

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS A PEQUEÑAS
DEFORMACIONES DE SUELOS ESTABILIZADOS QUÍMICAMENTE CON
ADITIVOS POLIMÉRICOS**

HAROL LEON ZAMBRANO URBANO

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ
2021**

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS A PEQUEÑAS
DEFORMACIONES DE SUELOS ESTABILIZADOS QUÍMICAMENTE CON
ADITIVOS POLIMÉRICOS**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE MAGÍSTER EN
INFRAESTRUCTURA VIAL**

DIRECTOR

JORGE ARTURO PINEDA JAIMES, PH.D.

INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL

BOGOTÁ

2021

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

A mi esposa Yuly, por su paciencia,
sacrificio y apoyo incondicional.

A mis hijos Sara y Jerónimo
por sacrificar tiempo de juegos y
compartir juntos para que logre este proceso.

AGRADECIMIENTOS

En la vida Dios nos pone en el camino grandes personas y es nuestra decisión elegir las personas que contribuirán con el crecimiento personal y profesional, de mi parte acerté en esa decisión y es por esto que este proyecto se hace realidad, por la paciencia, dedicación y el don de compartir sus conocimientos y la dedicación a investigar del Doctor Jorge Arturo Pineda Jaimes, quien fue el pilar fundamental para llevar a cabo este trabajo de grado, Mil gracias y Dios le recompensara el tiempo dedicado a transmitir sus conocimientos.

Agradecer a la Universidad Santo Tomas por permitirme ser parte de esa gran familia Tomasina y darme la formación como Magister en Infraestructura Vial de tan importante Claustro Universitario.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	13
2. INTRODUCCIÓN	14
3. JUSTIFICACIÓN	19
4. OBJETIVOS	23
4.1 Objetivo General	23
4.2 Objetivos Específicos	23
4.3 Alcance	23
5. METODOLOGÍA	24
6. INDICADORES	26
6.1 Indicadores del Suelo Natural	26
6.2 Indicador del aditivo	26
6.3 Indicadores del Suelo Estabilizado	26
7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	27
7.1 Definición de Suelo	27
7.2 Propiedades a considerar para estabilizar suelos	30
Humedad del suelo	30
Subrasante de una vía	30
Asentamientos en la subrasante	31
7.3 Estabilización de suelos	31
7.4 Clasificación de suelos con fines de estabilización	33
Resistencia	36
Compresibilidad	38
Estabilidad Volumétrica	40
Permeabilidad	42
Durabilidad	43
7.5 Ensayos de Laboratorio	44
Límites de consistencia / Límites de Atterberg	44
Límite Líquido	44
Límite Plástico	45
Compresión inconfiada	46

Proctor	46
C.B.R. (Relación de soporte Californiano)	46
Ensayo en Columna Resonante	47
7.6 Tipos de estabilización de suelos	49
Estabilización por compactación	49
Estabilización con materiales ligeros	49
Estabilización con sobrecargas	49
Estabilización con reemplazo de material	50
Estabilización con geosintéticos	50
Estabilización química	50
Tratamientos fisicoquímicos	51
Estabilización iónica	51
Estabilización térmica	51
Estabilización con polímeros	52
7.7 Aditivos a base de organosilanos	54
8. MARCO NORMATIVO	55
9. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	56
9.1 Diseño de la investigación	56
9.2 Metodología empleada en la investigación	57
9.3 Localización de zona de estudio	57
9.4 Técnicas de medición, instrumentos e indicadores	58
9.5 Técnicas e instrumentos de medición de características físicas y mecánicas	58
10. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES	59
10.1 Ubicación del material para estudio	59
10.2 Geología de la zona	62
10.3 Formaciones Geológicas	64
11. ANÁLISIS DEL SUELO NATURAL.	69
11.1 Caracterización del suelo natural	69
Descripción del suelo	69
11.2 Clasificación del suelo	70
Humedad Natural	70
Límite Líquido	70

	8
Límite Plástico	70
Índice de Plasticidad	70
Límite de Contracción	71
Gravedad Específica	71
Material pasante del tamiz No 200	71
Hidrometría	71
Actividad	72
Equivalente de Arena	72
11.3 Clasificación Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	72
11.4 Clasificación AASHTO	73
11.5 Propiedades de Resistencia del Suelo Natural.	73
Proctor	73
C.B.R.	74
Compresión Inconfinada	74
Sensitividad	75
12. PROCESO DE MODIFICACIÓN DEL SUELO	77
12.1 Determinación de la cantidad optima de aditivo.	77
12.2 Manejo del producto.	78
13. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LA MUESTRA DE SUELO MODIFICADO	79
Límite Líquido	79
Límite Plástico	79
Índice de Plasticidad	80
Límite de Contracción	81
Relación de Contracción	82
13.1 Propiedades de Resistencia del Suelo Modificado.	83
Proctor	83
C.B.R.	84
Compresión Inconfinada	88
Columna resonante	90
14. CONCLUSIONES	99
15. RECOMENDACIONES	101
16. REFERENCIAS	103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 factores de composición y factores ambientales	28
Tabla 2 Factores de composición y ambientales que contribuyen a las propiedades de ingeniería	29
Tabla 3. Rangos de valores de coeficientes de permeabilidad en suelos	43
Tabla 4. Normas y especificaciones INVIAS - ASTM usadas	55
Tabla 5. Información del CIV	58
Tabla 6. Resultados prueba de hidrometría	71
Tabla 7. Resumen resultados ensayo C.B.R.- Suelo natural	74
Tabla 8. Resumen de resultados de caracterización del suelo en estado natural.....	75
Tabla 9. Determinación de la cantidad de agua y masa del suelo	78
Tabla 10. Resultados de C.B.R. suelo natural y modificado.....	88
Tabla 11. Modelos de parámetros A y B para el suelo natural y suelos modificados.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Bucles de esfuerzo cortante-deformación en la prueba de columna resonante y cálculo de la relación de amortiguación:	16
Figura 2. Modelo de Kevin Voigt	18
Figura 3. Distribución de red terciaria en Colombia CONPES 3857	20
Figura 4. Relación de amortiguación con presión de confinamiento	38
Figura 5. Curva de deformación típica de suelos	40
Figura 6. Cambio de volumen del suelo en relación con el contenido de coloides, índice plástico y límite de contracción	42
Figura 7. Equipo de Columna Resonante y espécimen ensayado	48
Figura 8. Etapas desarrolladas en la investigación.....	57
Figura 9. Ubicación del tramo de estudio vista general	60
Figura 10. Ubicación del tramo de estudio vista específica	60
Figura 11. Imágenes de detalle del sitio	61
Figura 12. Imágenes de detalle del sitio	61
Figura 13. Geología de la zona de estudio	63
Figura 14. Mapa geológico del Sinclinal de Usme	68
Figura 15. Curva Proctor densidad Vs Humedad.....	73
Figura 16. Comparación del Límite Líquido suelo modificado	79
Figura 17. Comparación del Límite Plástico suelo natural vs suelo modificado	80
Figura 18. Comparación del Índice de Plasticidad suelo natural vs suelo modificado	81
Figura 19. Comparación del Límite de Contracción suelo natural vs suelo modificado	82
Figura 20. Comparación de la relación de contracción suelo natural vs suelo modificado	83
Figura 21. Comparación de los resultados, ensayo Proctor suelo natural vs suelo modificado.....	84

Figura 22. Comparación del CBR a 10 golpes suelo natural vs suelo modificado	85
Figura 23. Comparación del CBR a 25 golpes suelo natural vs suelo modificado	86
Figura 24. Comparación del CBR a 56 golpes suelo natural vs suelo modificado	87
Figura 25. Comparación de la Compresión Inconfinada del suelo natural vs suelo modificado ...	89
Figura 26. Gráficas de Amortiguamiento vs PFS en los suelos analizados	91
Figura 27. Gráfica de los esfuerzos cortantes máximos Vs PFS	92
Figura 28. Gráfica variación del amortiguamiento (D) Vs confinamiento (P)	93
Figura 29. Variación del Gmax con el Confinamiento	94
Figura 30. Frecuencia Vs Esfuerzo Cortante (%) – P 200 MPa.....	96
Figura 31. Curvas de Degradación del Módulo	97
Figura 32. Relación de amortiguamiento Vs esfuerzo cortante	98

1. RESUMEN

En la actualidad en Colombia, se hacen esfuerzos ingentes por tener una red de carreteras robusta y en óptimas condiciones de operación. Esto ha llevado a las entidades públicas y privadas a implementar nuevas alternativas de construcción como el uso de materiales estabilizadores de suelos con materiales no convencionales, siendo conveniente para la ingeniería colombiana, hacer la adecuada transferencia de conocimiento evaluando el impacto, y la posibilidad del uso para los suelos del territorio nacional mediante validaciones que den sustento técnico y científico con el fin de tener alternativas durables, económicas y amigables con el medio ambiente, garantizando la economía y estabilidad de las obras viales.

En el presente documento se realiza el análisis de las propiedades físicas y la determinación de las propiedades dinámicas en el equipo de Columna resonante, de un suelo de subrasante en estado natural el cual fue el referente para comparar las mismas propiedades después de ser modificado con un producto modificador de suelos comercial en el territorio nacional. Se realizaron pruebas básicas de clasificación y resistencia del suelo, así como pruebas especiales de medición del amortiguamiento y módulo de corte en el equipo de Columna Resonante tanto al suelo natural como al mismo suelo luego de la adición del modificador. Los resultados obtenidos indican que el modificador tiene efectos positivos a la luz de pruebas convencionales de evaluación de resistencia y propiedades físicas, sin embargo, al determinar las propiedades dinámicas los resultados no son los mejores, el suelo modificado presenta disminución en el amortiguamiento e incremento en la rigidez lo que lo hace susceptible a bajas deformaciones.

Palabras Clave: Clasificación de suelos, Columna Resonante, Deformaciones, Estabilización de suelos, Polímeros, Resistencia, Resistencia física.

2. INTRODUCCIÓN

Este trabajo surge de la necesidad de poder contribuir con el desarrollo social de nuestro país, teniendo claro que los proyectos de infraestructura vial son los que más aportan al desarrollo de las regiones, es por esto que debemos tener vías en óptimas condiciones de transitabilidad, garantizando la movilidad de carga, productos agrícolas, así mismo mejorar la calidad de vida de los ciudadanos.

En los últimos años, la estabilización de suelos con materiales no convencionales ha despertado mayor atención en los investigadores alrededor del mundo. En diferentes estudios realizados sobre este tema se concluye que este tipo de estabilizadores son eficaces al incrementar la resistencia del suelo y disminuir la susceptibilidad al agua, sin embargo, respecto al comportamiento de los suelos modificados en cuanto a sus propiedades dinámicas no se ha investigado mucho, por cuanto este tema aún se encuentra en desarrollo.

La presente investigación está orientada a evaluar la respuesta física y mecánica con el fin de determinar las propiedades dinámicas de un suelo en estado natural y este mismo siendo modificado con un estabilizador de tipo polimérico, teniendo un poco más de conocimiento sobre una de las múltiples alternativas para mejorar los suelos de subrasante, así como la posibilidad de mejorar los materiales producto del movimiento de tierras de las carreteras y que estos puedan ser utilizados en el mismo proyecto, de tal manera que la alternativa de intervención para el mejoramiento de estos suelos, sea viable económicamente, durable y ambientalmente amigable.

La metodología empleada está enfocada en análisis de laboratorio, evaluando las características físicas y la respuesta dinámica de un suelo de subrasante mejorado con un

aditivo comercial en nuestro país, de tal manera que sea factible realizar la comparación de los resultados y llegar a la conclusión de la viabilidad de estabilizar los suelos con este tipo de materiales que cada día son más comunes en Colombia.

Las propiedades dinámicas de los suelos como la rigidez y el amortiguamiento son un área que se encuentra continuamente en desarrollo debido a la complejidad del tema, cada día se desarrollan nuevas técnicas, así como equipos que nos permitan conocer un poco más afondo lo relacionado con el estudio de la dinámica de los suelos en todas las áreas de la ingeniería civil y afines.

