a disminuir su volumen cuando es sometido a cargas. Afecta la permeabilidad, altera la magnitud y sentido de las fueras inter – partícula, modificando la resistencia del suelo al esfuerzo a corte. (Escobar & Escobar, 2016)

Normalmente, se estabilizan a través de la compactación, (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018); no obstante, este proceso debe ser controlado en obra y no garantiza su efectividad en todos los tipos de suelo, especialmente en los expansivos, bajo estos conceptos se proveen nuevas opciones, tales como: estabilización química.

3.3.4. DURABILIDAD

Es la capacidad del suelo de resistir a la acción del medio ambiente que lo rodea, o la meteorización física o química; de la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. El intemperismo, la erosión y la abrasión amenazan, la vida útil del suelo, como elemento estructural y funcional. (Escobar & Escobar, 2016).

4. ENSAYOS MECÁNICOS SOBRE SUELOS ESTABILIZADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la historia del arte recopilada se encontraron diferentes ensayos y laboratorios que permiten establecer y cuantificar los resultados de los suelos evaluados, teniendo en cuenta muestras tratadas y no tratadas, las cuales fueron expuestas a diferentes tiempos de curado y múltiples dosificaciones de los aditivos y/o biopolímeros usados dentro de la investigación.

Teniendo en cuenta las condiciones en cada uno de los estudios se evidencia aumento en la resistencia al corte, disminución de desplazamientos horizontales y verticales de las muestras tratadas, hallazgos encontrados mediante el empleo de ensayos como: columna resonante, ensayo triaxial y observación de microestructura.

A continuación, se describe el procedimiento que se sugiere aplicar para cada uno de los ensayos, y se contextualizan las ventajas y desventajas de los mismos; es pertinente recalcar, que los ensayos descritos a continuación, fueron aplicados a nivel internacional – nacional, por lo que tienen validez en el escenario propuesta, todo a su vez, que sean realizados de forma correcta, precisa y bajo estrictas condiciones.

4.2. ENSAYOS DE RESISTENCIA AL CORTE

4.2.1. Corte directo

El ensayo de corte directo permite determinar los parámetros de cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ), el cual usa una muestra de suelo de forma cilíndrica, plana y confinada dentro de una caja metálica, que impide los desplazamientos laterales. Dicha muestra es sometida a cargas normales (N), con el fin de aplicar luego una fuerza tangencial (T), está ultima aumenta gradualmente hasta obtener una falla en la muestra.

La caja metálica posee dos secciones, donde uno de ellos es móvil, y facilita el deslizamiento, generando un estado de cortante en relación a un plano de falla establecido; adicionalmente, en la parte superior e inferior se tienen piedras porosas,

que permiten el drenaje del material. En la Figura 4-1 Esquema aparato de corte directo. , se evidencia la descripción

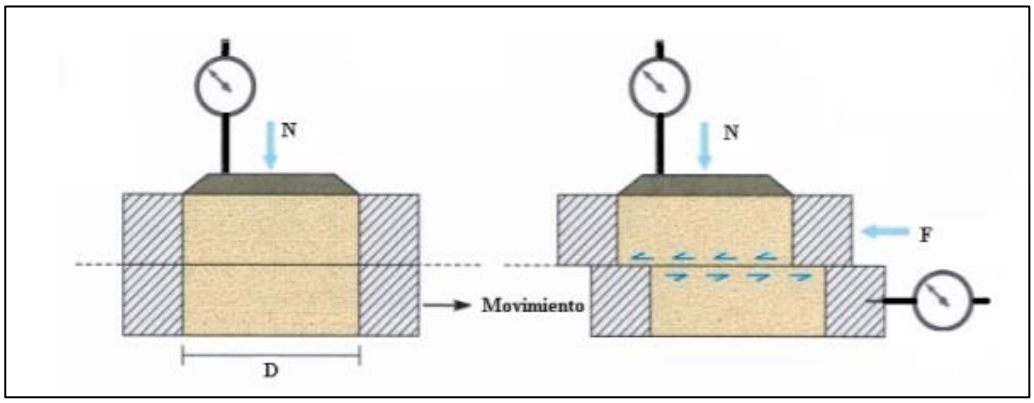


Figura 4-1 Esquema aparato de corte directo. (Perez Ayala, 2016)

Al realizar este procedimiento que llevará a la falla la muestra, se podrá determinar uno de los puntos de la envolvente, conociendo previamente los valores de la fuerza de corte y fuerza de confinamiento, aplicadas, para posteriormente establecer los parámetros de resistencia.

Para la ejecución de este ensayo, el profesional debe partir de la premisa que los esfuerzos aplicados a la muestra están uniformemente distribuidos sobre su área, obteniendo:

- Esfuerzo normal

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

Ecuación 4-1 Esfuerzo normal. Fuente: (Das, 2013)

- Esfuerzo tangencial.

$$\tau = \frac{T}{A}$$

Ecuación 4-2 Esfuerzo tangencial. Fuente: (Das, 2013)

Es importante realizar el ensayo con mínimo tres muestras diferentes, con el fin de poder realizar las gráficas en un sistema coordenado σ Vs τ, logrando de esta forma crear una línea que une los puntos obtenidos en el proceso experimental. Una vez se

obtienen los datos y se realiza la gráfica se procede a obtener la ecuación de una recta de regresión tal y como se muestra en la Figura 4-2 Envolvente de esfuerzos en el ensayo de corte directo. Fuente; .

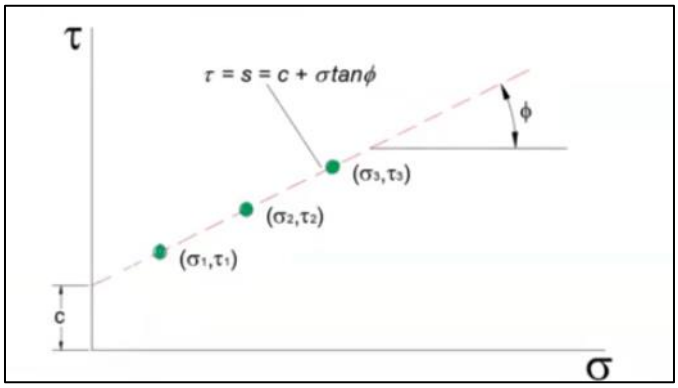


Figura 4-2 Envolvente de esfuerzos en el ensayo de corte directo. Fuente; (Das, 2013)

Con la información consignada se puede realizar el cálculo del ángulo de fricción aplicando las fórmulas matemáticas indicadas. Es importante tener en cuenta que la velocidad de aplicación de la carga es lenta, por lo consecuente los excesos de presión de poros son igual a cero, de esta forma se tiene una muestra de suelo CD.

Si bien este ensayo es práctico y económico, y permite determinar la rigidez del material, su principal desventaja se centra en la imposibilidad de cálculo de los excesos o presión de poros; adicionalmente, las curvas que se crean (esfuerzo Vs deformación), no son reales, sino más bien, teóricas, por lo que no son precisas en su totalidad.

4.2.2. Ensayo triaxial CD

En el numeral 4.3.2 Ensayo Triaxial, del presente documento, Figura 4-6 Ensayo consolidado drenado CD. Fuente: Propia, se especifica las características del ensayo triaxial CD (Ensayo triaxial consolidado drenado), que permite determinar la rigidez del material, dado que sus características son similares al ensayo de corte directo.

Gracias a las condiciones de drenaje y de consolidación, el exceso de poros que se tiene es nulo, por lo que los parámetros de resistencia dependen de los esfuerzos efectivos. Es importante aclarar, que la aplicación de la carga es lenta.

4.3. ENSAYOS DE RIGIDEZ

4.3.1. Columna resonante

Este ensayo, es usado para la evaluación de una muestra de suelo expuesta a vibraciones longitudinales o torsionales, con el fin de determinar las propiedades dinámicas del suelo, en respuesta a medias y bajas deformaciones; el procedimiento consiste en la aplicación de una fuerza torsional amónica de amplitud constante en la parte superior de una muestra cilíndrica de suelo. (Candela Rozo , Clevel Noriega, & Torres Romero, 2020).

Este ensayo permite identificar la tensión y deformación que soporta el suelo; en los laboratorios, para Colombia, no existe una normatividad estándar, por ende, se usa la ASTM-D4015-15.

Actualmente, existen varios modelos de equipos que permiten identificar las deformaciones pequeñas a través del ensayo en referencia; esta prueba, se centra en la evaluación de la rigidez del suelo;

Cada uno de los aparatos, produce sobre la muestra una deformación, la cual es generada a través de un sistema electromagnético o un motor en un rango de frecuencia determinada; mediante el software se monitorea la frecuencia y la amplitud de la resonancia.

Este ensayo, permite calcular el módulo de corte del suelo, el cual es obtenido a partir de los datos de velocidad de onda de corte (Vs), y la densidad del suelo, los valores expuestos, están relacionados directamente con la rigidez del suelo.

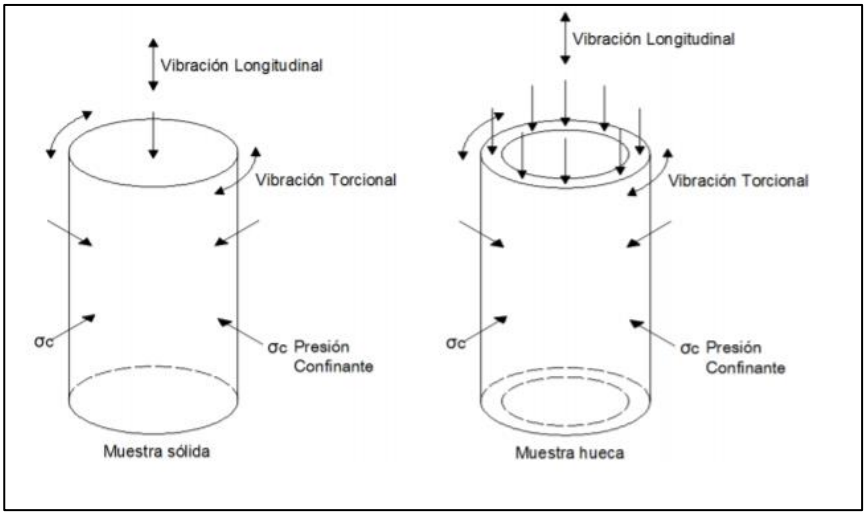


Figura 4-3 Configuración de las muestras para ensayo de columna resonante. Fuente: (Diaz, 2005)

Las ventajas de este ensayo se concentran en la evaluación de rigidez de las muestras, esto frente a la acción de fuerzas vibratorias que se generan en diferentes direcciones, atacando a las partículas del suelo; estos esfuerzos pueden ser generados por sismos, tránsito de vehículos o la exposición constante a vibraciones, efectos que generan en la masa de suelo un incremento en la deformación a lo largo del tiempo.

Para la aplicación de este ensayo, además de tener en cuenta la normatividad antes mencionada: ASTM D4015 del 2015, es importante que las muestras de suelo tengan una previa preparación, para lo cual se pueden revisar las siguientes normativas: s ASTM D2850, D3999, D4767, D5311 o D7181, (Candela Rozo , Clevel Noriega, & Torres Romero, 2020).

Es pertinente resaltar que la ASTM D4015 del 2015 abarca dos configuraciones de los equipos: Tipo 1 donde se aplica un par conocido a la parte superior de la muestra y el movimiento de rotación resultante se mide en la parte superior de la muestra, y Dispositivo Tipo 2 donde se aplica un par no calibrado. a la parte superior de la muestra y el par transmitido a través de la muestra se mide mediante un transductor de par en la base de la muestra. Para ambos dispositivos, el par se aplica al extremo activo (generalmente en la parte superior) de la muestra y el movimiento de rotación también se mide en el extremo activo de la muestra. (ASTM D4015, 2015).

Adicionalmente, se establecen los requerimientos mínimos que deben cumplir los equipos y las muestras para la aplicación del ensayo de columna resonante. A continuación, en la figura, se enlistan las principales condiciones.:

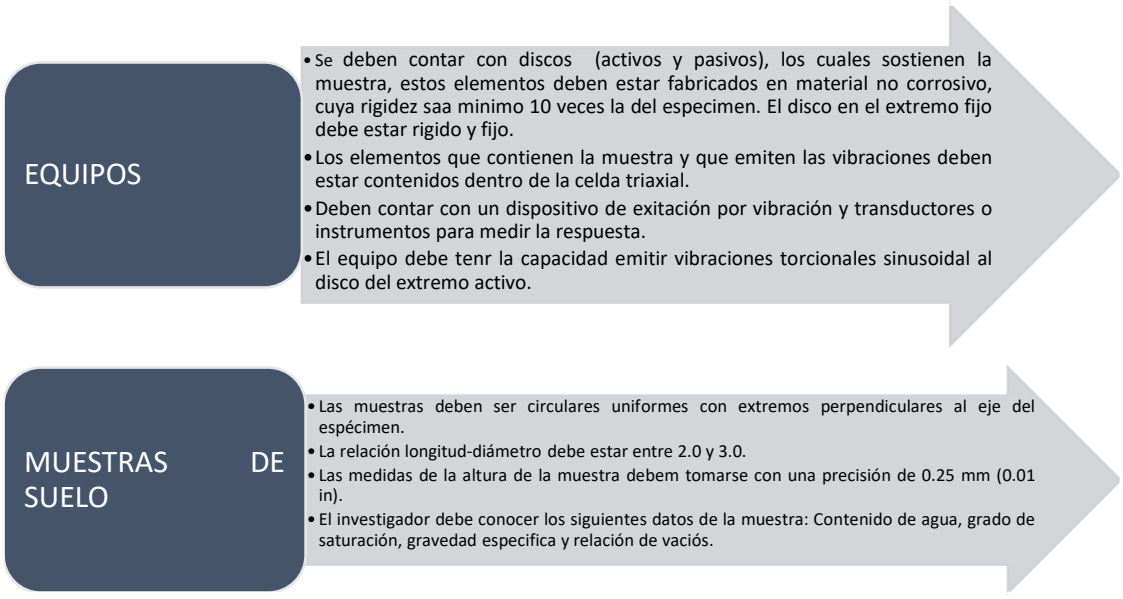


Figura 4-4 Características de la muestra y de los equipos para realizar prueba Columna resonante, aplicando normatividad ASTM D4015. Fuente: (Candela Rozo , Clevel Noriega, & Torres Romero, 2020)

4.3.2. Ensayo Triaxial

El ensayo triaxial es una evaluación completa de la resistencia al corte de una masa de suelo, a diferencia de otros ensayos, mide la resistencia al corte en un plano real (plano inclinado respecto a la horizontal), como es el caso del ensayo del corte directo, en donde el plano de corte es un plano inducido (plano horizontal).

Este ensayo permite el control de la velocidad de carga, lo que permite distinguir el cambio de presión de poros, que son totalmente medibles, a través de dos parámetros: drenados (efectivos) y no drenados (totales), este último guarda la influencia de la presión de poros, la cual es cuantificada mediante la aplicación de la prueba triaxial, su desventaja se centra en el costo de realización, aumentando significativamente los estudios de geotécnicos, especialmente para países en desarrollo.

La ejecución del experimento consiste en someter una muestra cilíndrica, dentro de una celda de carga (célula triaxial o cámara de triaxial) la cual imparte una presión de confinamiento uniforme, donde seguidamente se aplica una carga axial, que permite la medición de deformaciones y presiones de poros. Esta acción se realiza hasta llevar el suelo o la muestra a un estado de falla.

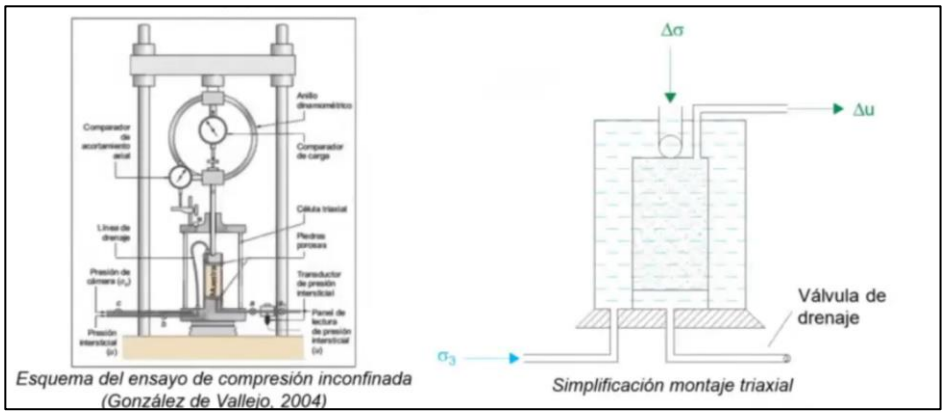


Figura 3 4 Esquema del ensayo de compresión. Fuente: Notas de Clase, Curso: Fundaciones. (2020,-02).

La cámara triaxial además de contener la muestra de suelo, permite la inclusión de agua, elemento que genera el confinamiento radial de la muestra; el ingreso de presión se da gracias a la conexión de tubo de entrada, que arroja la presión de confinamiento, esta presión se aplica sobre el agua que está contenida en el cámara, que a su vez emite esta presión sobre la muestra de suelo.

La deformación vertical es generada través del pistón, y cuantificada mediante extensómetro o deformímetro vertical; con estos datos y el área de la muestra se calcula el esfuerzo desviador.

Como se describe, una vez se aplica el esfuerzo de confinamiento y el esfuerzo desviador, se induce una falla dentro de la masa de suelo, lo que permite obtener una medida de excesos de presión poros. Es importante tener en cuenta la velocidad de carga, dado que esto establece la condición del ensayo.

Bajo este ensayo, se pueden producir tres tipos, los cuales se muestran en la siguiente Figura 4-5 Tipos de ensayo triaxial. Fuente: PROPIA

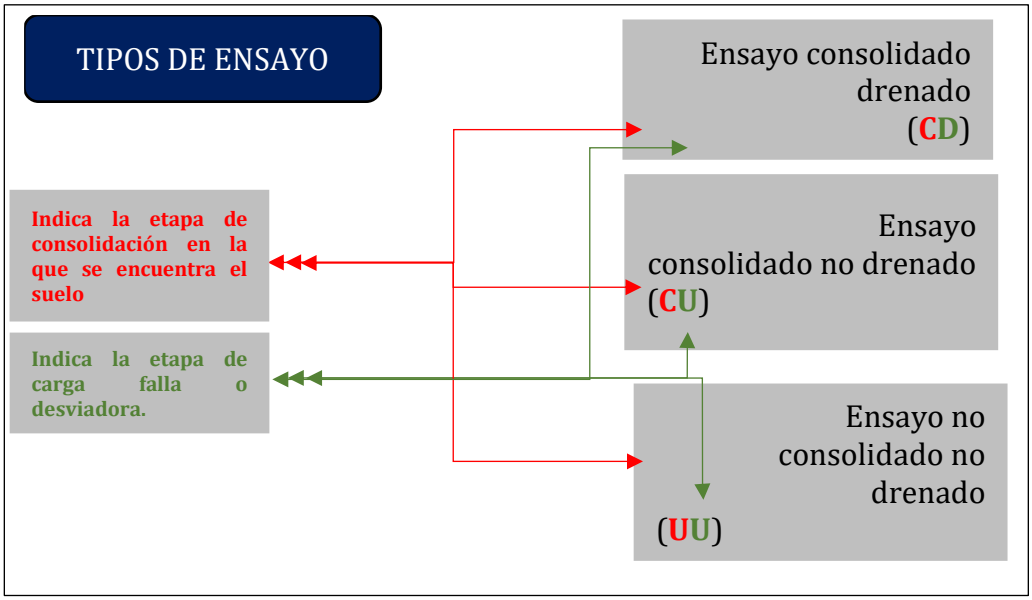


Figura 4-5 Tipos de ensayo triaxial. Fuente: PROPIA

Cada uno de los tipos de ensayo triaxial mostrado anteriormente están sujetos al grado de consolidación y al respectivo drenaje, variables que son importantes a la hora de realizar mediciones de excesos de presión de poros, calculado a partir de las contribuciones generadas en cada una de las etapas: desviadora y consolidación.