Los suelos de cimentación de carreteras, así como los diferentes materiales granulares que conforman la estructura de un pavimento son de gran importancia en la estabilidad, durabilidad y el mantenimiento de una obra de infraestructura vial, sin embargo, aun hoy en día no se les da la debida importancia a las propiedades dinámicas de estos materiales, teniendo completa claridad que estas nos permiten conocer y predecir de manera acertada el comportamiento de los suelos, llevándonos así a poder estimar si el suelo que se usa en los proyecto tiene un comportamiento adecuado en el tiempo y su comportamiento frente a las pequeñas deformaciones inducidas por el tráfico que es propio de cada vía y de cada proyecto.

El tema de conocer el comportamiento dinámico es muy relevante, si llevamos el tema un poco más allá frente al comportamiento de los suelos de carreteras frente a sismos, en donde ante la ocurrencia de estos eventos las vías terminan muy afectadas incrementando el número de decesos al no poder movilizar los heridos hasta centros asistenciales debido a la imposibilidad de moverse por los corredores viales destruidos principalmente se corredores rurales.

Para obtener una muy buena aproximación a la rigidez se obtiene del módulo cortante G , el cual se puede obtener mediante el cálculo de la velocidad de ondas sísmicas, mientras que el amortiguamiento ξ , nos indica la capacidad de un suelo para disipar la energía, estos parámetros nos permiten estudiar y conocer de manera muy acertada el comportamiento de los suelos. Las vibraciones ocasionadas por terremotos y cargas cíclicas en las obras de infraestructura provocan en los suelos un comportamiento de tensión-deformación no lineal que se representa mediante la curva de histéresis deformación de corte y tensión de corte que se presenta en la figura 1.

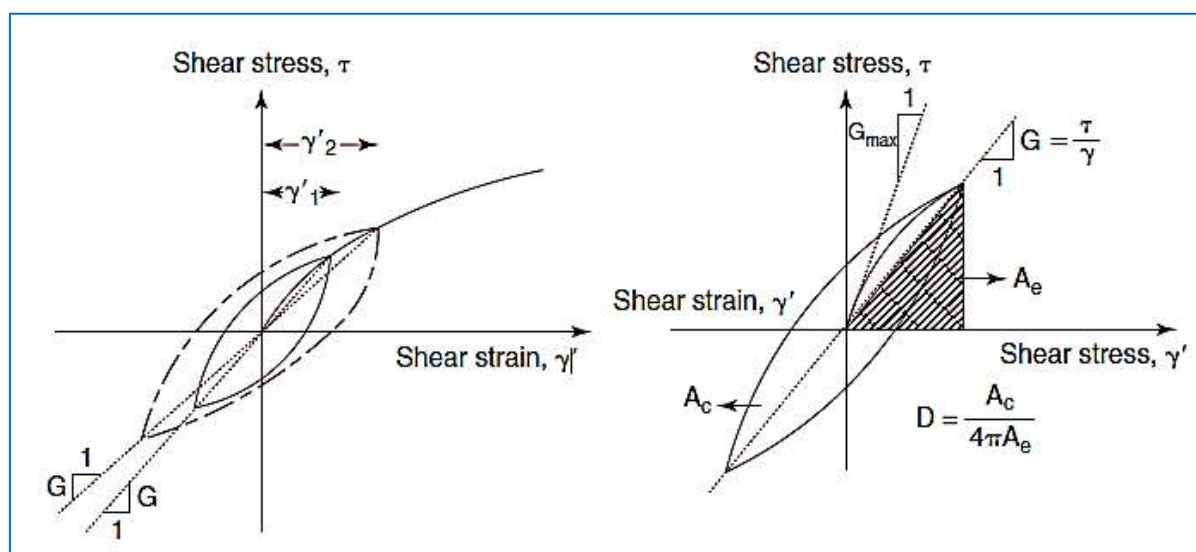


Figura 1. Bucles de esfuerzo cortante-deformación en la prueba de columna resonante y cálculo de la relación de amortiguación:

- (a) Evolución del bucle tensión-deformación. (b) Cálculo del módulo de corte y la relación de amortiguamiento.

Fuente: Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils (p205), por Briaud, J.-L., 2013.

El módulo cortante está definido como es la relación entre la tensión y la deformación cortante en un punto de la curva y es una medida de que tan duro es el material, este se obtiene calculando la pendiente de la curva de histéresis.

El módulo de corte máximo (G_{max}), calculado como el valor de la pendiente de la recta tangente en el punto inicial de la curva, el módulo de corte tangente (G_{tan}) que es el valor de la pendiente en un punto de la curva y el módulo de corte secante (G_{sec}) que se calcula como la pendiente de la recta secante a la curva.

El comportamiento visco-elástico se puede entender de mejor manera mediante el modelo de Kevin Voigt, los materiales plásticos presentan un comportamiento visco-elástico, de sólido elástico y líquido viscoso al mismo tiempo en donde su comportamiento mecánico se encuentra relacionado con la variable tiempo, para lo cual se requiere conocer información sobre el comportamiento a largo plazo para poder evaluar la respuesta mecánica de los materiales y así optimizar los procesos tanto de cálculo como de diseño.

La información se puede obtener mediante gráficos de comportamiento elástico, curvas de fluencia, o partir de modelos viscoelásticos que consideran la utilización de un elemento elástico (resorte) combinado con un elemento viscoso (émbolo) con el fin de obtener expresiones que nos permitan explicar el comportamiento mecánico del material uno de los modelos más sencillos es el modelo de Kevin Voigt.

Este modelo parte de la combinación de un elemento elástico y un elemento viscoso en paralelo, considerando que internamente trabajan en paralelo como indica la figura 2.

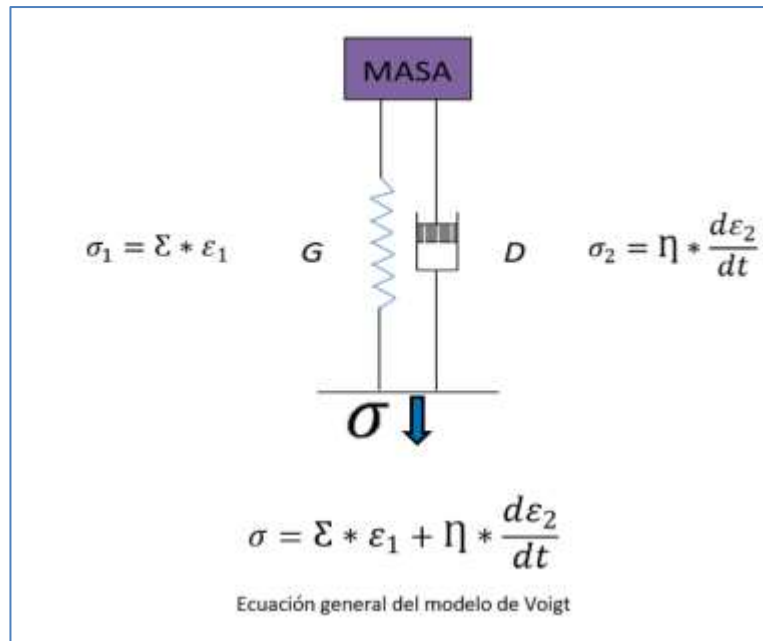


Figura 2. Modelo de Kevin Voigt
Fuente: el Autor

Las expresiones básicas que rigen este comportamiento son:

Para el elemento elástico,

- La tensión que soporta el elemento elástico (σ_1)
- La deformación del elemento elástico (ε_1)
- Constante del elemento elástico. (Σ)

Para el elemento viscoso

- La tensión que soporta el elemento viscoso (σ_2)
- La deformación del elemento viscoso (ε_2)
- Constante del elemento viscoso(η)

Al trabajar estos elementos en paralelo se puede considerar que las deformaciones y las tensiones son iguales, así como la tensión total es la suma de las tensiones de cada uno de los elementos elástico y viscoso.

La ecuación definida por Voigt, involucra tensiones, deformaciones y el tiempo, un modelo adecuado que nos permite explicar el comportamiento viscoelástico.

3. JUSTIFICACIÓN

El plan maestro de transporte Intermodal, especifica que el estado colombiano, con el fin de organizar de forma eficiente y estratégica el crecimiento y desarrollo del país, así como compromisos adquiridos en los acuerdos de paz, se enfoca en el desarrollo de la infraestructura vial orientado en especial a las vías terciarias con el fin de conectar las diferentes regiones, las ciudades, las fronteras y los puertos de nuestro país, priorizando los proyectos de mayor impacto para la economía nacional, de esta manera se generan modelos de asociaciones como las concesiones y proyectos ambiciosos en la infraestructura de las vías, teniendo en cuenta que aproximadamente el 80% de la carga del país se mueve por vía terrestre. (Agencia Nacional de Infraestructura, 2015)

Al respecto conviene decir que el funcionamiento de las vías en condiciones óptimas de niveles de servicio es importante, debido a que el buen estado de la infraestructura permite desarrollo, así como el crecimiento económico de las poblaciones, al mismo tiempo garantiza la movilización lo cual es relevante para los diferentes sectores comercial entre ellos sector agrícola; “las vías regionales tienen la mayor extensión en el territorio nacional; representan el 69,4% del total de la malla vial nacional y en conjunto con las vías secundarias comprenden el 91,5%.” (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2016, pág. 9) De manera general, Colombia cuenta con 142.284 kilómetros en vías terciarias de los cuales: 98.000 kilómetros se encuentran en ‘afirmado’, 33.600 kilómetros en tierra (sin ningún tipo de tratamiento) y 8.400 kilómetros pavimentados, en donde se estima que solo el 25% se encuentra en buen estado. La figura 3, representa la distribución de la red terciaria en Colombia.



Figura 3. Distribución de red terciaria en Colombia CONPES 3857

Fuente: el autor

Una de las variables para determinar si una vía se debe pavimentar o no, es volumen de tráfico, cuando este es bajo, económicamente es inviable su intervención mediante algún tipo de pavimento, sin embargo esto no significa que se deben dejar estos corredores en el olvido, por el contrario, se debe buscar una opción diferente para que estas vías, en especial las terciarias estén en buenas condiciones, sin que ello implique que una carretera para que se encuentre en buenas condiciones tiene que estar pavimentada.

La problemática de la Nación en diferentes campos como, el político, social, económico y ambiental, se ven reflejados en el desarrollo de este, siendo Colombia uno de los países en donde la calidad de la infraestructura vial es de los más atrasados en la región.

El Foro Económico Mundial publicó el Reporte Global de Competitividad 2019-2020, en donde, además de destacar el impacto que tiene la infraestructura en la calidad de vida, presenta a Chile como el país con mejores carreteras en el puesto 42/141, seguido de México 54/141 y Colombia en el puesto 81/141 en cuanto al pilar de infraestructura se refiere, en

donde nuestro país en cuanto a carreteras tiene puntajes de 65.4 en conectividad y tan solo un puntaje de 39.7 de calidad de su infraestructura ubicándolo entre los países con mayores problemas en su red vial. (World Economic Forum 2019).

Para las vías terciarias de nuestro territorio se creó el CONPES 3857-2016 en el cual destinan una cantidad significativa de recursos para construcción, mejoramiento y rehabilitación de estas vías. Algo más que añadir es que en el país aún no se implementan prácticas que impulsen a mejorar la calidad de los suelos mediante técnicas recientes, las cuales busquen que los procesos constructivos rápidos y eficientes, técnicas que sean viables económicamente, socialmente justas y ambientalmente amigables; en la última década se ha venido desarrollando la estabilización de suelos con materiales no convencionales, que han demostrado ser en otros países técnicas eficientes, durables y viables económicamente.

Es por esto que, se busca estudiar los efectos de un estabilizador de suelos de tipo polimérico a un suelo colombiano en estado natural y comparar los resultados del mismo suelo modificado, estos bajo el mismo contexto.

Es importante tener conocimiento sobre el tema de suelos mejorados con nuevas tecnologías ya que en nuestro país las investigaciones en este campo hasta el momento son mínimas y las pocas existentes se basan en ensayos de clasificación y resistencia mediante pruebas muy básicas las cuales se practican desde hace décadas y no están acorde con las actualizaciones de nuevas pruebas de laboratorio como la resistencia de los materiales, en Colombia y en los países cercanos no se conoce aún el comportamiento resiliente y las deformaciones de suelos mejorados bajo la aplicación de cargas cíclicas, estudio que es relevante ya que los materiales de una vía están sometidos continuamente a sollicitaciones dinámicas generadas por el tráfico las cuales finalmente fatigan los materiales, esto sumado a

las diversas clases de suelo, y condiciones climáticas que causan deterioros acelerados de la estructura de los pavimentos.