Las especificaciones de cada uno de los ensayos, se muestran a continuación

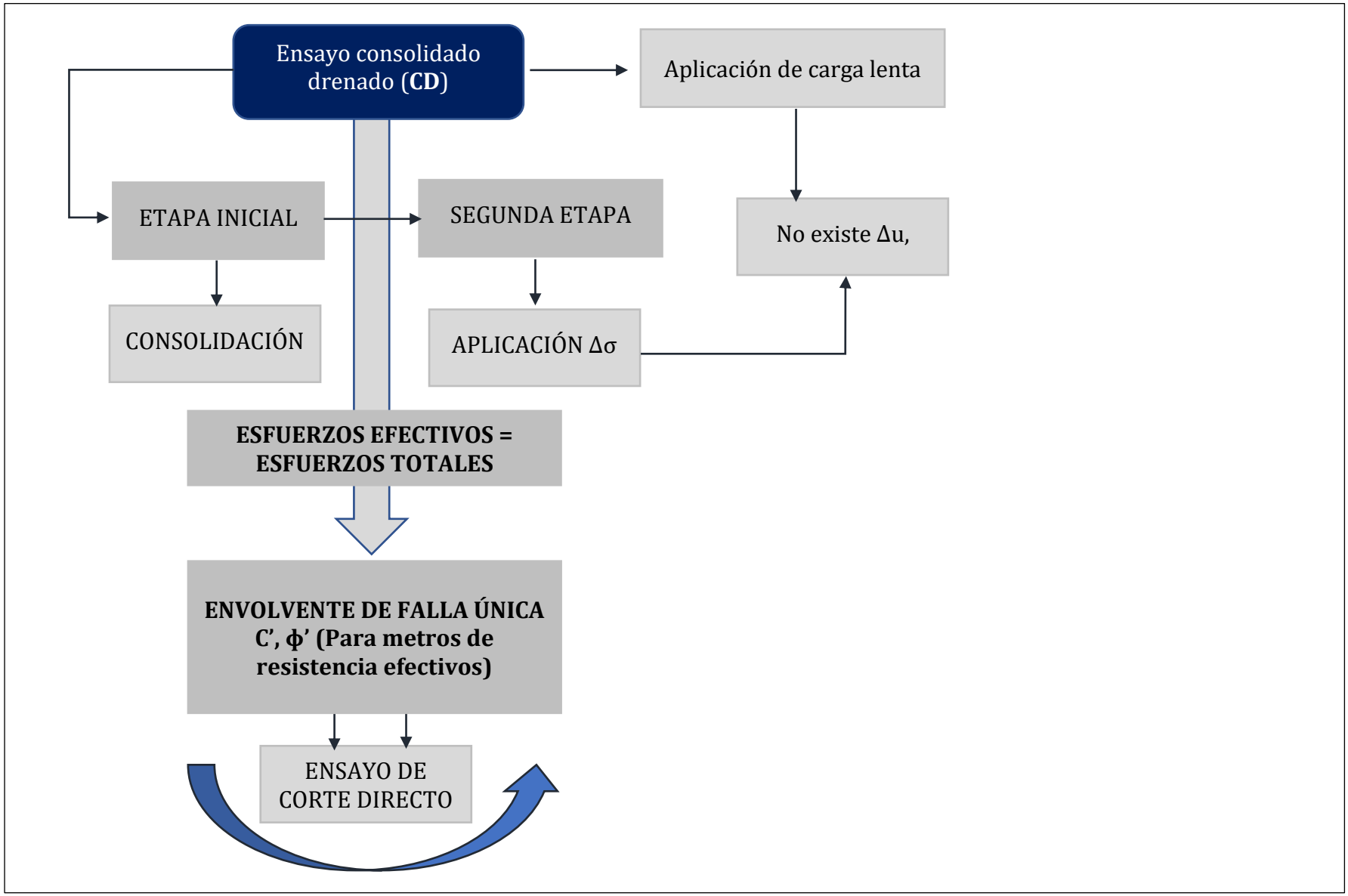


Figura 4-6 Ensayo consolidado drenado CD. Fuente: Propia

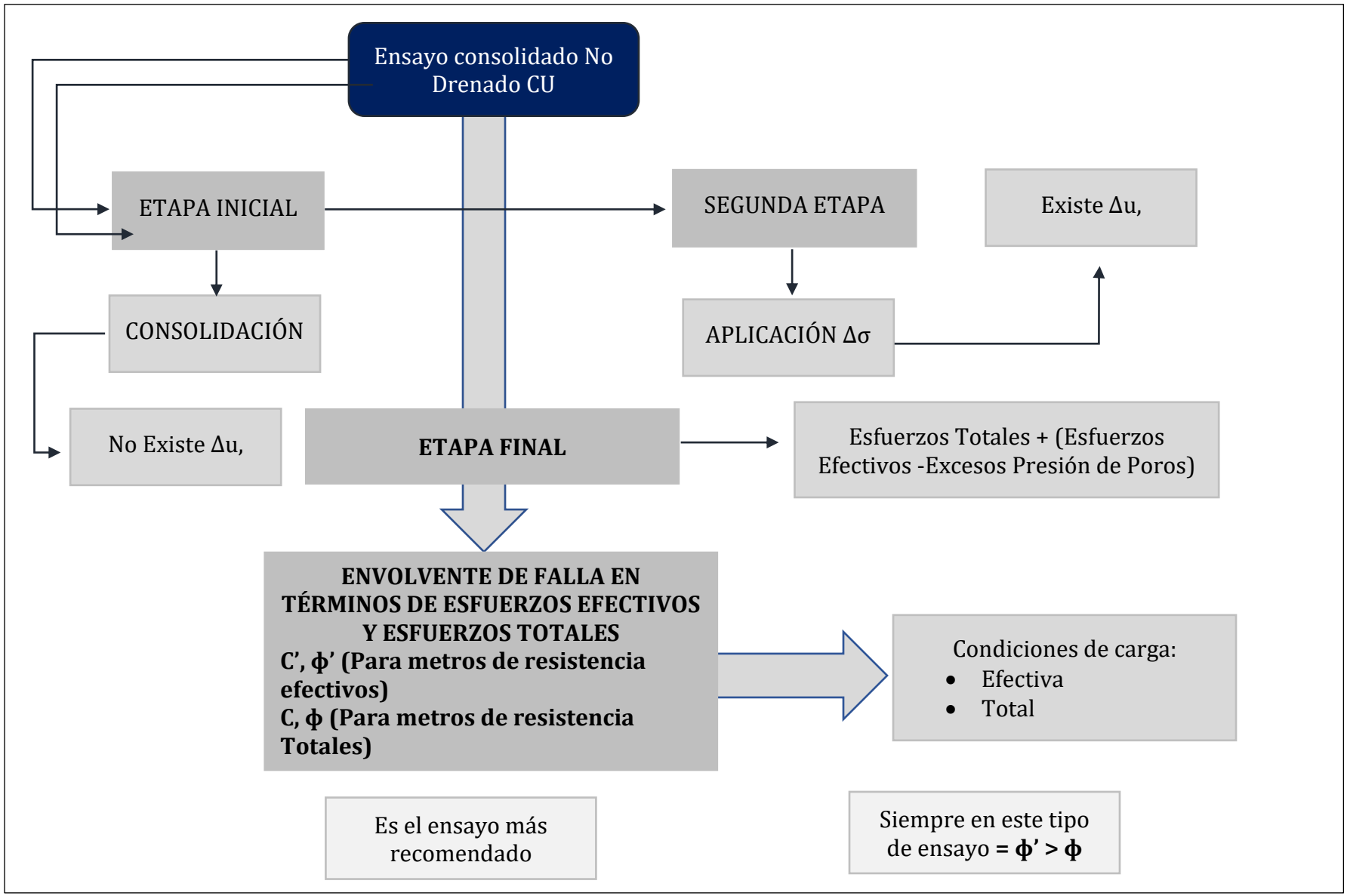


Figura 4-7 Ensayo consolidado NO drenado CD. Fuente: Propia

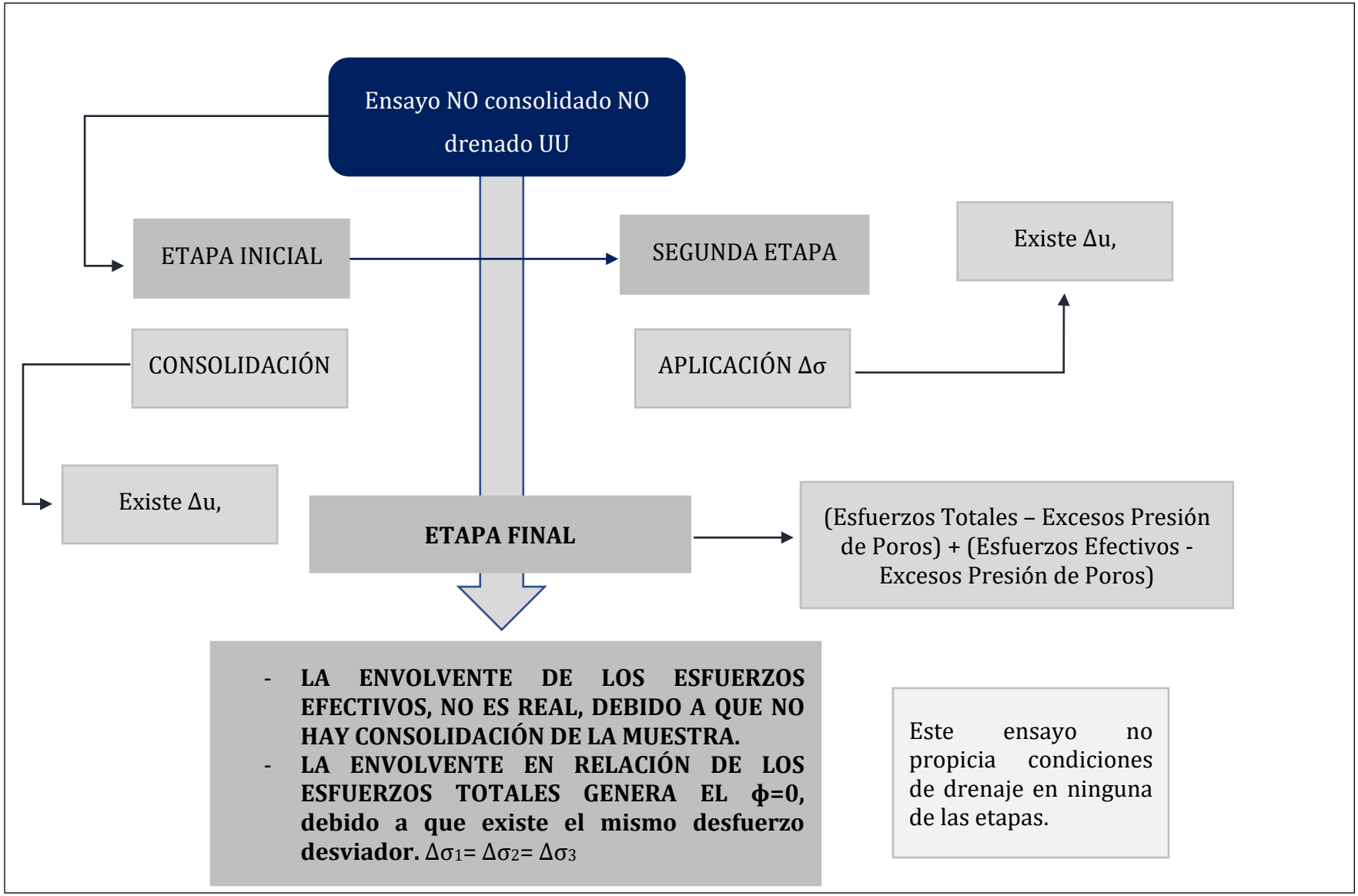


Figura 4-8 Ensayo NO consolidado NO drenado UU. Fuente: Propia

En conclusión, la elección del ensayo está sujeta no solamente a los costos económicos de cada uno, sino también al alcance técnico que tenga cada uno de los proyectos, por lo general, los parámetros de resistencia se eligen a partir de las relaciones de carga y drenaje, los cuales se deben acercar a la realidad; en la , se muestran las generalidades indicadas anteriormente:

Tabla 4-1 Generalidades de ensayo triaxial. Fuente: (Notas Clase, 2020)

Tipo de ensayo Triaxial	Aplicación de carga (Δσ)	Drenaje	Parámetros de resistencia
CD	Lenta	Δu=0	**ϕ_d, C_d**
CU	Rápida	Δu>0	**ϕ', C'** **ϕ, C**
UU	Rápida	Δu>>0	**ϕ_u, C_u** **[$\phi_{u=0}$]**

4.4. Ensayos para el estudio de la microestructura

4.4.1. Microscopia SEM

La observación de microestructura, se realiza con apoyo de microscopios electrónicos de barrido que usa electrones en lugar de luz para formar una imagen. (Cruz Garcia & Ocampo Duarte, 2021)

Estos aparatos cuentan con filamentos, componentes que les permiten aumentar sus amplificaciones debido a la longitud de onda que logran manejar; la clasificación de estos equipos se encuentra en dos líneas, la primera de ellas es conocido como Microscopios electrónicos de transmisión y la segunda, microscopios electrónicos de barrido.

Los primeros se apoyan de electrones que se emiten hacia el objeto del cual se desea capturar la imagen, parte de estos rebotan contra la muestra, y forman la imagen aumentada, la cual puede maximizarse hasta una relación de 1:1.000.000, sin embargo, su limitación se encuentra en la división de capas que se debe realizar, la cual debe ser fina y no mayor a 2000 ángstroms.

Los microscopios electrónicos de barrido, realizan su lectura colocando el objeto en una capa de metal delgada, y a través de su filamento emiten los electrones,

permitiendo la configuración de la cantidad emitida de los mismos hacia el elemento a capturar; esta acción permite formar imágenes en 3D.

La microscopia SEM (Scanning Electron Microscopy), es una de las técnicas que permite el análisis de muestras a nivel microestructural, el aparato este compuesto por un emisor de electrones, una columna y diferentes lentes electromagnéticos. El emisor genera un haz de electrones con una aceleración entre 200 V - 30 keV, los cuales viajan por la columna que posee un vacío de 10^{-4} Pa. En la Figura 4-9 Interacción de los electrones con la superficie. Fuente: , se muestra la interacción de los electrones.

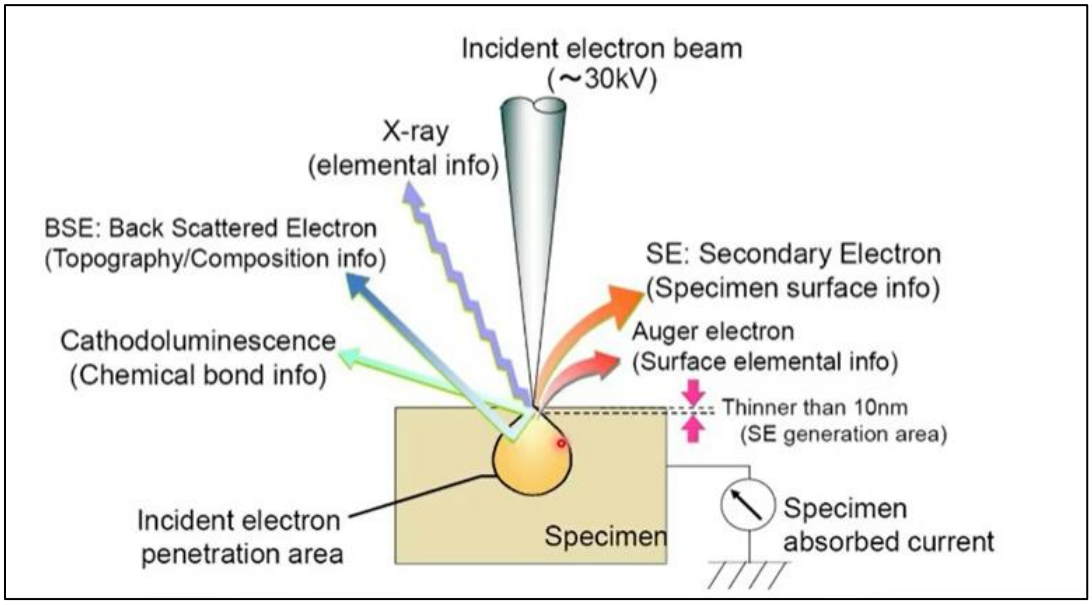


Figura 4-9 Interacción de los electrones con la superficie. Fuente: (Cigarroa Mayorga, Vázquez-Vázquez, Rojas-Chávez, Hernández-Rodríguez, & Morales Bautista, 2021)

El haz indicado pasa por la columna a través de los lentes electromagnéticos y un sistema de deflexión, que permite manipular el haz de electros, para realizar un barrido de la muestra; estos electrones interaccionan con la superficie de la muestra, generando diferentes señales:

- Electrones secundarios: Una vez el haz incide sobre la muestra, este va perdiendo energía, lo que genera un choque con átomos presentes, que generan una deflexión que cambia la dirección, lo que genera una creación de electros secundarios, que poseen una carga de energía baja.

Se tienen tres tipos de electrones secundarios, los cuales se muestran en la siguiente figura.

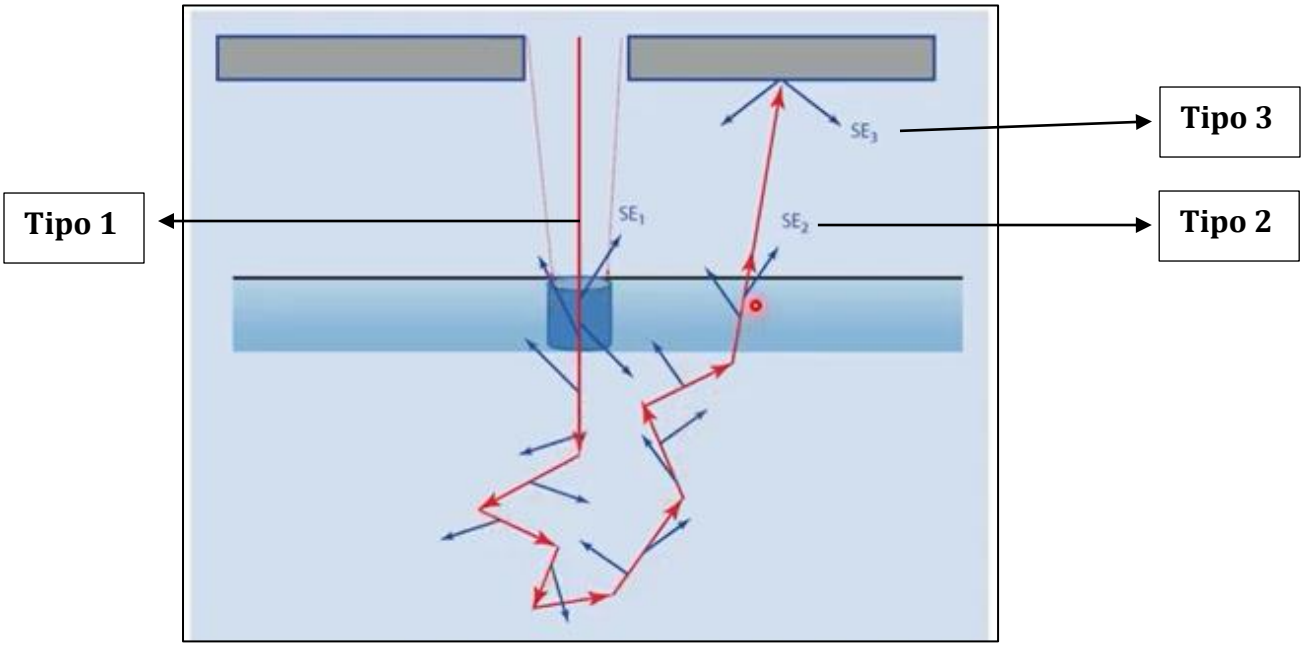


Figura 4-10 Electrones secundarios. Fuente: (Cigarroa Mayorga, Vázquez- Vázquez, Rojas-Chávez, Hernández-Rodríguez, & Morales Bautista, 2021)

Cada tipo de electrón posee una energía diferente, por lo que se pueden categorizar con energías inferiores a 5 Ev. Estos electrones son importantes dado que arrojan la información de la morfología de la muestra, no obstante, su producción aumenta en los bordes.

- Retro dispersados: Estos electrones poseen mayor energía, alrededor de 20 keV, según la característica de la muestra. Estos electrones pueden poseer una energía igual a la del haz.

  La cantidad de estos elementos, depende del número atómico de cada uno de los compuestos de los materiales (Ver: Figura 4-11 Representación de electrones retro dispersados en diferentes elementos. Fuente: , y normalmente existe una mejor cantidad de electrones retro dispersados en comparación a electrones secundarios.

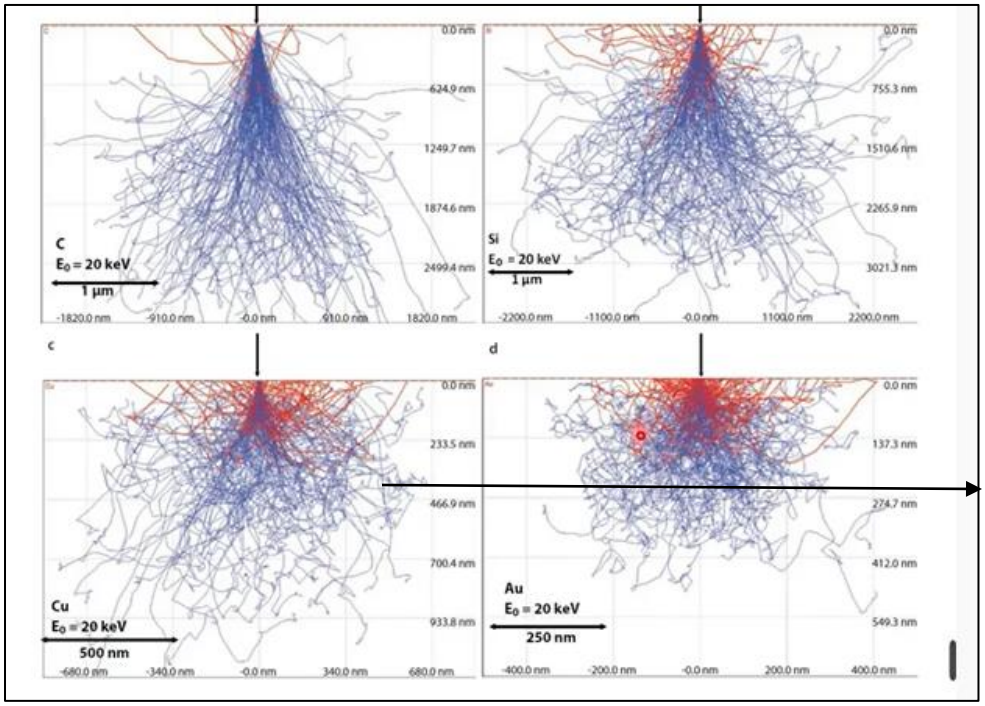


Figura 4-11 Representación de electrones retro dispersados en diferentes elementos. Fuente: (Cigarroa Mayorga, Vázquez- Vázquez, Rojas-Chávez, Hernández-Rodríguez, & Morales Bautista, 2021)

Estas señales muestran la morfología de las muestras y composición química, permitiendo caracterizar los materiales. Es importante indicar que los materiales deben ser conductores, dado que los electrones deben tener la capacidad de realizar el recorrido. En la Figura 4-12 Esquema de un microscopio electrónico de barrido. Fuente: , se muestra un esquema del equipo para realizar barrido SEM

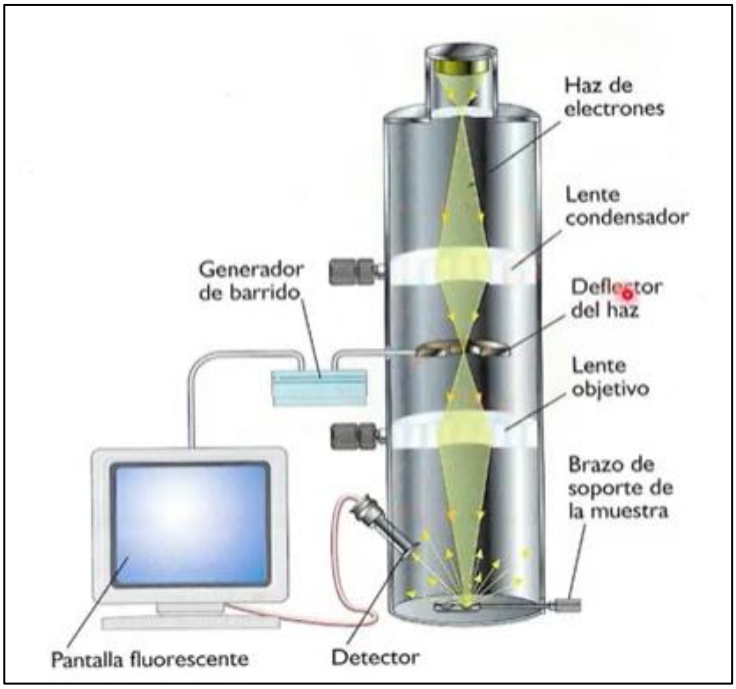


Figura 4-12 Esquema de un microscopio electrónico de barrido. Fuente: (Cigarroa Mayorga, Vázquez- Vázquez, Rojas-Chávez, Hernández-Rodríguez, & Morales Bautista, 2021)

Las observaciones que se generan a través de estos equipos permiten la identificación microestructural de compuestos orgánicos, minerales u otro tipo de materiales como metales. Esta identificación, permite validar la interrelación entre las partículas que componen las muestras, evidenciado de igual forma los vacíos que se generan.

Cada una de las investigaciones realizadas contó con dichas observaciones y a la fecha en Colombia, se cuenta con estos elementos, como es el equipo que posee la Universidad Nacional de Colombia. El uso de estos artefactos puede ampliar el espectro de investigación y dar soporte científico a futuras investigaciones que se realicen en el territorio, con el fin de realizar la aplicación de biopolímeros en los suelos.

4.4.1. Lecturas de Rayos XDR

(S Smitha & Ajanta Sachan, 2016), analiza la composición de la muestra no tratada es: 92% arena y 8% limo, encontrándose un suelo suelto, sin cohesión, con ausencia de partículas de arcilla; las pruebas de difracción de rayos X (XRD), se realizaron usando difractómetro XPERT con radiación Cukαl para un radio de 2θ rango

5-80º, usando el software Topas 4.2 para análisis de resultados, aplicando el módulo Rietveld (método relación de picos), permiten la identificación de la composición del suelo, mostrando la presencia de cuarzo (54,75%), con cantidad de calcita y magnesio (21,29%), albita (5,25%) y leucita (18,75%). (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016).

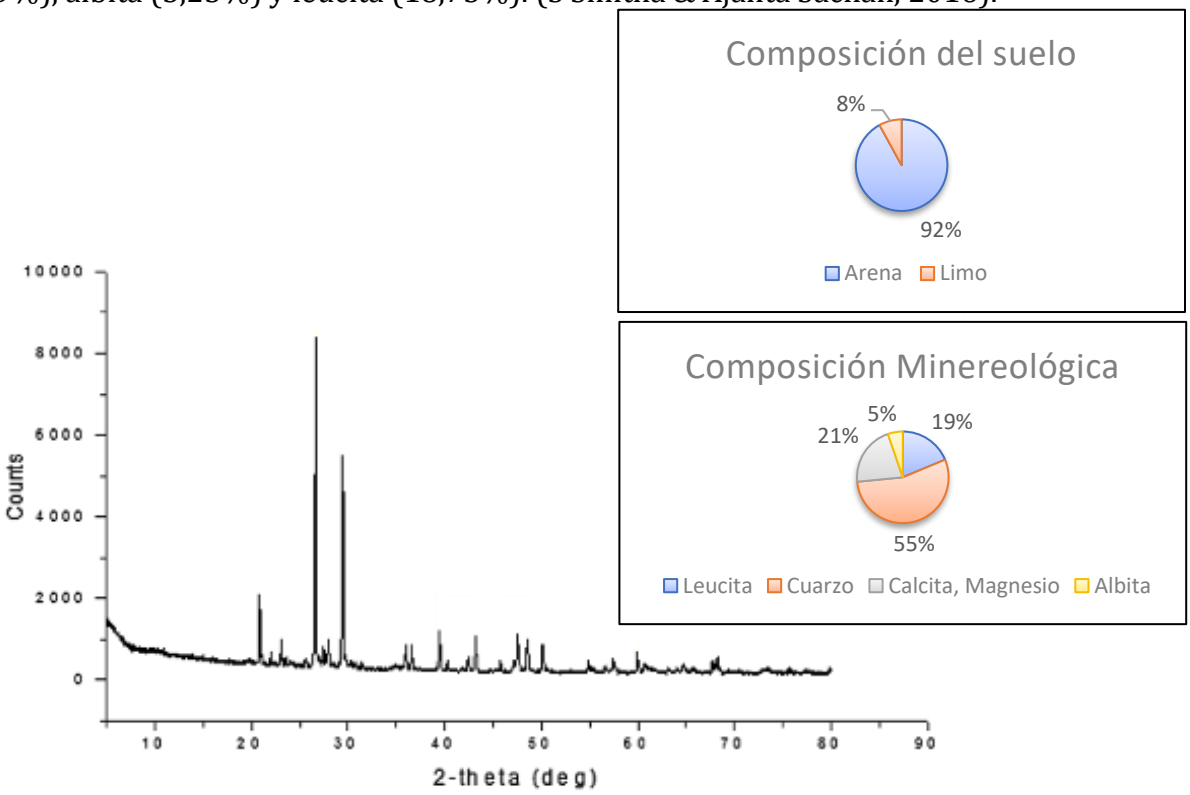


Figura 4-13 XDR muestra de suelo, composición mineralógica. Fuente: (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016)

De igual forma, se realizaron las pruebas de distracción de rayos X (XRD), con el equipo anteriormente mencionado, lo anterior con el fin de evaluar y reconocer la composición mineralógica del biopolímero propuesto. Se reconoce dentro del componente (biopolímero), ausencia de minerales y con una estructura amorfa, es decir, sus átomos se encuentran desordenados y desalineados en cualquier estado en que se encuentren: solido, liquido o gas.

Bajo la lectura además se encontró un comportamiento descendente en la micro estructura del biopolímero, teniendo en cuenta un radio de lectura igual al usado en la prueba realizada a la muestra del suelo.

Este estudio permitió conocer la composición de biopolímero y las especificaciones de este, reconociendo ciertas características como: humedad,

presencia de metales, tamaño de las partículas, temperatura de fusión, entre otras, las cuales se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla 4-2 Especificaciones del biopolímero de agar. Fuente: Laboratorios HiMedia

PROPIEDAD	PARÁMETRO / RESULTADO
Fuente	Gelidium
Fuerza Gel	998 g/cc
Solubilidad	Soluble en agua caliente cuya temperatura corresponda a 85°, insoluble en agua fría.
Absorción de agua	Un volumen de agua de 75 cm^3 es absorbida por 5.0 g.
Temperatura de fusión	>=85°C
Humedad	<=20%
Calcio	<=0.1%
Metales pesados	<= 0.004%
Tamaño de partícula	Menor que 40 ASTM

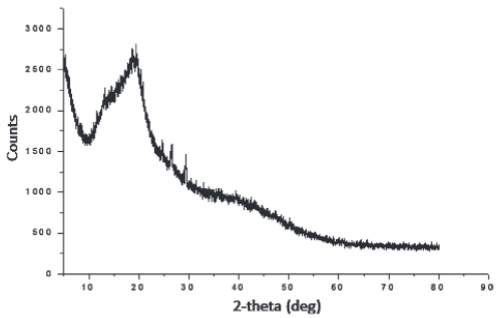


Figura 4-14 XDR – lectura de rayos XDR, compuesto mineralógico. Fuente: (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016)

De la lectura realizada en la lectura de rayos XDR se observa que en las ordenadas se indica las unidades electrónicas del microscopio, y en las abscisas los valores de radio de amplitud de lectura; para la Figura 0 1 XDR muestra de suelo, composición mineralógica. Fuente: (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016), se observa que las unidades electrónicas de la muestra del suelo varían en valores desde cero (0) hasta dos mil (2000) para la mayoría de ángulos teta de lectura, no obstante, existe una variación importante en el ángulo de lectura de valores 2.5 ha 3.2 aproximadamente; ahora bien, en la Figura 0 1 XDR muestra de suelo, composición mineralógica. Fuente: (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016), se evidencia un comportamiento descendente con unidades electrónicas entre los valores 1500 hasta 2750, para radios de lectura entre cero hasta 2.5, estabilizándose aparir de un radio de lectura de 5.0 manteniendo unidades electrónicas aproximadamente de 600.

4.5. CONCLUSIONES

Se recomienda realizar ensayos triaxiales CU, debido a que produce parámetros de resiste efectivos y totales, por lo que se evalúan condiciones a largo y corto plazo; no obstante, la elección de dichos parámetros está sujeta al alcance técnico del proyecto

geotécnico. Es necesario que el profesional tenga claro los parámetros de carga y drenaje, con el fin de que pueda asociar los ensayos con las características reales e las situaciones que se evidencian en campo.

Cabe resaltar, los parámetros más importantes a la hora de evaluar una muestra de suelo, se concentran en la resistencia al corte, dado que esta condición fundamenta y determina las acciones posteriores a realizar en las zonas de estudio.

Por otro lado, el análisis micro estructural de la muestras, permiten identificar la composición y la morfología de los elementos, estableciendo la distribución de cada uno de los compuestos, cantidad, tamaño y distribución; por lo anterior, esta información permitirá evaluar y tomar decisiones de tratamientos y mejoras que se puedan realizar sobre las muestras, a partir de su composición.

5. DISCUSIÓN DE LAS TENDENCIAS INTERNACIONALES DEL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS SUELOS ESTABILIZADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos con biopolímero, corresponde a proceso de estabilización química generada a partir de mezclas de suelo con estabilizantes químicos de origen orgánico, extraídos de compuestos naturales que no generan contaminación grave en su entorno, y por el contrario permiten el aprovechamiento, explotación y optimización de suelos con bajas características mecánicas, y físicas.

La variedad de estabilizantes químicos encontrados en el mercado y el bajo costo de adquisición de dichas materias, constituyen hoy en día un paso hacia la transformación, aprovechamiento y conservación del medio ambiente, lo anterior, teniendo en cuenta la posibilidad de reutilización de suelos que a la fecha han sido catalogados como contaminantes del ambiente.

En la actualidad, el proceso de estabilización química paso de ser un evento totalmente experimental, a un estudio minucioso apoyado en diferentes ciencias como: física, química, fisicoquímica, mineralogía, geología, entre otras; es decir, la diversidad de agentes estabilizantes amigables con el ambiente, constituyen un análisis profundo en las nuevas composiciones del suelo y la afectación sobre el producto final: suelos estabilizados, mejorando notablemente su comportamiento mecánico y su respuesta a la acción de cargas externas, cambios de temperatura, cambios en el ambiente, etc.

Además de resultar un proceso físicamente probable y efectivo, resulta ser un método sustentable, y con impactos mínimos en el medio ambiente, rentable dentro de un proyecto de ingeniería civil, y cuyos efectos permanecen a lo largo del tiempo.

Dentro de los múltiples estudios que se analizarán, se nombraran varios ensayos con diferentes tipos de suelo, bajo múltiples dosificaciones, tiempos de curado, y ensayos de resistencia, es preciso identificar la composición del suelo, y del adictivo elegido.

En los estudios recopilados se encontró, que la mayoría de las muestras tratadas de suelo, fueron identificadas en los grupos de clasificación A-6 o A-7, del sistema de Clasificación de suelos AASTHO, en donde los resultados mostraron ser efectivos; algunos mejorando la resistencia al corte, rigidez o la cohesión de las partículas.

5.2. TENDENCIAS RELACIONADAS CON LA RESISTENCIA AL CORTE

Basados en la información consultada en diferentes fuentes de información, tales como revistas especializadas e indexadas de los sistemas ISI y SCOPUS, se puede concluir, que a la fecha desde diferentes frentes científicos, técnicos y sociales, se realizan exhaustivas actividades que permiten identificar el trasfondo de diferentes problemáticas de contaminación, aprovechamiento de recursos naturales, reutilización de materiales, disminución de costos de producción, entre otras acciones que minimizan el impacto ambiental.

Cada uno de los artículos revisados, fueron seleccionados de acuerdo a la relación existente con el documento en desarrollo; en su mayoría son investigaciones que analizan la viabilidad del uso de biopolímeros de origen natural, en suelos con varias deficiencias mecánicas, los cuales en su momento son sustituidos por otras materias primas que poseen las características buscadas por los diferentes proyectos a ejecutar.

Teniendo en cuenta los datos encontrados, las alternativas de sustitución de material, actividades de compactación entre otras, elevan los costos generales de las obras, lo que conlleva a la ejecución de malas prácticas; es indispensable recalcar, los suelos constituyen la base esencial de cualquier tipo de construcción, razón por lo cual deben analizarse, y tomar decisiones acordes a las necesidades y recomendaciones de los profesionales.

Las investigaciones realizadas a la fecha, tienen en común hallazgos que demuestran usos eficientes de biopolímeros de origen natural, que inciden directamente sobre las propiedades mecánicas del suelo, y apuntan sobresalientemente para investigaciones sobre nuevas perspectivas de tecnología

verde que mitigaran en la era actual el deterioro acelerado de los recursos naturales (Biju & Arnepalli, 2018).