La determinación de propiedades dinámicas de suelos estabilizados químicamente se analizará mediante el comportamiento resiliente del suelo en estado natural respecto al mismo suelo mejorado bajo el mismo contexto, así mismo se analizará el cambio en las propiedades básicas de los suelos con ensayos de clasificación y resistencia.

Para medir y analizar el comportamiento dinámico del suelo a bajas deformaciones (Módulo cortante y amortiguamiento), se ejecutarán pruebas de laboratorio en el equipo Columna Resonante. La determinación de las propiedades dinámicas en suelos estabilizados con aditivos, generará aportes relevantes al conocimiento sobre las bondades de la modificación de suelos usados como parte de la estructura multicapa de los pavimentos. Este estudio aportará procedimientos que conducirán a la determinación de la cantidad óptima del modificador seleccionado para el estudio y presentará los resultados de laboratorio obtenidos, comparaciones medibles de las pruebas que se realizarán en laboratorio.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Determinar las propiedades dinámicas de un suelo estabilizado con un aditivo polimérico, mediante pruebas de laboratorio básicas y especiales en el equipo de Columna Resonante.

4.2 Objetivos Específicos

- Deducir la cantidad óptima de aditivo para el suelo en estudio.
- Establecer propiedades dinámicas del suelo sin modificar y el efecto que tiene la adición del modificador al mismo suelo.
- Evaluar las diferencias y las tendencias de los comportamientos del suelo en estado natural y el suelo modificado.
- Cuantificar las mejoras en las propiedades de los suelos
- Analizar los beneficios que este aditivo aporta al suelo.

4.3 Alcance

La presente investigación se centró en evaluar un suelo de subrasante modificado con un aditivo comercial en Colombia con el propósito de analizar su comportamiento a bajas deformaciones, determinando sus propiedades físicas y dinámicas tanto en estado natural como modificado. Esto implica determinar el proceso de modificación, determinación de la cantidad optima del aditivo, el tiempo de curado y posteriormente la determinación de las propiedades mediante pruebas de laboratorio básicas y la evaluación de las propiedades dinámicas mediante el ensayo de Columna resonante.

5. METODOLOGÍA

En el campo de la ingeniería civil, específicamente en el área de suelos, la técnica de estabilización con polímeros es muy utilizada para mejorar su comportamiento, esfuerzo y deformación (Borda Riveros & Aguilar Castañeda, 2016)

La presente investigación, está desarrollada con el propósito de obtener información relevante acerca del comportamiento del suelo al ser sometido a pequeños esfuerzos y bajas deformaciones siendo estabilizado con un material estabilizados no convencional que se encuentra actualmente en el mercado.

Para el desarrollo del proyecto se ejecutaron las siguientes actividades:

- Se realizó la búsqueda, recopilación y estudio de información existente sobre el tema de estabilización de suelos con polímeros en sitios web de universidades, bases de datos y aplicaciones web cuyo fin es recopilar tesis e investigaciones relacionadas con el área, este proceso será continuo durante todo el proceso de desarrollo de esta la investigación, aunque en la fase inicial se debe tener conocimiento de investigaciones que existen recientemente y las que se encuentran en desarrollo.
- De la información analizada, se seleccionarán las investigaciones que tenga relación con los parámetros establecidos en los objetivos como casos similares que se haya o estén desarrollando con el fin de tener en cuenta los procedimientos, resultados, las recomendaciones, para de esta manera optimizar labores en el desarrollo de la investigación y minimizar posibles inconvenientes con el fin de evitar reprocesos.
- Con esta información estudiada y analizada, se ejecutaron todas las actividades que se plantearon como objeto de análisis en la investigación, se inició por la selección del lugar

en que se tomó el material objeto de estudio, se programaron las pruebas de laboratorio requeridas, al mismo tiempo, al ir finalizando cada ensayo se fue realizando el proceso y análisis de los resultados para tener el control de la información que se está obteniendo, así de esta manera poder ir tomando decisiones pertinentes sobre la metodología que se está desarrollando de ser necesario. Los ensayos que se realizaron fueron: clasificación del suelo, proctor, C.B.R., Compresión no Confinada, y Columna resonante.

Una vez se tuvo la información de la investigación analizada se dio paso a realizar el informe final de resultados con todos los sustentos que se obtuvieron en el desarrollo de las pruebas, posteriormente se generará el documento final del proyecto en donde se evidencie el resultado final de la investigación y que permita el planteamiento de nuevas investigaciones.

6. INDICADORES

Para el desarrollo de la presente investigación se tuvo en cuenta parámetros que permitan evaluar el desempeño del suelo estabilizado, los cuales permitieron tener bases sólidas para analizar los cambios que se generaron en el suelo estabilizado.

6.1 Indicadores del Suelo Natural

- Variable dependiente: Suelo estabilizado
- Características físicas y mecánicas del suelo de subrasante.

6.2 Indicador del aditivo

- Características del aditivo

6.3 Indicadores del Suelo Estabilizado

- Características físicas y mecánicas del suelo de subrasante mejorado con aditivo.
- Variable que interviene: Aditivo estabilizador de suelos.
- Indicador:
- Proporciones utilizadas de Mejorador de suelo.

7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Se hace necesaria la aclaración de algunos conceptos relevantes para comprender el contexto en el cual se fundamenta esta investigación. Estas definiciones están basadas en normas y publicaciones de autores que se consideran pertinentes y sus aportes son oportunos para la comprensión del tema objeto de investigación.

7.1 Definición de Suelo

Se considera como el material de la superficie terrestre que puede separarse en partículas sin mayor esfuerzo, en donde se construyen la mayor parte de las obras de ingeniería civil. Material del cual debemos ahondar en conocer la mayor parte de aspectos importantes como son sus propiedades químicas, físicas, mecánicas y dinámicas. Propiedades que son propias de cada suelo y generalmente tienen variaciones de forma vectorial, siendo más evidente y rápido los cambios de las propiedades en sentido vertical que en sentido horizontal.

Las características físicas de los suelos sin cohesión, (grava, arena y limos no plásticos), se determinan principalmente por el tamaño de las partículas, la forma, la textura de la superficie y la distribución del tamaño. La composición mineral determina la dureza, la rotura y la resistencia a la degradación física y química. Algunos minerales de carbonato y sulfato, como la calcita y el yeso, son lo suficientemente solubles como para que su descomposición sea significativa en el marco de tiempo de muchos proyectos. Sin embargo, en muchos casos, las partículas que no son de arcilla pueden tratarse como relativamente inertes, con interacciones que son predominantemente de naturaleza física.

Así, las propiedades de ingeniería del suelo dependen de la interacción de sus compuestos que se pueden reunir en dos grupos. Factores de composición, que determinan el rango potencial de los valores para cualquier propiedad y factores ambientales, que determinan

el valor real de cualquier propiedad. los diferentes factores que inciden se presentan en la tabla

1. (James K. Mitchell, Kenichi Soga, Fundamentals of Soil Behavior, Third Edition)

Tabla 1 factores de composición y factores ambientales

FACTORES DE COMPOSICIÓN	FACTORES AMBIENTALES
Tipos de minerales	Contenido de agua
Cantidad de cada mineral	Densidad
Tipos de cationes adsorbidos	Presión de confinamiento
Formas y distribución del tamaño de las partículas.	Temperatura
Composición del agua de los poros	Tejido
Tipo y cantidad de otros componentes, como materia orgánica, sílice, alúmina y óxido de hierro	Disponibilidad de agua

Adaptado de: Fundamentals of Soil Behavior Third Edition, James K. Mitchell Kenichi Soga

Por otra parte, Los suelos se clasifican como de grano grueso, granular y sin cohesión si la cantidad de grava y arena excede el 50 %, en peso o de grano fino y cohesivo si la cantidad de finos (limo y material de tamaño de arcilla) excede el 50 %. Las propiedades de ingeniería de los suelos sin cohesión a menudo se determinan mediante la aplicación de presión de confinamiento y la densidad. Las propiedades de ingeniería del suelo cohesivo a menudo se caracterizan por su rigidez, resistencia y por relacionar el contenido de agua actual, así como el historial de consolidación pasado por la caracterización de la composición proporcionada por el índice de plasticidad. Algunas características de ingeniería de suelos de grano grueso y fino se presentan en la tabla 2. James K. Mitchell, Kenichi Soga, Fundamentals of Soil Behavior, Third Edition).

Tabla 2 Factores de composición y ambientales que contribuyen a las propiedades de ingeniería

Suelos Granulares		Suelos Finos	
Grava	Sand	Limo	Arcilla
75 mm	5 mm	0.07mm	0.02 mm
Tamaño manzanas a guisantes ingleses	Tamaño guisantes ingleses a harina	Más fina que la harina para hornear	Mucho más fina que la harina para hornear
Partículas visibles sin aumento. Tamaño de grano medible con tamices. Los granos no forman una masa coherente incluso cuando está mojado - sin cohesión No plástico: no existe un rango de contenido de agua donde el suelo se pueda deformar sin agrietarse o desmoronarse. Permeabilidad moderada a alta (10^{-6} a 10^{-1} m/s). El agua fluye fácilmente a través de los huecos. El drenaje se produce rápidamente, excepto en condiciones dinámicas. por ejemplo, terremotos. Solo la resistencia "drenada" es importante para condiciones distintas a la carga sísmica o los deslizamientos rápidos de tierra. Dr = 0 a 20% Muy suelto Dr = 20 a 40% suelto Dr = 40 a 60% Med. denso Dr = 60 a 80% denso Dr = 80 a 100% Muy denso Muy suelto Compresible Liquidable durante terremotos $\phi \sim 30^\circ$ Muy denso Compresibilidad muy baja Estable durante terremotos $\phi \sim 45^\circ$		Partículas no visibles sin aumento Tamaño de grano no medible con tamices Tamaño de grano medido por velocidad de sedimentación Los granos se adhieren cuando se mezclan con agua debido a la succión del agua de los poros y a la interacción fisicoquímica del líquido de los poros y el mineral- cohesión Plástico: se deforma sin agrietarse en un rango de contenido de agua entre el límite de líquido y el límite de plástico Líquido (masa para panqueques) _____ Límite de líquido (LL) Plástico (plastilina) _____ Límite de plástico (PL) Semisólido (barra de chocolate) _____ Límite de contracción Sólido (tiza) La permeabilidad es de baja a muy baja ($<10^{-7}$ m/s). El agua fluye lentamente por los vacíos. El drenaje tarda de semanas a decenas de años. Tanto los puntos fuertes "drenados" como los "no drenados" son importantes. La resistencia "no drenada" es baja cuando la presión previa a la consolidación es baja. El comportamiento de los limos varía de "similar a la arena" a "similar a la arcilla", a medida que disminuye el tamaño del grano. El comportamiento mecánico más importante es la "presión de preconsolidación p_p" y la presión de confinamiento aplicada. $p_p = 0$ a 50 kPa Muy suave $p_p = 50$ a 100 kPa Suave $p_p = 100$ a 200 kPa Firme $p_p = 200$ a 400 kPa rígido $p_p = 400$ a 800 kPa Muy rígido $p_p = 0,8$ a 1,6 MPa duro Muy Suave Muy compresible Resistencia al corte sin drenaje $<12,5$ kPa Muy Denso Baja compresibilidad Resistencia al corte sin drenaje > 100 kPa	

Adaptada de James K. Mitchell, Kenichi Soga, Fundamentals of Soil Behavior, Third Edition), pag. 85.

7.2 Propiedades a considerar para estabilizar suelos

Humedad del suelo

Todos los suelos poseen agua en diferentes cantidades, este líquido presente una masa de suelo, es quién afecta la mayoría de las propiedades del mismo, por ende, la cantidad de humedad que este contenga tiene una incidencia directa en su comportamiento. En esencia, el agua que tiene más efecto negativo en los cambios de las propiedades de un suelo, es el agua de absorción, la cual puede llegar a las partículas del suelo de diferentes maneras como: la lluvia, el agua de infiltración, aguas subterráneas, agua de ascenso capilar, entre otras.