La principal dificultad del estudio de tecnologías verdes aplicadas en la estabilización de suelos, se encuentra centrada en el estudio de características como durabilidad, aplicación a diferentes tipos de suelo, lo anterior impide notablemente crear tratamientos tipo que se pueda aplicar de manera generalizada.

(Biju & Arnepalli, 2018), concluyen en su estudio la factibilidad de realizar estabilización de biopolímeros a través del análisis e investigación documental de diferentes fuentes bibliográficas que han demostrado los avances y las mejoras de las características del suelo.

(Soldo & Miletic, 2019), realizó un estudio experimental con el fin de evaluar la incidencia del biopolímero en suelos como: arena limosa y arcilla, a través de tres ensayos, entre ellos, pruebas triaxiales, en las cuales se realizan dos tipos de muestras, una de ellas sin ningún tipo de tratamiento, y la otra con 1% de Xanthan Gum, en su mayoría las muestras analizadas aumento su resistencia al confinamiento, comprensibilidad y al corte.

Para evaluar la resistencia al corte de los suelos antes enunciados, se realizo la prueba de triaxial no consolida- no drenada, en

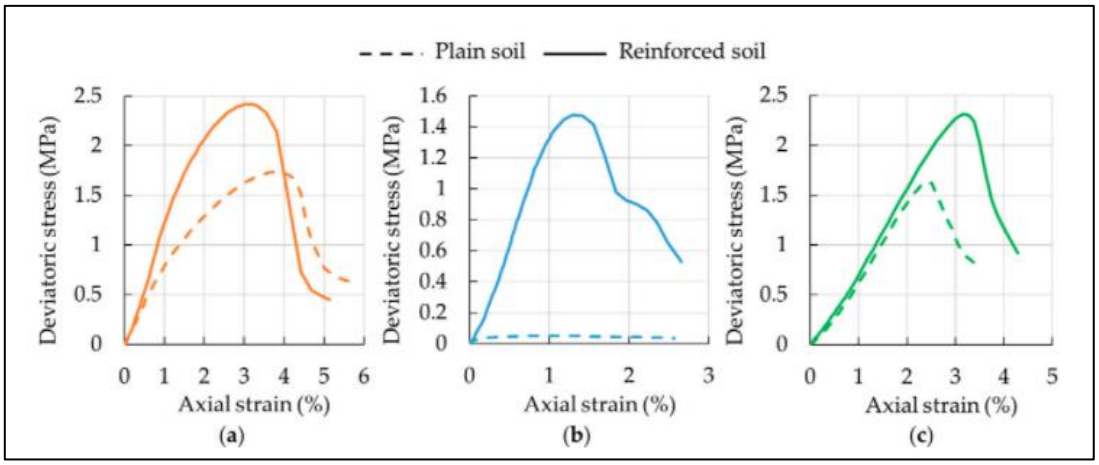


Figura 5-1 Ensayo triaxial UU en diferentes tipos de suelo, confinamiento de 103 kPa, con 1% de Xanthan Gum a) Arena limosa b) arena c) arcilla. Fuente: (Soldo & Miletic, 2019).

Los mejores resultados fueron obtenidos en las muestras de arena, dado que se optimizo la cohesión entre las partículas, y la respuesta de las mismas ante la exposición de cargas. En la Figura 5-1 Ensayo triaxial UU en diferentes tipos de suelo, confinamiento de 103 kPa, con 1% de Xanthan Gum a) Arena limosa b) arena c) arcilla. Fuente: . (Soldo & Miletic, 2019), se muestran los resultados obtenidos en el experimento.

De los estudios analizados, (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016), analiza la incidencia del biopolímero aplicado con relación a la resistencia al corte, tomando en cuenta los siguientes datos:

- Ángulo de fricción (ϕ=27°)
- Cohesión: c=0

Realizando el ejercicio de experimentación se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5-1 Resultados pruebas resistencia al corte, muestras tratadas y no tratadas. Fuente (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016)

Tiempo de curado	Concentración biopolímero agar (%)	Esfuerzo normal				C (kPa)	ϕ	Resistencia al corte (kPa)
		50 (kPa)	100 (kPa)	150 (kPa)	200 (kPa)			
7 días	0.5	66	83	107	130	43	23.4	64
	1.0	79	113	144	167	52	30.5	81
	2.0	108	138	174	201	76	32.1	108
	3.0	113	160	201	213	86	34.3	121
3 días	0.5	37	64	88	117	10	27.5	36
	1.0	39	67	89	119	13	27.6	39
	2.0	41	69	95	123	14	28.4	41
	3.0	46	79	102	132	19	29.5	47
1 día	0.5	36	60	81	112	10	26.5	35
	1.0	36	64	85	113	12	26.5	37
	2.0	41	70	93	121	15	27.8	41
	3.0	44	75	101	129	17	29.2	45
8 horas	0.5	34	57	81	107	10	26.5	33
	1.0	37	65	85	109	12	25.4	38
	2.0	39	70	93	120	15	27.8	41
	3.0	42	70	101	123	16	28.1	42
4 horas	0.5	35	58	86	107	11	25.8	35
	1.0	38	63	85	112	14	26.4	39
	2.0	39	66	90	116	14	27.2	39
	3.0	41	69	93	118	16	27.0	42

Tiempo de curado	Concentración biopolímero agar (%)	Esfuerzo normal				C (kPa)	ϕ	Resistencia al corte (kPa)
		50 (kPa)	100 (kPa)	150 (kPa)	200 (kPa)			
Suelo no tratado		23	52	79	104	0	27.0	25

Con el fin de evaluar de manera sistemática, clara y concisa la información antes dispuesta, tanto como el informe de investigación, como el documento que se desarrolla, se indicarán las gráficas, para mayor comprensión del lector cada una tendrá una breve explicación:

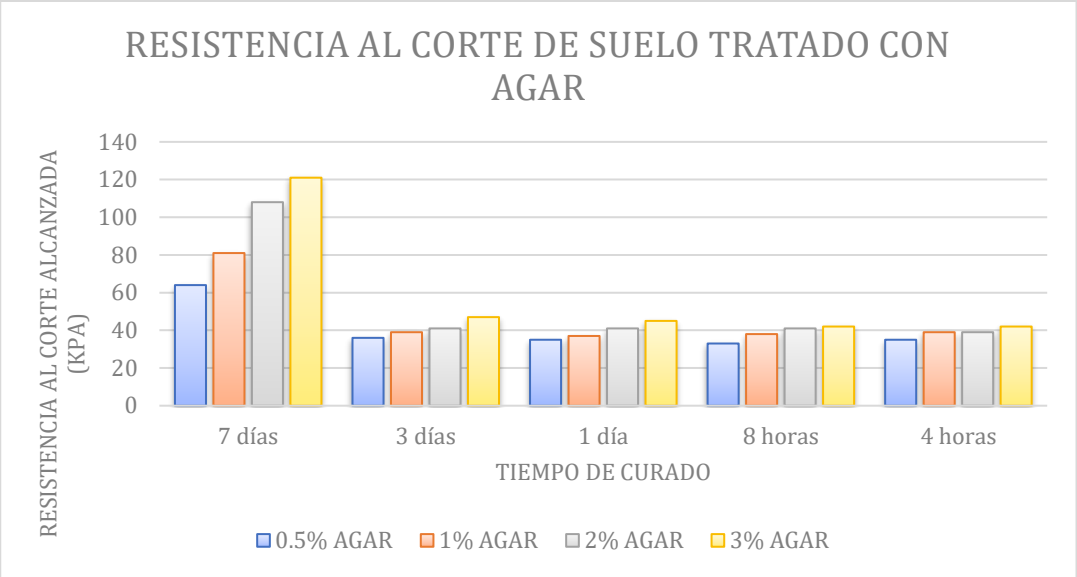


Figura 5-2 Resultados pruebas resistencia al corte, muestras tratadas y no tratadas. Fuente: (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016)

En la Figura 5-2 Resultados pruebas resistencia al corte, muestras tratadas y no tratadas. Fuente: , se ilustra el comportamiento de las muestras tratadas con las diferentes concentraciones del biopolímero, y los tiempos de curado aplicados; como se observa, para los siete días de curado se alcanza la resistencia máxima al corte en las muestras tratadas, y en este intervalo se analiza un crecimiento favorable en relación al aumento de concentración del biopolímero en la muestra de suelo, es decir, con una concentración de 3% durante siete días de curado se alcanza el valor máximo de resistencia.

Cabe notar que la relación dispuesta de concentración del 3% del biopolímero Agar, para todos los tiempos de curado aporta el mayor valor de resistencia al corte,

siendo esta una combinación optima para la estabilización y mejoramiento de suelos de iguales o similares características al suelo tratado (Arena de Sabamarti).

Según la tabla dispuesta anteriormente, la muestra de suelo no tratada genera una resistencia al corte de un valor total de 25 kPa, aplicando cualquiera de las relaciones dispuestas, la resistencia al corte menor que se podrá obtener oscilará en un valor de 33 kPa, correspondiente a una concentración de 0.5% de biopolímero Agar durante ocho horas de curado.

Ahora bien, con el fin de analizar el desplazamiento obtenido en cada una de las muestras, para cada relación se realizaron pruebas bajo la aplicación de esfuerzos normales con valores de 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, y 200 kPa; según las gráficas dispuestas del artículo de investigación se puede concluir que *"el punto de falla de cada una de las muestras se mueve los niveles de desplazamiento horizontal de más bajos a más altos con el aumento del contenido de agar, por lo que la fuerza entre partículas se fortalece, de tal forma que el suelo tratado difiere su falla a un mayor nivel de desplazamiento horizontal"* (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016).

Dicho de otra forma, cada vez que se toma una muestra de suelo y se aplica un mayor porcentaje de biopolímero agar, la fuerza entre partículas aumenta, de tal forma que permite el crecimiento del desplazamiento horizontal y su resistencia al corte.

El análisis realizado en el estudio, evaluó de igual forma el comportamiento del desplazamiento vertical de las muestras, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- El volumen de la muestra fue constante durante toda la fase experimental.
- El cambio positivo y negativo en el desplazamiento vertical de la muestra de suelo mostró la respuesta de dilatación y contracción correspondiente del suelo.

Si bien en el documento no se muestra una tabla de resultados con los valores de desplazamiento vertical de cada una de las relaciones planteadas, se identifican cuatro (4) graficas, en las cuales se relacionan los valores de desplazamiento vertical, el tiempo de exposición a cada uno de los esfuerzos normales (50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa), teniendo presente cada una de las concentraciones del biopolímero Agar para un tiempo de curado de siete (7) días.

En todas las figuras se identifica mayor contracción en el desplazamiento vertical para una concentración del biopolímero en relación con el 3%, sin embargo, este fenómeno se muestra de manera más rápida a medida que se aumentan los valores de los esfuerzos normales, esto se puede generar por la disminución de vacíos entre las partículas del suelo.

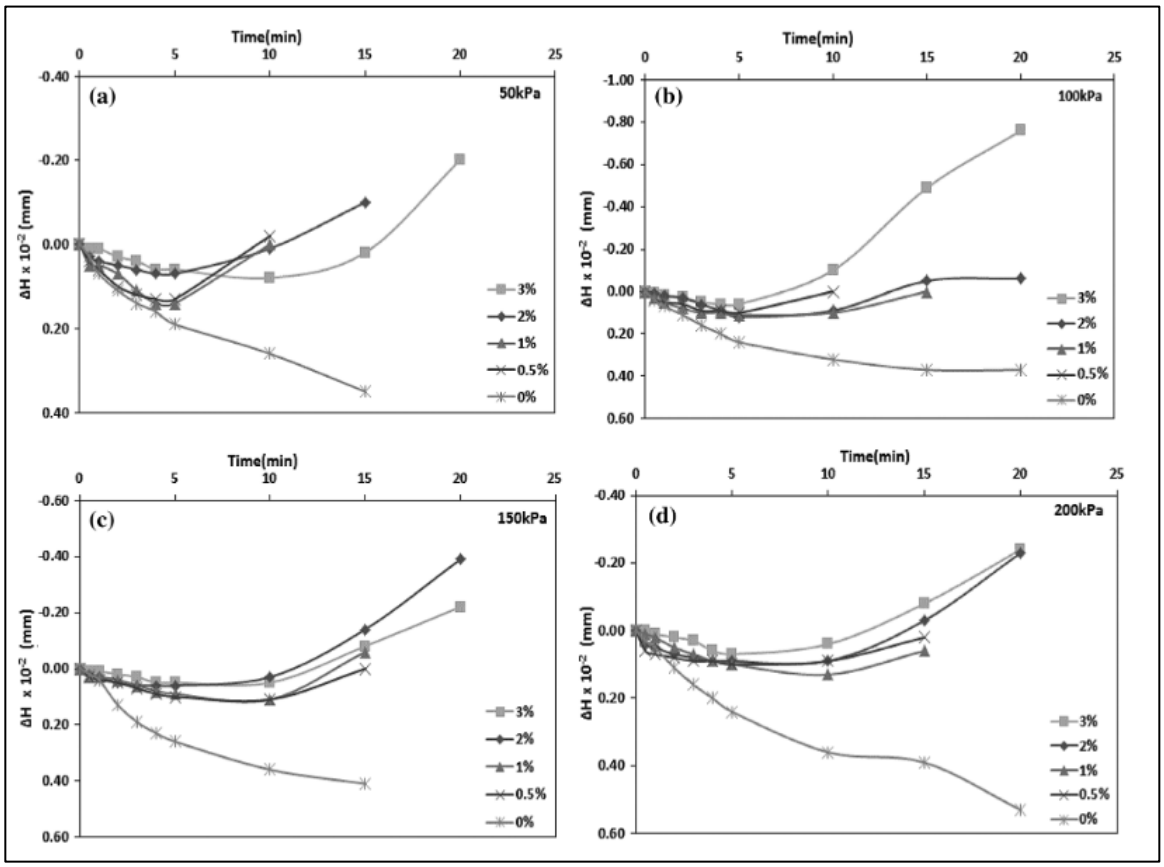


Figura 5-3 Dilatación y contracción de las muestras de suelo, tratadas con diferentes concentraciones de Agar, para un tiempo de curado de siete (7) días, para esfuerzos normales: 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, y 200 kPa. Fuente: (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016)

Los resultados de desplazamiento vertical, muestran el aumento de cohesión o las fuerzas entre las partículas del suelo, interpretado como el aumento de resistencia al corte y menor desplazamiento vertical, este fenómeno de igual forma se identifica en las imágenes microscópicas de barrido SEM, mostrando de igual forma un aumento de enlaces a mayor concentración, y aumento de fuerza de los mismos con el aumento del tiempo de curado.

La muestra de suelo no tratada, arroja un valor de resistencia al corte total de 25 kPa, un desplazamiento horizontal en valores hasta 4 mm para un esfuerzo normal de 50 kPa, aumentando en una unidad, es decir 5 mm +- 0.5 mm de desplazamiento horizontal para esfuerzos normal de 100 kPa y 150 kPa, y un valor entre 4 mm y 5 mm para un esfuerzo normal de 200 kPa.

Los valores mayores obtenidos para la resistencia al corte se encuentran a los siete días de curado, y aumentan significativamente para las concentraciones de 3% del biopolímero Agar.

El suelo tratado permite la exposición a condiciones de humedad, lo anterior debido a una absorción en la muestra expuesta a remojo de agua, la disminución de la resistencia al corte fue del 10% para muestras con concentración del 3% y 2%, y de 20% para una concentración de 0.5% y 1%.

Incluso en concentraciones bajas y tiempos de curado cortos, los valores de respuesta obtenidos para resistencia al corte mejoran significativamente, pasando de 25 kPa en muestras no tratadas, aumentando su resistencia desde 33 kPa hasta 121 kPa.

Por otro lado, (Nader Hataf, Pooria Ghadir, & Navid Ranjbar, 2018), determina que para este ensayo no existe una variación significativa en los resultados de resistencia a la compresión en relación al porcentaje de concentración de Quitosano en las muestras de suelo tratado, sino más bien, se encuentran ligados con el estado de humedad de la muestra del suelo.

Se reconoce que la resistencia a la compresión aumenta en las muestras de suelo en estado OC (Condiciones óptimas de agua), y mejora las características mecánicas del suelo en las primeras etapas; sin embargo, en altas concentraciones de quitosano, los resultados de resistencia a la compresión en suelos tratados, disminuyen igualándose a los resultados obtenidos en muestras no tratadas

Es importante notar, que en muestras curadas secas no existe influencia en la mejora de características mecánicas del suelo frente a la resistencia a la compresión, diferente, de muestras en condiciones OC (condiciones óptimas de agua), en donde se

generan enlaces que aumenta la cohesión del suelo, existiendo una variación en la resistencia debida a la formación del Quitosano sobre las partículas del suelo.

Por otro lado, es importante mencionar que las muestras curadas en condición CC, presentan una disminución de resistencia a la compresión debida al aumento del contenido de humedad en las muestras tratadas.

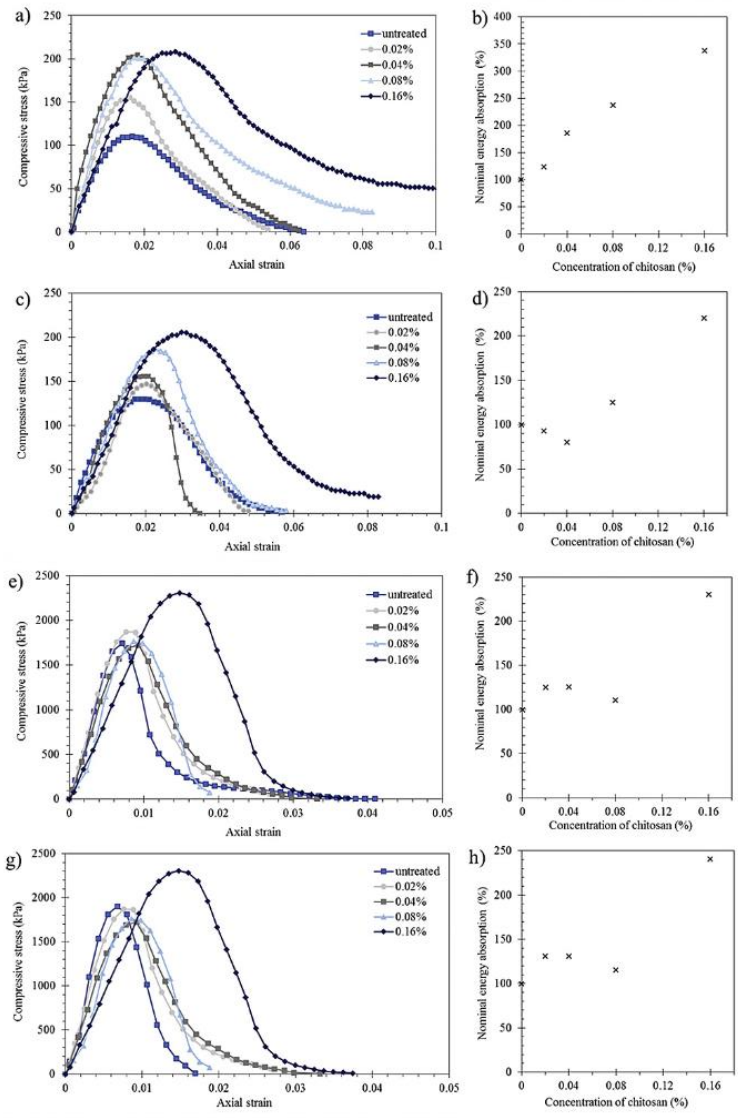


Figura 5-4 Resultados de compresión axial, muestras de suelos tratadas con Quitosano. a-b) Estado OC después de un (1) día. c-d) Estado OC después de 28 días, e-f) estado DC después de un (1) día, g-h) estado DC después de 28 días.

Con el fin de analizar la Figura 5-4 Resultados de compresión axial, muestras de suelos tratadas con Quitosano. a-b) Estado OC después de un (1) día. c-d) Estado OC

después de 28 días, e-f) estado DC después de un (1) día, g-h) estado DC después de 28 días., se tomarán dos escenarios, basados en el tiempo de curado y el estado de la muestra.

Tabla 5-2 Análisis de resultados de compresión axial y absorción de muestras tratadas y no tratadas con Chitosan, a partir de los datos de la Figura 5-4 Resultados de compresión axial, muestras de suelos tratadas con Quitosano. a-b) Estado OC después de un (1) día. c-d) Estado OC después de 28 días, e-f) estado DC después de un (1) día, g-h) estado DC después de 28 días. Fuente: Propia.

Tiempo de curado / Estado de suelo	**1 día**	**28 días**
ESTADO OC	Para las condiciones óptimas de agua el esfuerzo máximo de compresión al que puede llegar una muestra tratada es de más o menos 200 kPa, duplicándose en comparación con una muestra no tratada, sin embargo este esfuerzo máximo se alcanza par una deformación axial de más o menos 0.035 (concentración 0.16% de Quitosan), diferente de una muestra non tratada, en donde el esfuerzo axial corresponde a 0.019, valor que coincide para concentraciones de Quitosano de 0.02%, 0.04%, 0.08%, por lo que no existen cambios significativos en el esfuerzo axial, excepto para concentraciones de 0.16%. La esfuerzo máximo de compresión para concentraciones de 0.02%, 0.04%, 0.08%, oscila entre 150 kPa hasta 200 kPa. En cuanto a la absorción que se da en las muestras tratadas según la concentración de Quitosano, esta aumenta a medida que aumenta la concentración del biopolímero.	Para las condiciones óptimas de agua, el máximo esfuerzo de compresión se alcanza con una concentración de 0.16% de quitosano, alcanzando un valor de 200 kPa, correspondiente a un esfuerzo axial de más o menos 0.038. Para concentraciones de Quitosano de 0.02%, 0.04%, 0.08%, se tienen valores de compresión desde 140 kPa hasta 180 kPa. El suelo no tratado tiene un esfuerzo de compresión de
ESTADO DC	En el estado DC, se identifican esfuerzos de compresión máximos de 2400 kPa para una deformación axial aproximada de 0.019. Los suelos con concentraciones entre 0.02% y 0.08% arrojan resultados de compresión axial 1500 kPa a 1800 kPa, valores similares de compresión axial a la muestra de suelo no tratado, que da un valor de 1700 kPa. La concentración de Chitosan en un valor de 0.15% arroja una absorción aproximada de 240%; para concentraciones entre 0.01% a 0.08% se dan grados de absorción entre 100% y 135%	Para la máxima concentración de chitosan de 0.16% se da una absorción de 240% y una compresión axial de 2400 kPa con una deformación axial 0.015. Para las concentraciones de 0.02%, 0.04% y 0.08% se presentan deformaciones axiales entre 0.09 y 0.01, y compresiones axiales de 1600 kPa a 1800 kPa y absorciones 130% y 120%

5.3. TENDENCIAS RELACIONADAS CON LA MICROESTRUCTURA

En la Figura 5-5 Imágenes SEM de muestras de suelos tratadas con Xanthan. a) Arcilla b) Arcilla c) Arena Limosa d) arena limosa e) arena f) arena., muestran los resultados obtenidos en las muestras de suelo tratada con Xanthan (1%), demostrando que la interacción se fortalece según el tamaño de partículas del suelo, razón por la cual, el efecto generando en partículas finas es más fuerte. (Soldo & Miletic, 2019).

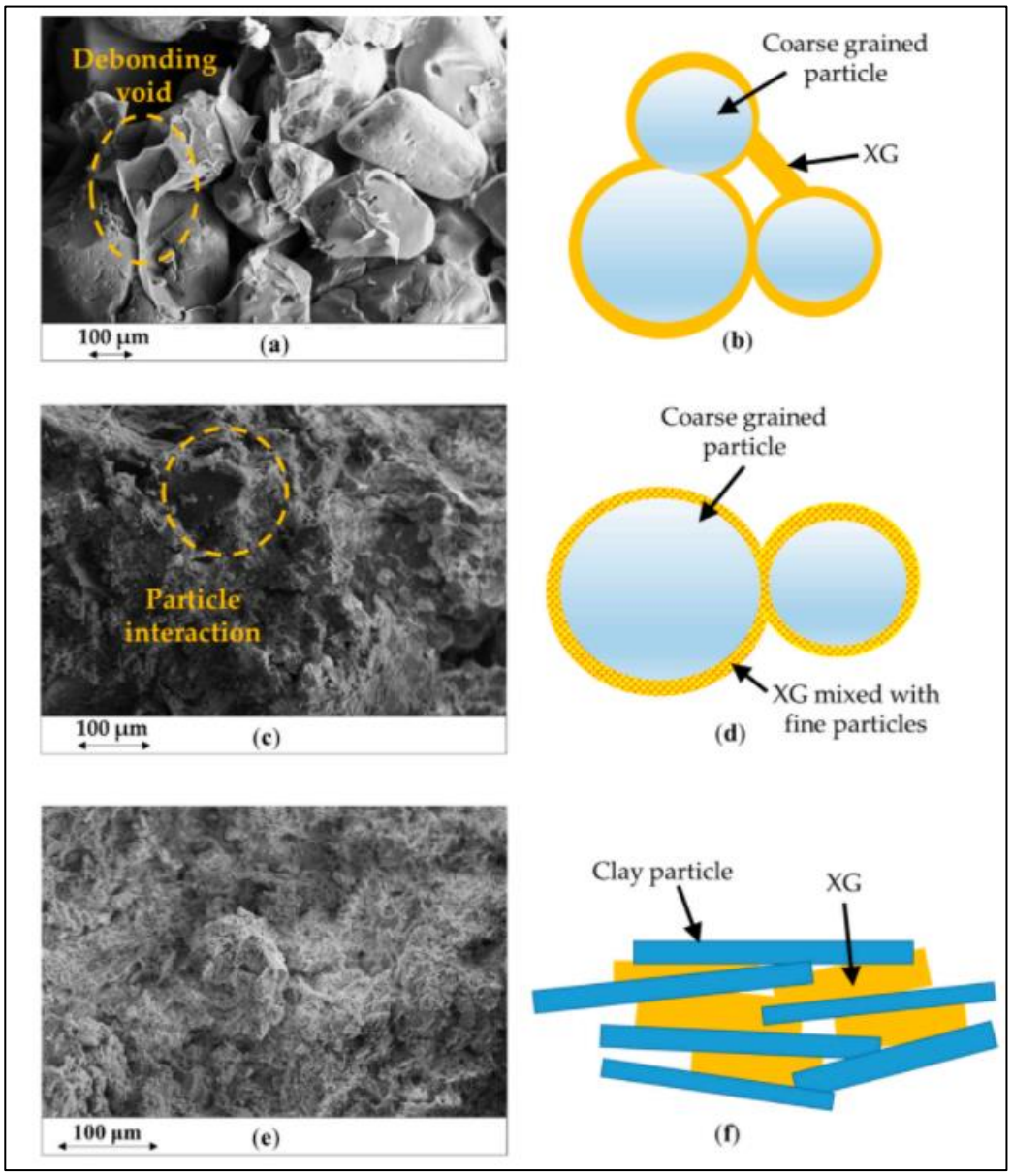


Figura 5-5 Imágenes SEM de muestras de suelos tratadas con Xanthan. a) Arcilla b) Arcilla c) Arena Limosa d) arena limosa e) arena f) arena.

Anteriormente, en la Figura 5-5 Imágenes SEM de muestras de suelos tratadas con Xanthan. a) Arcilla b) Arcilla c) Arena Limosa d) arena limosa e) arena f) arena., figura a) muestra una atracción fuerte, creando una interacción de contacto directo entre partículas.

En las figuras b) y c) se muestra como el biopolímero rodea cada una de las partículas que componen la muestra de suelo, identificando claramente el biopolímero y el suelo, distinto en las imágenes e) no se identifica claramente donde inicia o termina el biopolímero y la arcilla.

(S Smitha & Ajanta Sachan, 2016), precisa la acción del biopolímero Agar, como un elemento que forma una capa en la superficie de las partículas del suelo, aumentando el área de contacto y su unión, lo que finalmente mejora la resistencia al corte de las muestras, a su vez, cumple la función de llenar los vacíos o poros existentes en el suelo, es decir, el biopolímero se comporta como un agente cementante, aumenta la adhesión de las muestras.

En la fase experimental se comprobó claramente que el suelo (arena de Sabamarti), no tenía propiedades cohesivas, de tal forma que fue imposible realizar los ensayos de limite plástico y limite líquido, antecedentes que corroboran la acción cementante del biopolímero Agar, como compuesto estabilizante.

Además de las propiedades descritas, cabe resaltar, la capacidad de absorción de agua del biopolímero, razón por la cual, las cualidades cohesivas del suelo cambian significativamente. (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016).