Subrasante de una vía

Se denomina subrasante a diferentes tipos de suelo que se encuentran en el trazado de una carretera y sobre el cual se construye la estructura de un pavimento, la subrasante en una vía sin pavimentar, es la superficie de rodadura por la que transitan los vehículos. Tanto la calidad como las características de esta, es una de las variables más relevantes en el comportamiento de la estructura de un pavimento, y de la resistencia de esta dependen los espesores de las capas que conforman la estructura de un pavimento.

Para evaluar la subrasante se utilizan parámetros como la resistencia a la deformación, resistencia al esfuerzo cortante y capacidad para soportar las cargas. Así mismo se requiere evaluar la susceptibilidad del suelo a los cambios de volumen y en la disminución en la resistencia ocasionados por las variaciones en la humedad que este pueda presentar . Por esto se han desarrollado métodos y tipos de estabilizadores de suelos, que asociados a obras hidráulicas de las carreteras dan estabilidad a las subrasantes. En nuestro medio los materiales de estabilización de suelos más conocidos son el cemento y la cal.

Asentamientos en la subrasante

Los asentamientos son deformaciones verticales de la estructura de un pavimento, que sin lugar a dudas es de los problemas más graves en las obras de infraestructura vial y en las de ingeniería en general. En las carreteras, estos hundimientos están relacionados con las sobrecargas que se impone al suelo y que están directamente racionadas con la magnitud y frecuencia con que las emite el tránsito, estos asentamientos desencadenan diferentes problemas en las carreteras, como la pérdida del bombeo, hundimientos longitudinales y transversales de la calzada, en los terraplenes produce asentamientos en la corona. Otro de los inconvenientes es la pérdida de las transiciones entre la estructura del pavimento y los terraplenes de aproximación a obras especiales como puentes, box culvert entre otros, todo esto finalmente causa la disminución del confort y la funcionalidad de una vía (Montejo Fonseca, 2002).

7.3 Estabilización de suelos

De forma general, el proceso de estabilización, consiste en la manipulación de los suelos mediante la adición de otros suelos o la adición de productos desarrollados con el propósito de mejorar sus las propiedades principalmente incrementar su resistencia y disminuir la susceptibilidad al agua, de tal manera que puedan ser acondicionados para el cumplimiento de las especificaciones del proyecto y de esta manera poder aprovecharlos en las obras de ingeniería civil.

La estabilización de suelos para obras de infraestructura vial, se ha desarrollado con el fin de mejorar algunas propiedades del suelo que influyen en la resistencia, esfuerzo cortante, deformación, estabilidad volumétrica entre otros, de tal manera que mediante adición algunos productos, sea posible acondicionarlo para un óptimo desempeño frente a esfuerzos y

deformaciones, tratando de lograr que estas condiciones se mantengan en el tiempo para el cual el proyecto fue diseñado.

Así, la estabilidad de suelos de subrasante se desarrolla como una solución a mediano plazo en vías destapadas y en largo plazo en vías que se van a pavimentar, cuyo propósito es mantener las condiciones iniciales de estabilidad durante un tiempo aproximado de dos años sin ningún tipo de mantenimiento de la vía y conservando las propiedades durante el periodo de diseño, evitando el deterioro del suelo y la disminución o pérdida de funcionalidad de las carreteras por causas de fisuración y deformaciones de la estructura de un pavimento, teniendo la claridad que cuyos principales detonantes son los cambios de humedad y las solicitaciones a las que es sometida la vía.

No obstante, no, en todos los casos es necesario ni conveniente estabilizar. Para tomar esta decisión se debe de tener suficiente claridad sobre el objetivo del proyecto lo cual implica un sinnúmero de variables propias para cada proyecto, en los casos que sea conveniente estabilizar, se debe considerar cuál de los métodos de estabilización es el más adecuado, es por esto, que para estabilizar suelos se estudian las propiedades a mejorar, sin embargo en el caso de infraestructura vial, de manera general se tiene claro que los suelos de subrasante se debe mejorar la capacidad de soporte del suelo y la susceptibilidad del suelo ante la presencia de humedad, de acuerdo a esto se han desarrollado métodos y productos para mejorar los suelos lo que involucra tener en cuenta los parámetros que se deben conocer de los suelos. Entre los más comunes están:

- Clasificación del suelo
- Resistencia
- Compresibilidad
- Estabilidad volumétrica

- Permeabilidad

Actualmente, los métodos convencionales de modificación de suelos de subrasante más utilizados en nuestro país y que cuentan con especificación son la estabilización con cal y cemento, en general es posible encontrar una dosificación que mejore simultáneamente varias de los mencionados parámetros, sin embargo, se debe estar preparado para posibles variaciones desfavorables en los mismos, debido a la susceptibilidad de estos materiales a cambios en los procesos de dosificación y lo susceptible de los procesos de mejoramiento debido a la difícil reproducción de los diseños de laboratorio en campo condicionado en muchos casos a los equipos de construcción.

Hoy en día, no se ve la estabilización de suelos como un tratamiento para mejorar las propiedades de los suelos, sino también como una técnica la cual está empeñada en la prevención de los deterioros que puede sufrir el suelo durante el periodo de diseño y por ende en la durabilidad de las vías.

7.4 Clasificación de suelos con fines de estabilización

Existen diferentes métodos para clasificar suelos con fines de estabilización, uno de los más conocidos es el que se basa en el tamaño, forma y arreglo de las partículas y conocido como sistema Northcote. Entendiéndose el concepto de textura desde el punto de vista científico-geotécnico, a la forma de las partículas de arena, limo y arcilla. Además, la descripción de textura se compone de tres partes: forma, tamaño y grado de desarrollo.

Asimismo, el método. subdivide a estos suelos en subgrupos de acuerdo con algunas características visibles tales como el color, presencia de concreciones, rellenos en las grietas o fisuras, etc., así como algunas características no detectables a simple vista como lo es la

alcalinidad o acidez. Cabe mencionar que esta clasificación no ha sido aceptada en forma universal, aunque actualmente se están haciendo algunos esfuerzos para que esto suceda.

Es razonable pensar que mientras mejor se conozcan las características físicas, químicas y mineralógicas de un suelo mejor se puede emprender el estudio para la estabilización. El primer paso, para la determinación de la composición y propiedades esperadas en un suelo, es el reconocimiento visual y manual, el segundo paso importante es la determinación del tipo de minerales que contiene el suelo, pues de ellos depende en forma directa la estabilidad volumétrica, la cohesión y, en especial la reactividad a la estabilización. La determinación del tipo de mineral, cuando de estabilizaciones se trata, es una herramienta de gran utilidad. Los tipos de minerales se pueden determinar con microscopios electrónicos, difracción de rayos x, espectrometría con rayos infrarrojos y análisis químicos. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos y para fines prácticos puede inferirse el tipo de minerales mediante observaciones de campo sencillas. De los cientos de minerales que se han encontrado en los limos y arcillas contenidos en un suelo, basta para fines prácticos e ingenieriles, el reconocimiento de la existencia de menos de diez de ellos. Alguna identificación de los minerales de un suelo, según el sistema Northcote. Se puede reconocer con cierto grado de aproximación a la mayoría de los grupos minerales con base en observaciones y pruebas sencillas de campo.

El método Northcote se basa en tres premisas que son las siguientes:

a) Observación general del lugar y del perfil de suelos. Requiere pozos a cielo abierto o extraer muestras inalteradas. Es muy útil el análisis de cortes existentes en la zona o extraer muestras alteradas, en donde se toma nota de los colores del suelo y del agua en los encharcamientos cercanos.

b) Apreciar la textura del suelo, esta textura puede estimarse con la ayuda de agua de lluvia o destilada.

- *Inmersión del espécimen del suelo, completamente en agua de lluvia o destilada. El procedimiento que se recomienda se le ha designado como “prueba del grumo”. No se deben agregar agentes dispersantes, ni humedecedores. El procedimiento consiste en colocar un pequeño grumo de suelo secado al aire (aproximadamente del tamaño de un frijol) dentro de un vaso de vidrio claro lleno de agua destilada o de lluvia. Es muy importante que no se altere el grumo en ninguna forma, salvo el secado, antes de su inmersión en agua. Se observa el comportamiento del grumo, después de la inmersión, durante un lapso de hasta 10 minutos. (Garnica Anguas, Pèrez Salazar, Gómez López, & Obil Veiza, 202, págs. 6-7)*

Se deben tomar nota de todas las observaciones de campo en forma apropiada, así como su localización precisa; los datos que tradicionalmente se registran son:

- *Profundidad a partir de la superficie.*
- *Color. Cuando se presenten motas, anotar sus coloraciones.*
- *Inclusiones. Indicar si se trata de carbonatos, hierro, raíces, materia orgánica.*
- *Textura y consistencia.*
- *Dispersión en agua.*
- *Tipo de perfil.*
- *Geología. Tipo de rocas o formaciones en la región.*
- *Aguas superficiales. Coloración, turbidez, etc.*
- *Erosión. Tipo de erosión.*
- *Presencia de deslizamientos.*

- *Micro relieve en los suelos.*
- *Mineral Inferido.*

(Garnica Anguas, Pèrez Salazar, Gómez López, & Obil Veiza, 202, págs. 6-7)

La dispersión se detecta mediante la formación de halos, alrededor de cada grumo, fácilmente visibles contra un fondo oscuro, mientras más pronunciados sean los halos, más alta será la dispersión. El asentamiento del suelo en el líquido que permanece claro durante menos de 10 minutos será un signo de la ausencia de dispersión. Si no se reconoce fácilmente la presencia de carbonatos, esta se puede verificar mediante la efervescencia del suelo al colocar una gota de ácido en éste. El ácido de una batería puede ser suficiente.

La finalidad de reconocer a los suelos tanto visual como manualmente es permitir tomar decisiones lógicas respecto al tipo de estabilización más adecuado, así como las pruebas a efectuar. De esta manera se pueden lograr economías considerables sin riesgos para el proyectista de la estabilización. Para lograr que el reconocimiento de los suelos sea más efectivo debe complementarse con el conocimiento de las propiedades del suelo y de sus componentes. (Garnica Anguas, Pèrez Salazar, Gómez López, & Obil Veiza, 202, pág. 8)

Resistencia

Es la capacidad que tiene un suelo de soportar cargas con algunas excepciones, es en general este parámetro es más bajo cuanto mayor sea su contenido de humedad.

Los suelos arcillosos al secarse alcanzan grandes resistencias, teniendo inclusive más altas de resistencias que cuando se calientan a temperaturas muy elevadas como sucede en la fabricación de tabiques y ladrillos.

Por otro lado, dependiendo de la humedad y energía de compactación, se puede lograr diferentes características de resistencia en un suelo arcilloso, ya que un suelo de éstos compactado por la rama seca en la curva de compactación con la humedad óptima de compactación, presenta un comportamiento relativamente elástico y con una resistencia relativamente alta; mientras que este mismo suelo compactado con una alta humedad, no obstante que su peso volumétrico seco sea alto, presentaría resistencias bajas y comportamiento plástico o viscoso: este efecto se debe, generalmente, a que una alta humedad produce en una arcilla efectos de repulsión entre sus partículas, propiciando con ello que la cohesión sea menor que en el caso de emplear humedades de compactación bajas.

De otra parte, se ha visto que, en suelos finos, tiene una importancia decisiva la forma de aplicación de la energía de compactación, sobre todo cuando se emplean humedades más altas que la óptima pues, por ejemplo, la energía aplicada por impactos puede ocasionar que un suelo del lado húmedo presente resistencias del orden de hasta un cuarto de veces menor que la resistencia, que, a igualdad de circunstancias, presenta el mismo suelo compactado en forma estática. La explicación de lo anterior reside en la diferente estructuración que adoptan las arcillas al ser compactadas mediante procedimientos diferentes.

Resulta evidente que, los procedimientos que sirvan para mantener a un suelo sin que se presente cambios volumétricos, son también adecuados para mantener la resistencia en el suelo, como la adición de agentes que transformen a un suelo fino en una masa rígida o granular (Montejo Fonseca, 2002).

La cantidad de humedad tiene efectos directos en la resistencia del suelo, por lo tanto, afecta directamente a los diferentes parámetros del suelo entre ellos el amortiguamiento, como se puede apreciar en la figura 4, tomada de (Pineda, Cruz y Ávila, 2017.), en donde se aprecia

que el valor del amortiguamiento es mayor en la muestra M1-3 la cual tiene una humedad de 67.25%, mientras que la humedad de la muestra M1-2 es del 95.56% y la humedad de la muestra M1-1 es de 104,41%, siendo esta la que menor porcentaje de amortiguamiento presenta.

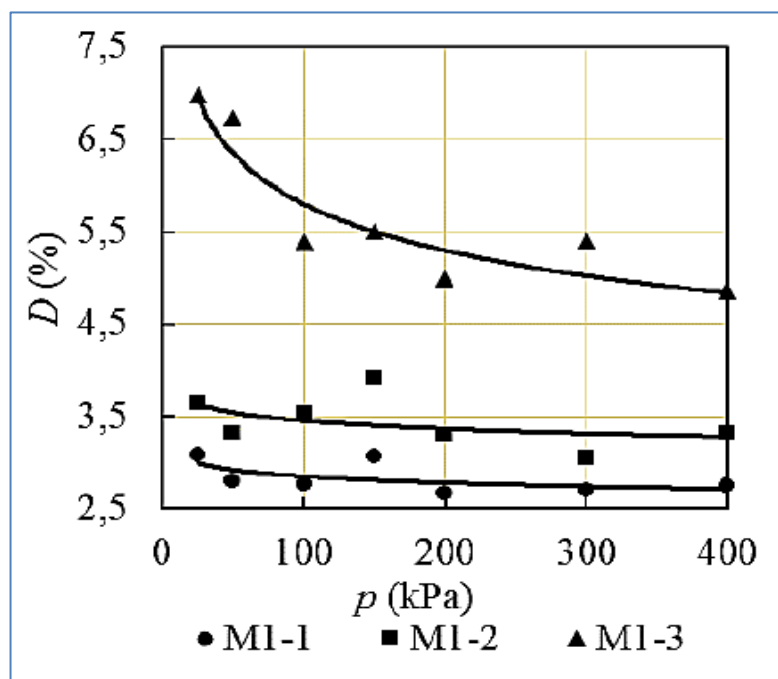


Figura 4. Relación de amortiguación con presión de confinamiento

Fuente. Dynamic Behavior of Naturally Desiccated Clays via Resonant Column, Pineda, Cruz y Ávila, 2017.

Compresibilidad

Los cambios de volumen o compresibilidad, tienen una importante influencia en las propiedades de los suelos, pues si se modifica la permeabilidad, se altera las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en sentido, lo que tiene una importancia decisiva en la modificación de la resistencia del suelo y en el esfuerzo cortante que provocan desplazamientos.

En el caso de arcillas saturadas, si no presenta drenaje y se aplican esfuerzos, estos serán tomados por el agua. En el momento en el que se permita el drenaje, los esfuerzos son transmitidos gradualmente al esqueleto o estructura del suelo; este proceso produce una compresión gradual de dicha estructura, fenómeno conocido como consolidación.

Ahora bien, la compresibilidad del suelo puede presentar variaciones importantes, dependiendo de algunos factores tales como la relación de la carga aplicada respecto a el historial de cargas que ha soportado el suelo, el tiempo de aplicación de la carga una vez que se ha disipado la presión de poros, la naturaleza química del líquido intersticial, aunados estos factores a los originados por el muestreo, sensibilidad del suelo y aun la forma de ejecutar las pruebas que se utilizan para estudiar la consolidación.. (Montejo Fonseca, 2002)

En la figura 5, se aprecia una curva de deformación típica de un suelo que se compone principalmente de tres etapas de consolidación. Una primera etapa en donde el suelo experimenta una compresión inicial la cual es una deformación instantánea producto de la aplicación de la carga, una segunda etapa denominada consolidación primaria la cual es diferida en el tiempo, en donde el agua se desplaza a sitios de menor presión lo que implica una variación de volumen bajo el sitio de aplicación de la carga, y una tercera etapa final llamada consolidación secundaria ocasionada por los esfuerzos constantes.

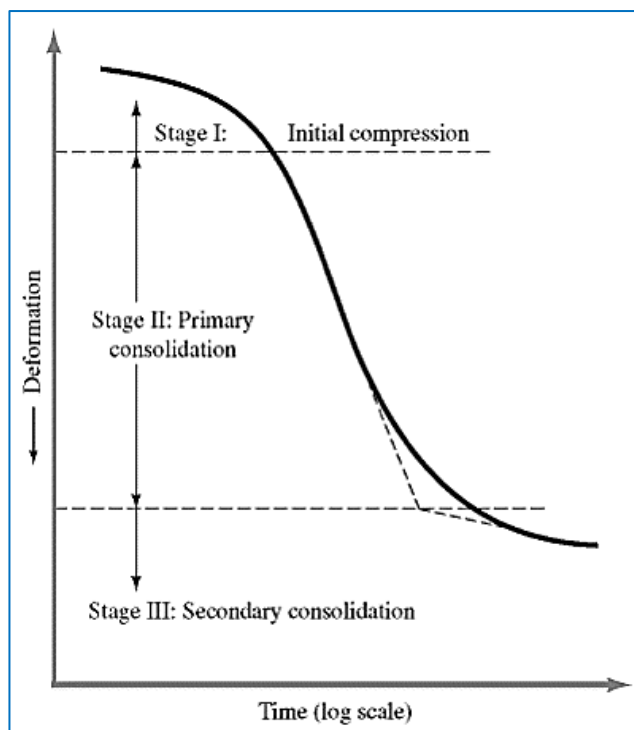


Figura 5. Curva de deformación típica de suelos
Fuente. Frontier in Geotechnical Engineering (2005)

Estabilidad Volumétrica

La expansión y contracción de los suelos depende en gran medida de la plasticidad y el contenido de humedad. La estructura de un pavimento al ser conformada sobre suelos susceptibles a cambios volumétricos tenderá en algún momento a presentar deformaciones de no tomar los correctivos necesarios, entre ellos la estabilización del suelo.

Para evitar que las deflexiones admisibles en la subrasante excedan los límites establecidos, debe cumplirse que la presión transmitida por la carga se mantenga por debajo del valor de la carga máxima transmitida al suelo, para lo cual deberá tomarse en cuenta el tránsito de diseño a través del número de repeticiones de carga, las deflexiones máximas esperadas y el CBR del material con el que se ejecutará el mejoramiento (Ramón, 2013).

La expansión y contracción de muchos suelos, originadas por los cambios de humedad, se pueden presentar en forma rápida o acompañando a las variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero. Por tanto, si las expansiones que se desarrollan debido a un incremento de humedad no se controlan en alguna forma, estas presiones pueden ocasionar graves deformaciones y rupturas en el pavimento y, en general, en cualquier obra. Es por ello por lo que resulta necesario detectar los suelos expansivos, su composición y el tratamiento más adecuado.

Actualmente, las soluciones para evitar cambios volumétricos en suelos expansivos consisten en introducir humedad al suelo en forma periódica, aplicar cargas que equilibren la presión de expansión, utilizar membranas impermeables y apoyar la estructura a profundidades tales, que no se registre variación estacional en la humedad. Otro medio podría consistir en modificar la arcilla expansiva transformándola en una masa rígida o granular cuyas partículas estén lo suficientemente ligadas para resistir la presión expansiva interna de la arcilla, lo cual puede lograrse por medios químicos o térmicos. En estos casos, cuando la capa a estabilizar sea de poco espesor, deberá tenerse en cuenta que el suelo subyacente es aún susceptible a expandirse, pero tales movimientos pueden tolerarse, siempre y cuando la capa estabilizada se mueva en forma uniforme. (Merchan Infante, 2009, pág. 14)

En la figura 6, podemos evidenciar los efectos que se produce en el cambio de volumen que presenta un suelo respecto a algunos parámetros como la cantidad de finos y algunas propiedades índice.

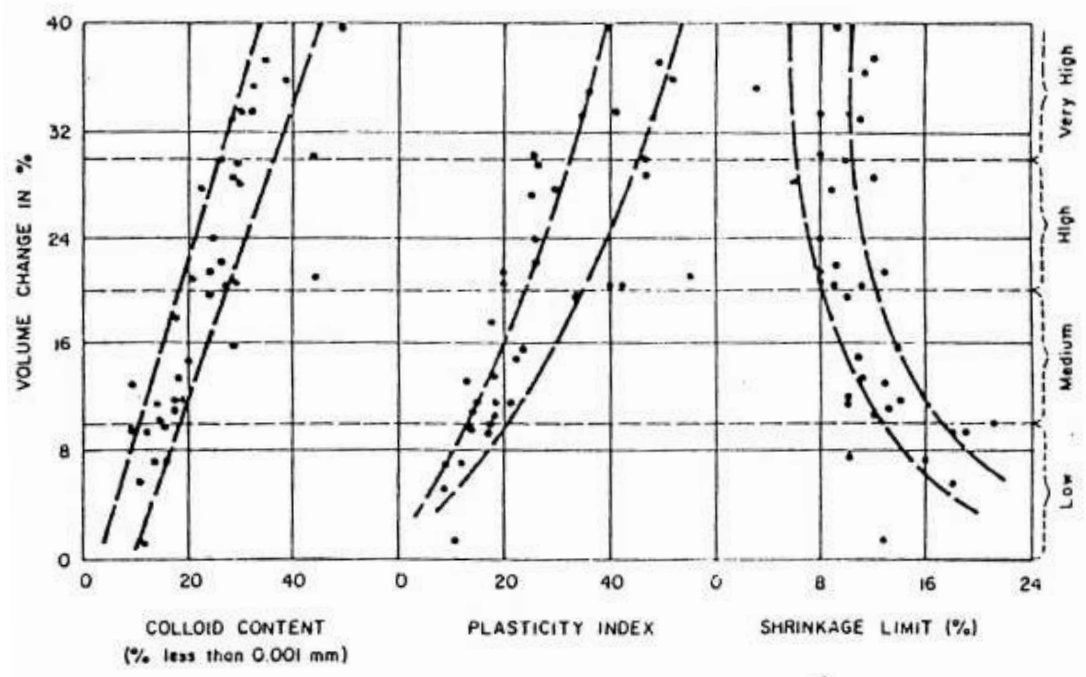


Figura 6. Cambio de volumen del suelo en relación con el contenido de coloides, índice plástico y límite de contracción

Fuente. Engineering Properties of Expansive Clays; Holtz W.G., Gibbs H.J. 1954

Permeabilidad

La permeabilidad en suelos hace referencia a la facilidad con que el agua pasa a través de los poros y con efectos decisivos sobre las operaciones constructivas en las obras civiles. (Juarez Badillo 1980).

En los suelos la permeabilidad se plantea, en términos generales, en dos problemas básicos, como lo son el relacionado con la disipación de las presiones de poro y el relacionado con el flujo de agua a través del suelo. El tener presiones de poro excesivas puede originar deslizamientos en explanaciones y el flujo de agua puede originar tubificaciones y arrastres.

En la tabla 3, se presentan algunos valores típicos del coeficiente de permeabilidad K en suelos.

Tabla 3. Rangos de valores de coeficientes de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	K (cm/s)
Grava mal gradada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2 – 1
Grava uniforme (GW)	0,05 – 0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3} - 0,2
Arena bien gradada (SW)	10^{-3} - 0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3} – 5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4} - 10^{-3}
Limo de baja compresibilidad (ML)	5×10^{-5} - 10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5} - 10^{-8}

Adaptado de Valle, 2002

Durabilidad

En cuanto a la durabilidad se encuentran involucrados factores que se refieren a la resistencia que tienen los suelos al intemperismo, erosión y la abrasión que le genera el tráfico; de esta manera, los problemas de durabilidad en vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento, estos problemas pueden afectar a todo tipo de suelos naturales como estabilizados. Si bien en estos últimos los peores comportamientos suelen ser consecuencia de diseños inadecuados, tales como una mala elección de agente estabilizador o un serio error en su uso, tal como podría ser el caso cuando se ignora la bien conocida susceptibilidad de los suelos arcillosos estabilizados con cemento a la presencia de sulfatos.