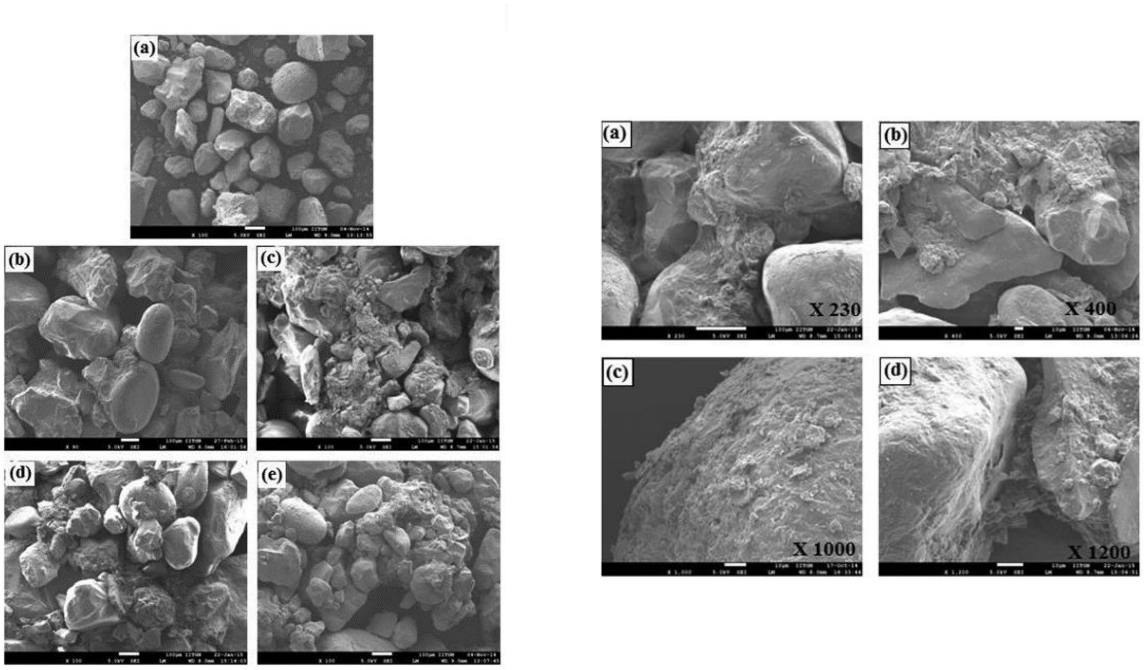


Figura 5-6 Imágenes SEM, **Lado izquierdo:** suelos tratados con biopolímero AGAR, concentración a)0% b)0.5% c)1% d)2% e)3%. **Lado derecho:** Unión entre partículas del suelo tratado. a) Rellenos de poros b) Formación de agregados c) Revestimiento d) Puente de conexión. Fuente: (S Smitha & Ajanta Sachan, 2016)

En la Figura 5-6 Imágenes SEM, **Lado izquierdo:** suelos tratados con biopolímero AGAR, concentración a)0% b)0.5% c)1% d)2% e)3%. **Lado derecho:** Unión entre partículas del suelo tratado. a) Rellenos de poros b) Formación de agregados c) Revestimiento d) Puente de conexión. Fuente: , se identifican los cambios generados en la microestructura del suelo y sus uniones, en estas se muestra el "relleno" que realiza el biopolímero, creando como se indicó anteriormente, una capa sobre la superficie de cada una de las partículas, localizándose adicionalmente en los vacíos que existen entre las mismas.

La profundidad de las imágenes permite identificar claramente la distancia entre cada partícula del suelo, tal como se muestra en la imagen a) del lado izquierdo, existe cero uniones, lo que implica que el suelo tenga una baja resistencia al corte, un desplazamiento vertical significativo; como se indica, esta muestra de suelo, es una muestra no tratada, por lo que las características de cohesión son nulas.

El valor agregado de las imágenes SEM, se basa netamente en el estudio de la microestructura del suelo, generando visuales internas de la composición de las

muestras estudiadas y sus reacciones ante la exposición y combinación de diferentes concentraciones, y enlaces.

Es claro, que en la imagen e), del lado izquierdo, se evidencia un llenado de vacíos y una alianza fuerte entre las partículas, es allí donde se identifica con mayor severidad la acción del componente cementante agregado a la muestra de suelo tratada, resaltando claro está, una concentración del biopolímero agar en un valor de 3%.

La micro estructura del suelo de una muestra no tratada, evidencia la separación y la ausencia de cohesión entre las partículas del suelo, razón por la cual las muestras de suelo arrojan valores bajos de resistencia al corte mínimos. El coeficiente de cohesión para esta muestra corresponde a Cero (0) y el Angulo de fricción es de 27°

La cementación de partículas y la fuerza que se genera en estos enlaces aumenta en relación a los tiempos de curado, y al porcentaje de concentración aplicado del biopolímero.

(Nader Hataf, Pooria Ghadir, & Navid Ranjbar, 2018), demuestra que las muestras tratadas con el biopolímero permiten que las partículas del suelo fortalezcan o creen enlaces que unan y eliminen los vacíos que impiden la cohesión. A continuación, se muestran imágenes ópticas realizadas en el estudio *"Investigation of soil stabilization using chitosan biopolmer, Nader Hataf, Pooria Ghadir, Navid Ranjbar",* en las cuales se evidencia el cambio de la red porosa del suelo tratado por puentes tridimensionales.

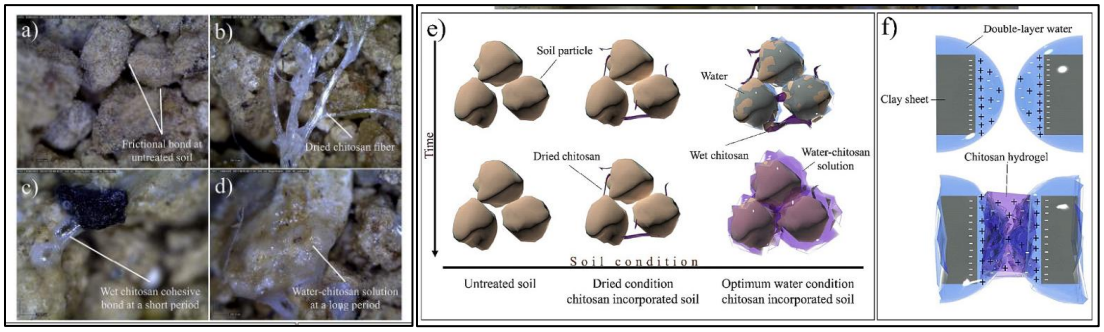


Figura 5-7 Imágenes ópticas de a) Partículas de suelo sin tratar, suelos tratados con Chitosan. b) condición de CC, c) a corto plazo y, d) estados de OC a largo plazo, diagrama esquemático de muestras de arcilla e-f) microescalas. Fuente: (Nader Hataf, Pooria Ghadir, & Navid Ranjbar, 2018)

En el análisis en mención se obtuvieron los siguientes resultados de cohesión y ángulos de fricción para las muestras tratadas y no tratadas en el estudio:

Tabla 5-3 Resultados ángulos de fricción y Cohesión de las muestras tratadas y no tratadas con diferentes concentraciones de Chitosan. Fuente. (Nader Hataf, Pooria Ghadir, & Navid Ranjbar, 2018)

Concentración de Chitosan (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Sin tratar	10.3	21.8
0.02	15.7	20.3
0.04	20.7	20.8
0.08	24.3	21.3
0.16	30.3	22.3

Para comprender la influencia del ángulo de fricción, es importante que el lector reconozca este parámetro como la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual se despeja de la siguiente ecuación:

$$Coeficiente\ de\ rozamiento = Tan\ \varphi$$

Este valor matemático depende del tamaño, distribución, densidad y forma de las partículas; características que no son visibles al ojo humano, razón por la cual se realizan análisis de imágenes SEM.

Por otro lado, se debe entender la cohesión como una medida de cementación o adherencia entre las partículas del suelo; para este ensayo se evaluó la cohesión mecánica que representa la resistencia al cortante producida por la cementación o unión entre las partículas del suelo.

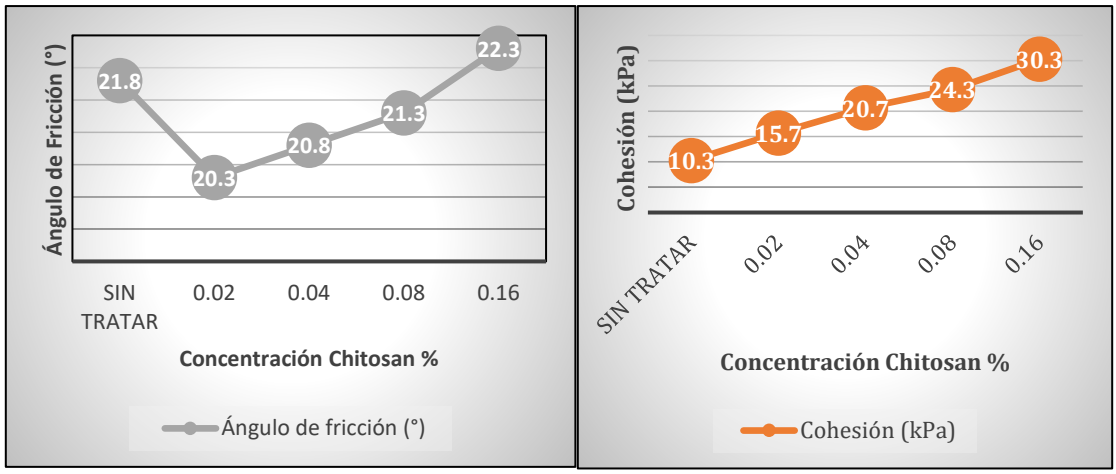


Figura 5-8 Comportamiento ángulos de fricción y cohesión de las muestras tratadas y no tratadas de suelo. Fuente: PROPIA, a partir de datos de Fuente: (Nader Hataf, Pooria Ghadir, & Navid Ranjbar, 2018)

Como se observa, el ángulo de fricción no presenta cambios significativos en las muestras tratadas, lo anterior dado que sus valores se encuentran muy cercanos, incluso, es vital recalcar que dicho ángulo disminuye para concentraciones de 0.02%, de allí los resultados de compresión axial obtenidos en la Tabla 5-2 Análisis de resultados de compresión axial y absorción de muestras tratadas y no tratadas con Chitosan, a partir de los datos de la Figura 5-4 Resultados de compresión axial, muestras de suelos tratadas con Quitosano. a-b) Estado OC después de un (1) día. c-d) Estado OC después de 28 días, e-f) estado DC después de un (1) día, g-h) estado DC después de 28 días. Fuente: Propia.

Ahora bien, la cohesión del suelo aumenta significativamente en las muestras tratadas, especialmente para las concentraciones de Chitosan de 0.16%,.

Los datos arrojados de los ensayos de compresión axial, y absorción dependen del estado de saturación de la muestra y el tiempo de curado; no obstante, para concentraciones de Chitosan de 0.02%, 0.04% y 0.06% los resultados no son notorios, es decir, en comparación con la muestra no tratada no existen un mejoramiento significativo en la respuesta mecánica del suelo, diferente de las muestras con concentraciones de chitosan de 0.08% y 0.16%, en donde aumentan los valores de respuesta de manera significativa.

Las concentraciones de Quitosano evaluadas en porcentajes de 0.02%, 0.04%, 0.08%, y 0.16%, no influyen en el mejoramiento de la resistencia a la compresión del suelo, lo anterior, debido a la humedad de la muestra, para obtener resultados mecánicos aceptables en cualquiera de las relaciones antes mencionadas, es necesario, que la muestra de suelo se encuentre en estado OC (Condiciones óptimas de agua).

6. CONCLUSIONES

- En virtud de la agenda de "Objetivos de desarrollo sostenible 2030", la aplicación de nuevas tendencias de investigación y de ingeniería geotécnica, pueden contribuir a mitigar los daños ambientales producidos por la construcción en los últimos años, las nuevas tendencias indicadas en el documento, permiten reutilizar y aprovechar materias primas que son desechadas y que contribuyen de gran manera en su disposición final en puntos de contaminación concentrados, que amenazan claramente con la biodiversidad, alteraciones en el entorno y crisis financieras.
- A la fecha, se han creado múltiples investigaciones que analizan la estabilización de suelos con propiedades mecánicas bajas, que impiden su uso en las diferentes obras de ingeniería civil, razón por la cual se han explorado varias alternativas de solución que permitan garantizar su aprovechamiento sin variar las condiciones de calidad del proyecto, entre estas la estabilización y el mejoramiento. La estabilización de suelos, según se caracterice, puede ser mecánica, química, o física.

  Actualmente, en sitio (obra), se han ejecutado varias estabilizaciones químicas, con productos de origen artificial, los cuales han sido reglamentados y explotados de manera genérica, aumentando proporcionalmente los índices de contaminación y explotación, consecuencias que demuestran la ausencia de soluciones eficientes que mitiguen o eliminen el problema de raíz.

  Por lo descrito, los investigadores han incursionado en la evaluación de materias primas de origen natural, que brindan y optimizan los suelos, residuos de construcción y demolición, mejorando la respuesta mecánica ante la exposición de carga, variaciones climáticas y del entorno.
- La aplicación de biopolímeros en los suelos, puede ser extendida como solución a problemas erosivos, por lo que no solo tendría beneficio en el campo de la construcción, si no también en el campo agrícola; en razón de esto, Colombia, un territorio en expansión, desarrollo, y agrícola por naturaleza, sería un consumidor director de biopolímeros como la Goma Xantana, y Goma Guar,

siendo a su vez, un productor directo, dado que cuenta con los insumos bases para la producción en masa de dichos componentes.

- Es importante seleccionar tecnologías amigables con el ambiente, sostenibles e innovadoras, que garanticen el re uso de materias primas bajo condiciones y estándares de calidad altos que no afecten el resultado final de los proyectos.
- Dentro de la producción de Gellan Gum, no es prudente realizar suministros de carbono a partir de lácteos y sus derivados, basados en la gran contaminación que produce el sector de la ganadería, no obstante, se puede dar el aprovechamiento de dichos insumos bajo la garantía de la conservación de los ecosistemas y el retorno en escala proporcional de los recursos; sin embargo, el productor puede recurrir a insumos como el almidón soluble, que le proporcionaran fuentes de carbono eficientes en un 200%.

  Se recomienda para futuras investigaciones mezclar los aditivos como: Goma Guar, Goma Xantana o Gellam Gum en estado seco, lo anterior para optimizar los procesos de homogenización con las partículas de suelo y obtener resultados óptimos.
- El ensayo triaxial, es reconocido como una prueba de elevado costo que entrega resultados completos en estudio de geotecnia, lo anterior, debido a que permite la evaluación de las muestras mediante la inducción de falla a través de los esfuerzos de confinamiento y esfuerzos desviadores; lo descrito, indica que se evalúan condiciones reales simuladas en la prueba, bajo escenarios drenados y no drenados, escenarios válidos y tangibles que se extrapolan a las situaciones vividas en campo; adicionalmente, esta prueba permite contemplar planos con inclinaciones respecto a la horizontal, afinando aún más los resultados obtenidos en laboratorio.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda para futuras investigaciones realizar el uso de ensayos *Observación de microestructura por barrido SEM;* lo anterior con el fin de validar los cambios intermoleculares que suceden en las muestras tratada y no tratadas. Estos estudios realizan un acercamiento visual claro para el investigador, que le permite aclarar e identificar los enlaces microestructurales que se realizan a partir de la inclusión de biopolímeros para la estabilización de suelos.
- Los tiempos de curado que se realicen en las muestras estabilizadas con Biopolímeros deben estar en ambientes controlados, que permitan identificar al observador los cambios microestructurales y macroestructurales producidos por as sustancias evaluadas.
- Frente a los campos de investigación analizados en el presente documento, se sugiere a futuros investigadores, realizar estudios sobre las siguientes líneas:
    - Producción de biopolímeros a partir de los desechos de comida de mar, producidos en la costa pacífica colombiana, sustentando su alcance, en la contaminación y desperdicio que se genera al alrededor de estas materias primas.
    - Estabilización y prevención de suelos erosivos mediante *el biopolímero Gellan Gum,* en zonas de estudio como: La Guajira, Magdalena, Cesar, Santander y Meta; contemplando estos departamentos como áreas en aumento de desertificación y baja vegetación, dado a las prácticas de ganadería y agricultura que incentivan la quema de los terrenos y la deforestación.
    - Estudio de mercado para la evaluación de la estabilización de suelos mediante los biopolímeros como Gellam Gum y/o Goma Xantana vs. Estabilización de suelos con cemento, cal y fosfatos.
    - Evaluación de la producción de biopolímeros con fermentantes como la caña de azúcar.

- Estudio comparativo de la respuesta mecánica de una muestra de suelo residual estabilizada con cal Vs. Una muestra de suelo estabilizada con Gellan Gum

BIBLIOGRAFÍA

ASTM D4015. (2015). Standar Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Columna Devices.

Biju, M. S., & Arnepalli, D. N. (2018). Biopolymer-Modified Soil: Prospects of a Promising Green Technology. *Geotechnical Characterisation and Geoenvironmental Engineering*, 163-169. doi:DOI: 10.1007/978-981-13-0899-4_20

Borja, D. R. (2020, Junio 17). *Estabilización de suelos, metodología eléctrica*. Retrieved from Estabilización de suelos, metodología eléctrica: https://www.youtube.com/watch?v=78N9_Ms0gvc

Candela Rozo , C. A., Clevel Noriega, H. D., & Torres Romero, C. E. (2020). Guía de laboratorio del ensayo de columna resonante utilizando el equipo TSHA-100 de la Universidad Santo Tómas. Bogotá. Retrieved from Repositorio Universidad Santo Tomás: https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30965/2020carloscandela.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Cigarroa Mayorga, O., Vázquez- Vázquez, E., Rojas-Chávez, H., Hernández-Rodríguez, Y., & Morales Bautista, J. (2021). The role of AuNPs on the photocatalytic degradation enhancement in MoO3-based heterostructures. *Materials Letterss*. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129464 / https://www.youtube.com/watch?v=Zlmb0d2vMpc

Das, B. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería Geotécnica.* Cengage Learning.

Diaz, A. (2005). *Dinámica de sueloss.* Mexico D.F: Limusa.

Dimitrios, T., & Lyesse, L. (2019). A decade of progress and turning points in the understanding of bio-improved soils: A review. *ELSEVIER*, 2-3.

Dirk, B., Guido, F., & Christian, M. (2008). Binding of bivalent cations by xanthan in aqueous solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 245-251.

Elisas Abdul, I. B. (2013). Efecto de la Microestructura en la Permeabilidad, la Compressabilidad ante Carga y el Módulo de Corte de un Limo Arcilloso Compactado. *Máster en ingnieria dle Terreno e Ingeniería Sísmica.*, 5.

Escobar, G. D., & Escobar, C. E. (2016). *Geomecánica.* Manizales: UN.

Estelle Delfosse - Ribay, Irini Djeran-Maigre, Richard Cabrillac, & Daniel Gouvenot. (2004). Shear modulus and damping ratio of grouted sand. *Soil dynamics and Earthquake Engineering*, 461-471.

Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures. (2016). *Arab J Geosci*, 371.

F. Rivera, J., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos-Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador Técnico*, 202-226. doi:10.23850/22565035.2530

Ilhan Chang, & Gye-Chun Cho. (2014). Geotechnical behavior of a beta - 1,3/1.6-glucan biopolymer - treated residual soil. *Geomechanics and Engineering*, 633-647.

Ilhan Chang, Awlia Kharis Prasidhi, Jooyoung Im, Hyun-Dong Shin , & Gye-Chun Cho. (2015). Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes. *Geoderma*, 253-254.

Ishwar B. Bajaj, Shrikant A. Survase., Parag S. Saudagar , & Rekha S. Singhal. (2007). Gellam Gum: Fermentative Production, Downstream Processing and Applications. *Food Technol Biotechnol*, 341-354.

J.A. Casas, V.E. Santos, & F. García-Ochoa. (2000). Xathan gum production under several operational conditions: molecular structure and rheological properties. *Enzyme adn Microbial Technology* , 282-291.

Jooyoung Im, An T.P. Tran, Ilhan Chang, & Gye-Chun Cho. (2016). Dynamic properties of gel -type biopolymer - treated sands evaluated by REsonant Column (RC) Tests. *Geomechanics and Engineering*, 815-830.

Mohamed K., A., Abdelazim M., N., & Mostafa A., E. (2016). Evaluating the physical characteristics of biopolymer / soil mixtures. *CrossMark*, 371. doi:10.1007/s12517-016-2366-1

Mohamed, A., & Masaki , K. (2017). Enhancing mechanical behviors of collapsille soil using two biopolymers. *CSRME*, 329 - 339.

Montejo Fonseca, A., Montejo Piratova, A., & Montejo Piratova, A. (2018). Estabiización de suelos. In A. Montejo Fonseca, A. Montejo Piratova, & A. Montejo Piratova, *Estabilización de suelos* (p. 350). Bogotá: Ediciones de la U.

Nader Hataf, Pooria Ghadir, & Navid Ranjbar. (2018). Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer. *ELSEVIER*, 1493-1500.

ONU, N. U. (2020, 11 09). *OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE 2030*. Retrieved from OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE 2030: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/

Perez Ayala, H. I. (2016, 11 30). Ensayo de Corte Directo y el Efecto de la Variación del Área. Caracas.

Piqueras Yepes, V. (2019, 06 28). *Electroósmosis como técnica de drenaje del terreno*. Retrieved from Electroósmosis como técnica de drenaje del terreno: https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/casagrande/

S Smitha, & Ajanta Sachan. (2016). Use of agar biopolymer to improve the shear strength behavio of sabamarti sand. *International Journal of Geotechnical Engineering, 10*(4), 387-400. doi:10.1080/19386362.2016.1152674

Soldo, A., & Miletic, M. (2019). Study on Shear Strength of Xanthan Gum Amende Soil. *Sustainability*, MDPI.

ANEXOS

ANEXO NO. 1. GLOSARIO

Absorción del agua. Los minerales arcillosos absorben y almacenan el agua. La absorción del agua en los minerales arcillosos depende de la capacidad de intercambio catiónico y de la superficie específica de las partículas (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Arena. Son materiales reconocidos normalmente por las siguientes características: no son plásticas, no se retraen al secarse, son de baja compresibilidad, en ocasiones nula, el tamaño de sus partículas es mayor de 0.06 mm, no tiene cohesión, y el volumen de los poros puede ser de hasta máximo un 50% (Escobar & Escobar, 2016)

Arcilla. Son grupos minerales definidos, como caolinita, ilita y montmorillonita, donde participan estructuras octaédricas y tetraédricas. La arcilla como el humus, posee propiedades coloidales. Las arcillas, en sentido mineralógico, son cristales microscópicos cuyos átomos están dispuestos en planos. Esta composición de suelo se distingue por ser plástica, retraerse al secarse, ser compresible, cohesiva, se comprime lentamente ante cargas; cuyas partículas se distinguen por un tamaño menor de 0.02 mm. Los procesos de suspensión se tardan a excepción de los procesos de floculación. (Escobar & Escobar, 2016)

Biopolímero. Los biopolímeros son macromoléculas de origen natural producidos a partir de plantas, residuos biológicos u orgánicos; formados en ambientes controlados, bajo la producción de bacterias como la sphingomonas paucimobilis, que permiten la creación de nuevos enlaces. Son biodegradables y amigables con el ambiente. (Mohamed K., Abdelazim M., & Mostafa A., 2016)

Deformación elástica. Deformación que se recupera totalmente al cesar el esfuerzo que la produjo. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Deformación permanente. Deformación que se conserva cuando el esfuerzo que la produce ha sido removido. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018) (Escobar & Escobar, 2016)

Deformación. Cambio de la forma de un material o una estructura or la aplicación de un esfuerzo mecánico. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Electrólisis. Es la solución que contiene compuestos químicos disueltos y que se disocian para formar iones. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Electrones. Son partículas con cargas negativas. Los electrones constituyen parta del átomo, al igual que los protones y neutrones; estos últimos se alojan en el núcleo del átomo, mientras que los electrones giran en la periferia del átomo. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Electroquímica. E el proceso químico mediante el cual existe transferencia de cargas eléctricas en las reacciones químicas, a través de un medio químico o acuoso. Por ejemplo, las moléculas de agua (H_2O) se pueden disociar en una reacción química en iones de hidrógeno (H^+) e iones de hidróxido (OH^-). En muchas reacciones químicas, se generan procesos de oxidación o reducción. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Erosión. Se entiende como erosión el transporte o remoción de las partículas superficiales del suelo, por acciones naturales como: viento o agua, o como respuesta final acciones de deforestación, excavación u otras actividades ejecutadas por la actividad humana. (Escobar & Escobar, 2016)

Consolidación. Es la reducción gradual de volumen del suelo por compresión debido a la aplicación de cargas estáticas. También (Escobar & Escobar, 2016) puede darse por pérdida de aire o agua, o aire. (Escobar & Escobar, 2016)

Compactación. Es la densificación del suelo, lograda por medios dinámicos, con el proposito de mejorar sus propiedades ingenieriles. (Escobar & Escobar, 2016)

Estabilización granular. Es una combinación de métodos de estabilización de métodos de estabilización de tipo físico y/o fisicoquímico. Con este sistema se modifica el comportamiento del esqueleto del suelo fino, mediante el uso de mezclas y/o rellenos con otros materiales; este sistema se puede complementar con la construcción de drenes de arena y/o columnas de bravas, en algunos sectores. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Estabilización química. En este sistema juega un papel importante la interacción química, en lugar de la fisicoquímica y la física. En la estabilización química, se le adiciona al suelo un componente químico, se le adiciona al suelo un componente químico; como agentes de estabilización química se mencionan la cal, el cemento, el asfalto, los silicatos, las resinas, los ácidos, los lignitos, los óxidos metálicos, residuos de carbón (cenizas) y algunos elementos cáusticos. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Expansividad. La expansividad se presenta en las arcillas por la absorción de agua en la superficie de las partículas, ya sea por hidratación de los cationes de cambio o expansión intercristalina, o la expansión osmótica, por la carga intra - laminar de las montmorilonitas sódicas y por presión en los bordes de las esmegtitas magnésicas (saponitas). (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

La pérdida o ganancia de electrones lleva a que el átomo se cague eléctricamente; los átomos con carga eléctrica se llaman iones. Cuando los átomos ganan un electrón se denominan aniones y presentan una carga eléctrica negativa, mientras que cuando pierden un electrón se denominan cationes y la carga es positiva.

Limos. Este grupo mineral tiene una resistencia baja, con reacción rápida frente a vibración o dilatancia. La superficie de estos materiales es humedad y se opaca rápidamente al ejercer presión. Son de secado rápido, aumentando su fragilidad en el límite plástico. (Escobar & Escobar, 2016)

Microestructura. Se comprende como microestructura a la relación de tamaño, forma y posición de las partículas de la materia estudiada, y se mide mediante la técnica de Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP). Para una misma densidad seca se

consiguen diferentes microestructuras variando la humedad de compactación. Su evaluación permite comparar los cambios de estructura y la respuesta mecánica a diferentes acciones mecánicas e hidráulicas (Elisas Abdul, 2013)

Módulo dinámico. El módulo de elasticidad define la relación entre el esfuerzo al que está sometido el material y su deformación unitario. . (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Módulo dinámico. Modulo que caracteriza el comportamiento de un material a la deformación bajo solicitaciones dinámicas. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Módulo resiliente. Módulo que caracteriza el comportamiento a deformación elásticas de suelos y materiales granulares. En un ensayo triaxial de carga repetida a presión de confinamiento constante, es el módulo secante en la descarga, es decir, la relación entre el esfuerzo desviador y la deformación elástica unitaria axial. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Oxidación. Se presenta cuando el átomo pierde uno o más electrones, pasando a ser un ion positivo o catión. El electrodo o el sitio sobre el metal donde se presenta la oxidación se llama ánodo; por ejemplo, cuando un átomo de hierro neutro se oxida, puede perder dos o tres electrones, dando así iones de hierro con carga positiva. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Permeabilidad. Es la capacidad de un suelo de permitir el paso de un fluido a través suyo. (Escobar & Escobar, 2016)

Porosidad. Es la relación, expresada como un porcentaje, entre: a) volumen de espacios vacíos de un suelo, y b) el volumen total de la muestra. O sea, es la probabilidad de encontrar vacíos en el volumen total. (Escobar & Escobar, 2016)

Reducción. Es la ganancia de un átomo de uno o más electrones, llegando a ser un ion negativo o anión; por ejemplo, cuando se reduce un ion de hidrógeno, gana un electro producción un átomo de hidrógeno neutro. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Relación de Poisson. Relación entre la deformación normal al esfuerza aplicado a un elemento y la deformación paralela al esfuerzo. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Resistencia al corte: Se entiende como el valor máximo de esfuerzo cortante que puede soportar una masa de suelo. (Das, 2013)

Suelo residual. Suelo formado por la meteorización in situ del material parental. (Escobar & Escobar, 2016)