Actualmente, una deficiencia importante en los estudios de las estabilizaciones es la carencia de pruebas adecuadas para estudiar la durabilidad. Las pruebas de intemperismo, a veces no son adecuadas para el estudio de agregados para pavimentos por no reproducir en forma eficiente el ataque al que están sujetos. En las pruebas con aplicación de efectos cíclicos, no se tiene aún una correlación precisa entre el tránsito y

las pruebas en que se somete los especímenes a efectos de secado y humedecimiento que son más bien del orden cualitativo que cuantitativo. La durabilidad es, pues, uno de los aspectos más difíciles de cuantificar, y la reacción común ha sido la de sobrediseñar, lo cual a veces puede no ser lo más adecuado (Ramírez Triviño & Hincapie, 2018, pág. 35)

7.5 Ensayos de Laboratorio

Hoy en día se hace necesario la implementación de distintos tipos de ensayos de laboratorio no solo por cumplir una normativa, sino también por la cuestión de mitigar en lo posible todo tipo de daños indirectos con respecto a bases para la construcción de infraestructura; es decir, que estos ensayos de laboratorio o in situ sirvan para tener un grado de confiabilidad más alto a la hora de la construcción. Los ensayos básicos que se pueden encontrar son:

Límites de consistencia / Límites de Atterberg

Fueron estipulados principalmente por Albert Atterberg, un ingeniero sueco el cual estableció los estados de consistencia y de estos nace los límites de consistencia los cuales se basan en contenidos de humedad del suelo y para estos se establecen diferentes ensayos:

Límite Líquido

Es el contenido de humedad que tiene el suelo, por debajo del cual, tiene un comportamiento plástico. Se obtiene con la Copa de Casagrande la cual consta de un recipiente de bronce con una empuñadura de caucho o hule. En la copa se coloca una muestra de suelo húmeda, a la cual se le hace una ranura, con un ranurador patrón ya establecido por la norma del Instituto Nacional de Vías (Instituto Nacional de Vías, 2012). Se ha establecido que cuando la muestra ranurada toca una con otra o se cierra media pulgada en 25 golpes de la copa, el

contenido de humedad del suelo en ese cerramiento o instante corresponde al límite líquido (Rodríguez Serquen, 2019).

Casagrande (1932) determinó, que cada caída o golpe de la copa, corresponde a aplicar un esfuerzo cortante al suelo de 1 gr/cm². Por tanto, el límite líquido corresponde a una resistencia del suelo de 25 gr/cm² (0.025 kg/cm²) (Salas Mercado, 2018). Por otra parte, la velocidad de rotación de la manivela debe ser de 2 revoluciones por segundo.

Debido a que es un poco difícil lograr que la masa de suelo húmeda se cierre justo a los 25 golpes, lo que se hace es establecer una correlación, entre el número de golpes de cerramiento de la ranura y, el contenido de humedad correspondiente, para así confeccionar un gráfico, en papel semilogarítmico de N vs. W, y establecer la línea de tendencia. Luego de la gráfica lograda (llamada Curva de fluidez), se obtiene el contenido de humedad correspondiente a N = 25 golpes. El contenido de humedad así determinado, corresponde al límite líquido LL. (Rodríguez Serquen, 2019)

Límite Plástico

Es el porcentaje de humedad en el cual el material de suelo deja de comportarse plásticamente y se comporta o pasa a un estado semisólido.

Se determina tomando 20 a 30 gramos de suelo seco, humedecerlo, hacer una bola en estado plástico y enrollarlo con los dedos, hasta formar cilindros de 3.2 mm (1/8") de diámetro. Para apoyarse se usa una placa de vidrio o papel encima de una base plana. Para formar los cilindros se debe hacer un movimiento de mano (llamado golpe), hacia adelante y hacia atrás, presionando con los dedos el cilindro de suelo. La velocidad del golpe (un movimiento hacia adelante y hacia atrás), es de 80 a 90 golpes/minuto. Una vez que se llega a los 3.2 mm de

diámetro, se deshace el cilindro, se hace la bola de nuevo y se vuelve a ver el cilindro de suelo.

Durante el proceso la masa de suelo va perdiendo humedad.

Se detiene el enrollado cuando:

- a) Se parte en pedazos el cilindro.
- b) Se desprenden como escamas o cilindros huecos de forma tubular.
- c) Se rompe en pedacitos (barriles) de 6 a 8 mm de largo.

Si se rompe antes de llegar a los 3.2 mm, se considera satisfactoria el estado del suelo, para obtener el límite plástico.

Los pedacitos formados, se acumulan en un recipiente previamente pesado, y se determina su contenido de humedad. El contenido de humedad del suelo corresponde al límite plástico LP. (Rodríguez Serquen, 2019, pág. 31)

Compresión inconfiada

Indica el esfuerzo máximo que puede resistir una muestra de suelo con determinada humedad y densidad óptima, esto se representa en una gráfica de deformación vs esfuerzo.

Proctor

Otra prueba de laboratorio que sirve para saber y determinar el peso unitario seco de una muestra de suelo compactada y el contenido de humedad de la misma. Existen dos tipos de ensayo, el proctor modificado y estándar, la diferencia radica en que el modificado aplica más energía de compactación. En la actualidad el ensayo que más se utiliza es el modificado.

C.B.R. (Relación de soporte Californiano)

Sirve para medir la calidad del suelo y la resistencia al corte de las capas de suelo, subrasante, subbase y base granular para pavimentos y construcciones.

Este procedimiento mide la carga necesaria para penetrar un pistón de dimensiones determinadas a una velocidad previamente fijada en una muestra compactada de suelo después de haberla sumergido en agua durante cuatro días a la saturación más desfavorable y luego de haber medido su hinchamiento.

La muestra se sumerge para poder prever la hipotética situación de acumulación de humedad en el suelo después de la construcción. Por ello, después de haber compactado el suelo y de haberlo sumergido, se lo penetra con un pistón el cual está conectado a un pequeño "plotter" que genera una gráfica donde se representa la carga respecto la profundidad a la que ha penetrado el pistón dentro de la muestra. (Salgado, pág. 7)

Ensayo en Columna Resonante

Es la prueba de laboratorio más común utilizada para medir las propiedades dinámicas del suelo como la rigidez con parámetros de medición como el amortiguamiento (Damping) y el módulo de corte (G), esto medido a tensiones bajas y medias, la prueba consiste en hacer vibrar el espécimen de suelo sólido o hueco en uno de sus nodos, posteriormente se debe determinar la velocidad de propagación de la onda a partir de la frecuencia resonante. El equipo de Columna resonante, figura 7, permite mediciones en un rango de deformaciones de corte muy pequeñas (10-4%) a (10-1%), la prueba se realiza bajo la norma ASTM D4015-15.



Figura 7. Equipo de Columna Resonante y espécimen ensayado

Fuente: el autor.

7.6 Tipos de estabilización de suelos

Puede definirse la estabilización de suelos como el mejoramiento de las propiedades físicas mediante procesos mecánicos, la adición de productos químicos, naturales y/o sintéticos, que generalmente se adicionan a suelos que no cumplen las especificaciones de construcción de los proyectos. En la actualidad la estabilización de suelos se ha organizado en tres grandes grupos como la estabilización física, mecánica y química, cada uno de ellos contiene su propio proceso de estabilización, los cuales se describirán de manera general a continuación:

Estabilización por compactación

Es un proceso mecánico, tiene como objetivo incrementar la resistencia del material; los suelos al ser sometidos a compactación mediante equipos que aplican determinadas energías, producen una reducción de vacíos aumentando el contacto entre las partículas, lo que permite obtener mayor fricción y por consiguiente mayor capacidad portante.

Estabilización con materiales ligeros

Comúnmente en obras de infraestructura vial, los asentamientos están ligados a la falta de resistencia del suelo, si se construyen terraplenes con suelos muy pesados la geometría de los taludes es diferente al construirlos con suelos de bajo peso específico, evitando disminuir las presiones transmitidas al suelo de soporte.

Estabilización con sobrecargas

En algunos casos y si las condiciones del proyecto lo permiten, se puede construir los terraplenes con suficiente anticipación a la construcción de la estructura del pavimento, con el

fin de que ocurran los asentamientos durante este tiempo antes de la intervención, así la corona de los terraplenes se conformara en el momento que el proyecto llegue a estos sitios, siendo necesario retirar material y en algunos casos adicionar suelo para llegar a las cotas de la subrasante.

Estabilización con reemplazo de material

Es el proceso de mejoramiento de suelos más sencillo, consiste en, si el material existente en la subrasante no es óptimo para la conformación de la estructura del pavimento, simplemente se reemplaza con materiales de mejor calidad, adicionalmente se debe tener en cuenta otros factores como el drenaje, si este no es el más eficiente, este material de reemplazo es conveniente que sea un material granular.

Estabilización con geosintéticos

Este método de estabilización permite beneficios en las propiedades mecánicas, el incremento de la capacidad portante del suelo, aumento en la vida útil e incremento en la capacidad de ejes equivalentes.

Estabilización química

Este procedimiento hace referencia a adicionar al suelo productos estabilizadores específicos, los cuales para un óptimo funcionamiento se deben mezclar íntimamente y de manera homogénea, así mismo se debe tener especial cuidado en los tiempos de curado que están definidos de acuerdo con el tipo de agente utilizador y las características de cada suelo. Esta técnica tiene como objetivo mediante una o varias reacciones químicas se mejoren algunas características del suelo, como reducción de las plasticidades, e incremento de resistencia del suelo ante las sollicitaciones y agentes ambientales.

Tratamientos fisicoquímicos

Este tipo de estabilización es resiente y se encuentra aún en desarrollo, se tiene claridad en que, al añadir algunas sustancias a los suelos, se producen intercambios iónicos entre los minerales del suelo y los materiales del producto adicionado, modificando la estructura e incrementando la resistencia y la disminución de la deformación. Para este procedimiento requieren análisis físicos y químicos con buen detalle del suelo que se pretende modificar.

Estabilización iónica

Se aplica generalmente a suelos finos, el proceso consiste en desarrollar un fuerte intercambio iónico entre el estabilizador y los minerales presentes en la arcilla, logrando desplazar el agua de adsorción y bloqueando esta capacidad de adsorción de agua de las partículas que son responsables de los cambios de volumen y la disminución de la resistencia propio de las arcillas activas. Las partículas libres de cargas electrostáticas que las mantenían dispersas y las partículas de agua que las rodean, se acercan y aglomeran lo que hace que resistan un poco más incrementando la capacidad de carga por fricción entre partículas lo que se ve reflejado en una mayor densidad al momento de compactar el suelo. (Ravines Merino, 2010)

Estabilización térmica

El método que se encuentra en etapa experimental y consiste en modificar la estructura cristalina del suelo con elevadas temperaturas de modo que la rehidratación no sea posible, temperaturas son superiores a 400°C, que se pueden obtener de la combustión de algunos gases, al hacerlos pasar los huecos del suelo, en investigaciones desarrolladas se reporta una considerable disminución de la compresibilidad del suelo. la distribución de la temperatura

depende de la porosidad del suelo y la temperatura de los gases inyectados. (Alva Hurtado, Ugaz Palomino, & Tupia Córdova, 2000)

Estabilización con polímeros

Cada vez con más frecuencia escuchamos hablar de la palabra polímeros, en el campo de la ingeniería, estos productos se ofrecen en gran variedad de presentaciones y con muchísimas aplicaciones en todas las actividades del que hacer de los humanos.

En la construcción de obras de ingeniería civil, los polímeros se usan para mejorar algunas de las propiedades del suelo como el incremento en la resistencia, reducir la susceptibilidad al agua, control del material particulado en carreteras sin pavimentar, entre otros.

Los polímeros son macromoléculas (resultado de la unión de un gran número de moléculas pequeñas de un mismo tipo o de diferentes tipos), generalmente orgánicas, llamados monómeros; pueden estar formadas por más de un tipo de monómero, éstas se denominan homopolímeros o estar formados por más de un tipo de monómeros denominándose copolímeros. Las maneras de unión de las unidades estructurales de los polímeros tanto naturales como artificiales pueden ser en varias direcciones, así se pueden obtener polímeros lineales o en más de una dirección dando lugar a los polímeros reticulares tridimensionales. (Ravines merino, 2010).

Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. Los polímeros en general tienen una muy buena resistencia mecánica, esto debido a sus grandes cadenas poliméricas que atraen; estas fuerzas de atracción intermolecular dependen de la composición química del polímero, las

más comunes son las fuerzas de Van der Waals. Esto se traduce en una muy alta resistencia a la tracción, al impacto y a la fatiga. (Choque Godoy, 2006)

Muchas de las investigaciones en ingeniería de hoy, están dedicadas a desarrollar productos de origen en polimérico para aplicación en suelos, debido a que estos no solo mejoran las propiedades de los suelos, sino que también reduce los impactos ambientales. Con base en lo anterior y debido a la creciente sensibilidad social en los problemas ambientales, se está impulsando la búsqueda de alternativas y materiales de construcción con un menor consumo de energía y un mínimo impacto ambiental como es el caso de los polímeros.

Así, se tiene que hoy en día, la construcción es uno de los principales consumidores de polímeros y especialmente de plásticos reciclados. Los crecientes problemas con los residuos sólidos urbanos (RSU) y el espacio para la disposición, la proliferación de productos de polímero, y la conciencia pública en los problemas ambientales, hace que sea necesario para la industria de la construcción participar en los procesos de reciclaje de polímeros después de su consumo. (Kibert & Waller, 1992).

Algunos de los modificadores de suelos usados en investigaciones en diferentes partes del mundo se nombran a continuación.

- Polyvinyl alcohol (PVA)
- Starch graft polymer (SGP)
- Mixture of Polysaccharide rich in levans and other celular material (LEV)
- Acrylic vinyl acetate copolymer
- Polyethylene-vinyl acetate copolymer
- Acrylic copolymer

- Polymeric Proprietary Inorganic Acrylic Copolymer
- Acrylic polymer
- Terpolímero vinil veova-acrilato
- Estabilizantes aniónicos
- Estabilizantes no iónicos
- Agentes de control de pH
- Copolímero de vinilo
- Copolímeros derivados de vegetales
- Copolímero vinil-versatato
- copolímero acrílico-estireno

7.7 Aditivos a base de organosilanos

Son un reactivo usado en la modificación de suelos con características como la solubilidad en agua, estabilidad al calor y a la radiación ultravioleta. Posee grupos silanol que son compuestos con columnas de base sílice que presentan reacciones con los silicatos presentes en el suelo, efectos que mediante la interacción iónica con los grupos silanol con carga negativa, van transformando sus superficies y confiriéndoles propiedades hidrófobas permanentes haciendo que el suelo repele las moléculas de agua generando una impermeabilización y evitan los inconvenientes que se derivan de la presencia de humedad formando enlaces muy fuertes. Rocio Cinthia Tesis Bachiller 2016

8. MARCO NORMATIVO

Para el presente trabajo de investigación se hizo uso de la norma y especificaciones del Instituto Nacional de Vías (Instituto Nacional de Vías, 2013) y para el buen procedimiento de los ensayos de laboratorio se usaron los procedimientos descritos en las normas que se presentan en la tabla 3.

Tabla 4. Normas y especificaciones INVIAS - ASTM usadas

ENSAYO	NORMATIVA
Determinación de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado.	I.N.V. E - 122
Determinación de límite líquido de los suelos.	I.N.V. E - 125
Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.	I.N.V. E - 126
Determinación de los factores de contracción de los suelos.	I.N.V. E - 127
Determinación de la gravedad específica de las partículas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua.	I.N.V. E - 128
Determinación de la cantidad de material que pasa del tamiz 75 μm (no. 200) de los agregados pétreos mediante lavado.	I.N.V. E - 214
Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.	I.N.V. E - 123
Equivalente de arena de suelos y agregados finos.	I.N.V. E - 133
Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación).	I.N.V. E - 141
CBR suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.	I.N.V. E - 148
Compresión inconfiada en muestras de suelo	I.N.V. E – 152
Standart Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Colum Diveices	ASTM D4040-15

Fuente: el autor

9. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

9.1 Diseño de la investigación

El proyecto desarrollado contiene el diseño orientado a un enfoque cuantitativo, de nivel experimental y de tipo tecnológico.

El enfoque es cuantitativo, debido a que el proyecto está siendo desarrollado en las áreas de la física y química, en donde se emplea la deducción directamente basada en el análisis numérico de los resultados que se obtienen en los ensayos de laboratorio, estas pruebas de laboratorio corresponden a el mejoramiento de las propiedades más relevantes del suelo en estudio que fue adicionado con el modificador de suelos.

En el campo experimental, se orienta a analizar los efectos que produce el mejorador, en cuanto a las propiedades físicas, mecánicas y dinámicas del suelo, específicamente al ser sometido a los efectos de cargas cíclicas, estudiando los suelos a bajas deformaciones con el fin de su uso en obras de infraestructura vial, así mismo determinar la cantidad optima de aditivo para el suelo en estudio.

En el campo tecnológico, el trabajo está enfocado en la evaluación de nuevas técnicas que se están desarrollando actualmente en el campo de la ingeniería civil orientado al área de la geotecnia, específicamente en el mejoramiento de suelos para las obras de infraestructura vial, el cual depende tanto de la transferencia de conocimientos como la aplicación de conocimientos básicos y teóricos, para el mejoramientos de las características al adicionar un el modificador de suelos, producto económico, amigable ambientalmente, de segura manipulación y de fácil adición al suelo.

9.2 Metodología empleada en la investigación

En el presente trabajo se desarrolló con la metodología de medición, la cual atribuye a asignar un valor numérico al medir ciertas propiedades, así como a relacionar algunos objetos y fenómenos que ocurren como efecto de aplicar al suelo en estudio un modificador comercial a base de organosolantes en nuestro país, esto con el fin de poder realizar la evaluación y respectiva representación de una manera adecuada, la investigación se realizó en 5 etapas que se presentan en la figura 8.

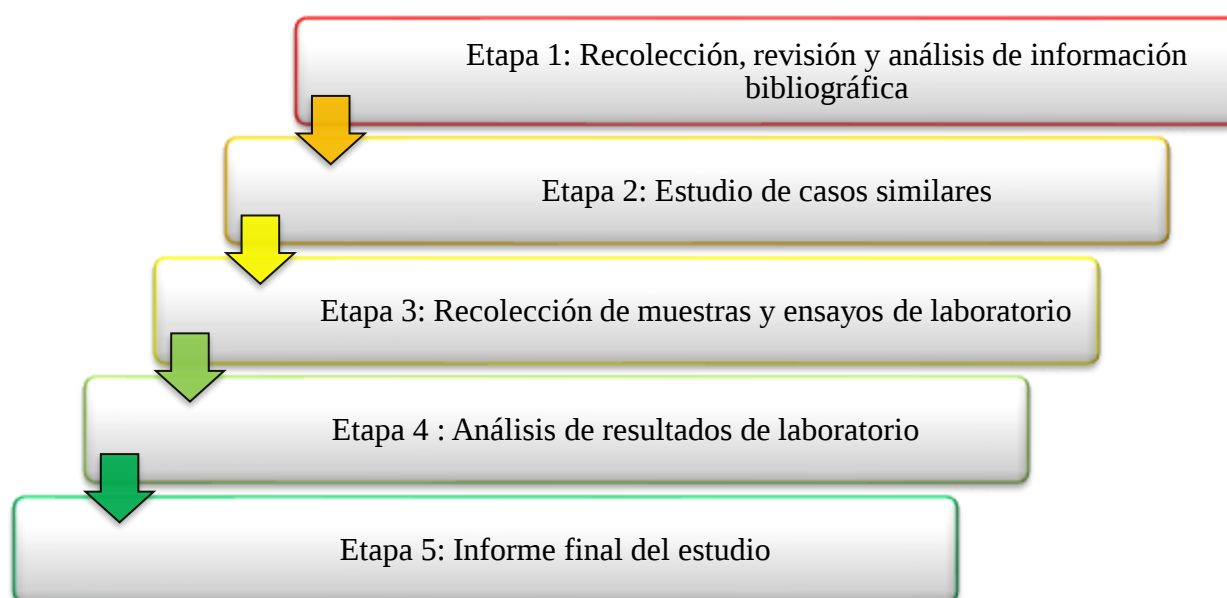


Figura 8. Etapas desarrolladas en la investigación
Fuente: el autor.

9.3 Localización de zona de estudio

El tramo de vía en estudio con identificación [CIV] 5009742 se encuentra en la localidad de Usme, Bogotá, Km 2+450 - Km 2+620, vía terciaria que une a las veredas del Hato y La Unión, así mismo este corredor une a estas veredas a la vía secundaria que conduce a la

cabecera municipal de Usme, el tramo se encuentra a una altitud de 3.200 m.s.n.m. La información general y localización de este se presenta en la tabla 5.

Tabla 5. Información del CIV

CIV	5009742
CODIGO UPZ	UPR3
Tipo Clasificación Suelo	Rural
Sección Vial	VR
Tipo malla	Rural
Localidad	Usme
PK_ID_Calzada	91028031
Longitud Horizontal	1.326,33
Área	6.631,64
Tipo Superficie	Mixto
Estado	Malo

¹Tomado de portal web del Sistema de Información Geográfica [SIG] e Instituto de Desarrollo Urbano [IDU]. Recuperado de <https://bit.ly/2xkIaCd>

9.4 Técnicas de medición, instrumentos e indicadores

Para el presente trabajo se consideró el análisis y la discusión de aspectos como:

- Características de la ubicación del suelo que se someterá al mejoramiento.
- Características físicas y mecánicas del suelo a estudiar.
- Determinación de la cantidad optima de aditivo modificador de suelo.
- Mejoramiento de las propiedades del suelo objeto de estudio al adicionar el modificador de suelo.

9.5 Técnicas e instrumentos de medición de características físicas y mecánicas

Para determinar las características físicas y mecánicas se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- Humedad Natural.
- Análisis granulométrico.
- Límites de consistencia.
- Compactación proctor estándar.
- C.B.R.
- Compresión inconfinaada.
- Columna Resonante.

¹Información general del tramo donde se tomó la muestra de estudio.

10. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES

10.1 Ubicación del material para estudio

Con el fin de tener el aporte social, para el desarrollo de la investigación se realizaron acercamientos con la alcaldía de Usme, a quienes se les expuso la intención de desarrollar la investigación teniendo un aporte social, obteniendo una respuesta muy favorable; así, fueron los representantes de la alcaldía quienes priorizando necesidades de la localidad, nos dieron a conocer la problemática del corredor vial seleccionado y el punto crítico de esta vía, esto con el fin de una vez terminado el análisis de laboratorio poder realizar como continuación de otro proyecto de grado la aplicación del producto en el terreno, con toda la disposición de prestar apoyo logístico por su parte y el aporte técnico y profesional por la universidad.

Así, el material seleccionado para el presente trabajo, pertenece al suelo de subrasante de la vía terciaria que comunica a las veredas del Hato y la Unión la localidad de Usme en Bogotá D.C, departamento de Cundinamarca.

El punto en estudio se encuentra en el k 2+450, desde la desviación a la vereda el Hato en la vía secundaria que conduce al paramo del Sumapaz.

Este corredor vial en este punto y en una longitud de 120 m, presenta una continua problemática de deterioro de la subrasante con la presencia de lluvias, lo que impide la movilidad por este corredor, sin embargo, en épocas de verano el sitio tiene un comportamiento muy bueno. En este punto se tomaron muestras de suelo de subrasante mediante apiques, a estos especímenes se les realizó la respectiva caracterización y posterior adición de modificador de suelos objeto de estudio.



Figura 9. Ubicación del tramo de estudio vista general
Fuente: Google Maps,



Figura 10. Ubicación del tramo de estudio vista específica
Tomado de Google Earth. Recuperado de <https://bit.ly/2UpXEwK>



Figura 11. Imágenes de detalle del sitio
Fuente: el autor.



Figura 12. Imágenes de detalle del sitio
Fuente: el autor.

Se realizó una primera visita a la posible zona de estudio para hacer un reconocimiento preliminar del terreno, con el interés de identificar los escenarios de este, permitiendo realizar una planeación de las actividades y organizar una adecuada campaña de campo para la recolección de las muestras de suelo que sería objeto de estudio.

En la segunda visita de campo programada se realizaron apiques a profundidades de 30-40cm en promedio, dando cumplimiento a los requerimientos sugeridas en las normas INVIAS. Se extrajeron muestras inalteradas las cuales fueron sometidas a los diferentes ensayos de laboratorio y el proceso de modificación para el desarrollo de la investigación.

10.2 Geología de la zona

La localidad de Usme se ubica en al sur de Bogotá, limita al occidente con la localidad de Ciudad Bolívar y el municipio de Pasca; al sur con la localidad de Sumapaz; al norte con las localidades de Tunjuelito, Rafael Uribe Uribe y San Cristóbal y al oriente con los municipios de Ubaque y Chipaque. Usme tiene una extensión total de 21.507 hectáreas (ha), de las cuales 3.029 se clasifican en suelo urbano y 18.477 se clasifican en suelo rural, lo que equivale al 85,9% del total de la superficie de la localidad. Usme es la segunda localidad con mayor extensión del Distrito. (Secretaria Distrital de Planeación, 2011)

La mayor parte del territorio es montañoso y sus pisos térmicos varían de frío a páramo en la parte alta de los cerros surorientales; al sureste, en el sector comprendido entre Usme y Soacha, las temperaturas oscilan entre los 7 y 14 grados centígrados; el promedio en la zona rural es de 8 grados centígrados y en la zona urbana es de 13.6. (Secretaria Distrital de Planeación, 2011)

Usme se encuentra sobre la formación geológica que lleva su mismo nombre, acorde con el servicio geológico colombiano, la zona se caracteriza por presentar grandes conjuntos rocosos, en los que predominan en su parte inferior un conjunto de areniscas y areniscas guijarrosas, (areniscas de la formación la regadera), un conjunto medio que contiene arcillas esquistosas y en la parte superior una capa de areniscas con intercalaciones de areniscas y arcillas, en partes con incrustación de carbón. (Cámara de Comercio de Bogotá, 2012)

En la figura 13, se muestra que la zona de estudio se encuentra en la región amarilla con las siguientes características geológicas en la parte superior: arcillolitas abigarradas con esporádicas intercalaciones de arenita feldespática de grano medio a grueso. Parte inferior: alternancia de lodolitas rojizas y arenitas feldespáticas y líticas de grano medio a fino en capas muy gruesas (Alcárcel & Gómez, 2019)

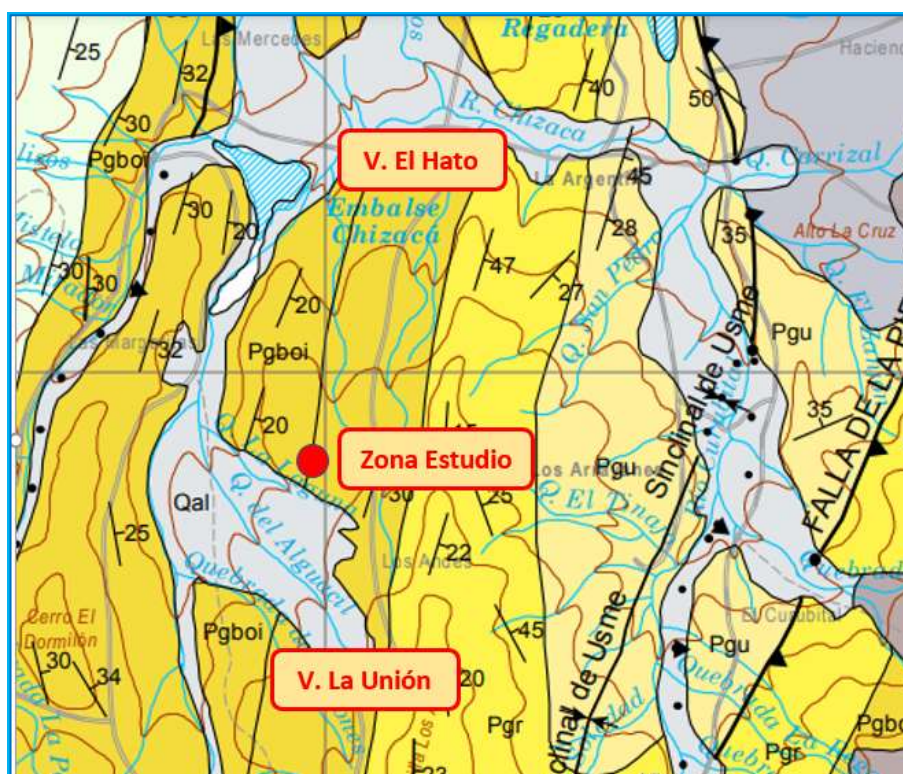


Figura 13. Geología de la zona de estudio
Tomado de SGC plancha 246, Recuperado de
http://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Estado_Cartografia_Geologica/

10.3 Formaciones Geológicas

La localidad de Usme se encuentra caracterizada por diferentes formaciones, nuestro sitio de estudio se encuentra en la formación Bogotá, a continuación, se describen las siguientes formaciones:

Formación Bogotá (Terciario, Paleoceno-Eoceno Inferior).

Hubach (1931), denominó piso de Bogotá a la secuencia del terciario medio que está constituido por tres conjuntos, el inferior, que es arcilloso y arenoso e incluye el horizonte de Cacho en la parte basal; el conjunto medio conformado por arcillolitas abigarradas entre las cuales se intercalan algunos bancos de areniscas arcillosas, y el conjunto superior, formado por bancos de areniscas de grano grueso, blandas que alternan con arcillolitas abigarradas. (Ministerio de minas y energías, 2005, pág. 57)

Julivert (1963), La formación Bogotá se encuentra concordantemente encima de la arenisca del Cacho en los sinclinales de Tunjuelo, Bogotá-Cajicá-Checua, Teusacá, Sesquilé, y Siecha-Sisga. Está compuesta casi exclusivamente por arcillolitas abigarradas (grises, violáceas, moradas y rojas), bien estratificadas, con algunos bancos de areniscas micáceas grises de grano fino, hacia la parte superior de la unidad con unos espesores variables que se encuentran entre 800 m y 2000 m.

En 1997, el INGEOMINAS y el ministerio de Minas y Energía, la definen como la sucesión de arcillositas y areniscas cuarzosas feldespáticas, de color gris verdoso de grano fino hacia la base y grueso hacia la parte superior. El conjunto principal de esta formación posee arcillositas de varios colores como color gris oscuro, gris verdoso y marrón, este como resultado de la meteorización. Estas arcillas en la zona son utilizadas como materia prima para la fabricación de ladrillos, tejas y tuberías.

La litología de la formación Bogotá, genera una morfología suave de valles, la cual está compuesta por intercalaciones de bancos de arcillolitas de diferentes colores con ocasionales crestas formadas por areniscas.

Posición estratigráfica y edad.

Julivert (1963), determina un contacto y concordante entre las Formaciones Bogotá y Regadera en la sección tipo de la formación Bogotá (Quebrada Zo Grande), sin embargo, al norte plantea para la zona de Tunjuelito una discordancia angular que corta niveles más bajos hasta colocar a la formación Regadera en contacto con capas de la formación Guaduas, no obstante, en este mismo sector, Acosta & Ulloa (1998), cartografiaron una falla que pone en contacto estas dos unidades, desvirtuando la presencia de una discordancia. (Ministerio de minas y energías, 2005, pág. 58)

Formación Usme: (Terciario, Eoceno superior).

Hubach 1957, define la formación Usme como la secuencia de origen marino que aflora en el sinclinal del Tunjuelo, representada por areniscas intercaladas con cascajos y arcillas grises claras. (Ministerio de minas y energías, 2005)

Julivert, M., 1963 La Formación Usme reposa discordantemente sobre la formación Regadera en el Sinclinal de Tunjuelo. Consta de un miembro inferior de arcillolitas grises con ocasionales intercalaciones de areniscas de grano fino. El miembro superior contiene areniscas cuarzosas de grano grueso y conglomerados finos. El espesor total es de 125 m.

Hoorn, describe la formación Usme como la conformación de Limonitas y arcillolitas de colores gris oscuro y amarillo debido a la meteorización, así mismo presentan intercalaciones esporádicas de areniscas cuarzosas de grano fino.

Posición estratigráfica y edad.

La formación Usme es discordante sobre la formación Regadera y es cubierta discordantemente por depósitos cuaternarios. La edad de esta formación con base en palinología es Eoceno superior y Oligoceno inferior (Hoorn, et al., 1987). (Ministerio de minas y energías, 2005, pág. 65)

Formación la Regadera (Terciario, Eoceno Medio).

Julivert (1963), llama formación Regadera a la parte baja de la formación Usme definida por Hubach (1957), en ella se agrupan areniscas no consolidadas de grano grueso y capas de conglomerados que alternan con arcillas rosadas y rojizas, que suprayace a la Formación Bogotá y es cubierta por la Formación Usme en la región del Río Tunjuelo (sinclinal de Usme). (Ministerio de minas y energías, 2005, pág. 60)

En 1997, el Ministerio de Minas y Energía e INGEOMINAS, describen la formación la Regadera como capas de areniscas de cuarzo y fragmentos líticos de color gris claro. La cual presenta cuantiosa matriz arcillosa e intercalaciones de arcillolitas que varían desde de color gris claro a color oscuro, de consistencia blandas y plásticas. En esta formación se encuentran arenas de condiciones apropiadas para material de construcción. (Ministerio de minas y energías, 2005, pág. 60)

Formación Tunjuelito (Cuaternario, Pleistoceno-Holoceno).

El cono fluvio-glacial de Tunjuelito, es un extenso depósito del curso bajo del río Tunjuelito, en el sur de la ciudad, entre el ápice en la quebrada del Aleñadero, 3 km al sur de Usme, y su parte distal en los barrios de Bosa, Class, Kennedy, Bavaria y San Rafael. (IDEAM, pág. 3)

Los sedimentos que componen el depósito son, bloques hasta de 2 metros de diámetro, bolos, cantos, grava, gravilla, arena, limo y arcilla. El cono se divide en tres sectores: una parte

alta entre la quebrada del Aleñadero y la quebrada de Yomasa; una parte media entre la quebrada de Yomasa y los barrios Meissen y Tunjuelito; y una parte baja entre los citados barrios y Ciudad Kennedy.

La parte alta está compuesta principalmente por arenas gruesas con grandes bloques, arcillas y limos, espesores hasta de 50 metros. La parte media está compuesta principalmente por gruesas capas de gravas, arenas y limos, debajo de una capa superficial de arcillas que varía en espesores entre 7 y 12.50 metros, y un espesor total variable hasta de 150 metros. En el sector se encuentran grandes explotaciones de agregados pétreos. La parte baja está compuesta principalmente por arenas finas y arcillas, las cuales se intercalan con los depósitos lagunares de la Formación Sabana. (Ministerio de minas y energías, 2005)

Formación Sabana (Terciario-Cuaternario, Plioceno-Pleistoceno-Holoceno)

La formación Sabana, está conformada por depósitos lacustres que afloran en toda la zona plana y que hace parte de la Sabana de Bogotá.

“Hermes & Van der Hammen (1995), es aquella que, constituida principalmente por arcillas, hacia las márgenes de la cuenca se puede observar arcillas orgánicas, arenosas y turbalignita.” (Ministerio de minas y energías, 2005, pág. 72)

En el año de 1997, el INGEOMINAS y el Ministerio de Minas y Energía, las define como suelos lacustres, paludales y marginales arcillosos de color rojizo.

Usme presenta uno de los cuatro bloques tectónicos, que Circundan la ciudad conocidos como el central Hundido o Sinclinal de Usme - Tunjuelo, entre la falla de Bogotá, al oriente y a la falla inversa del Mochuelo al occidente.

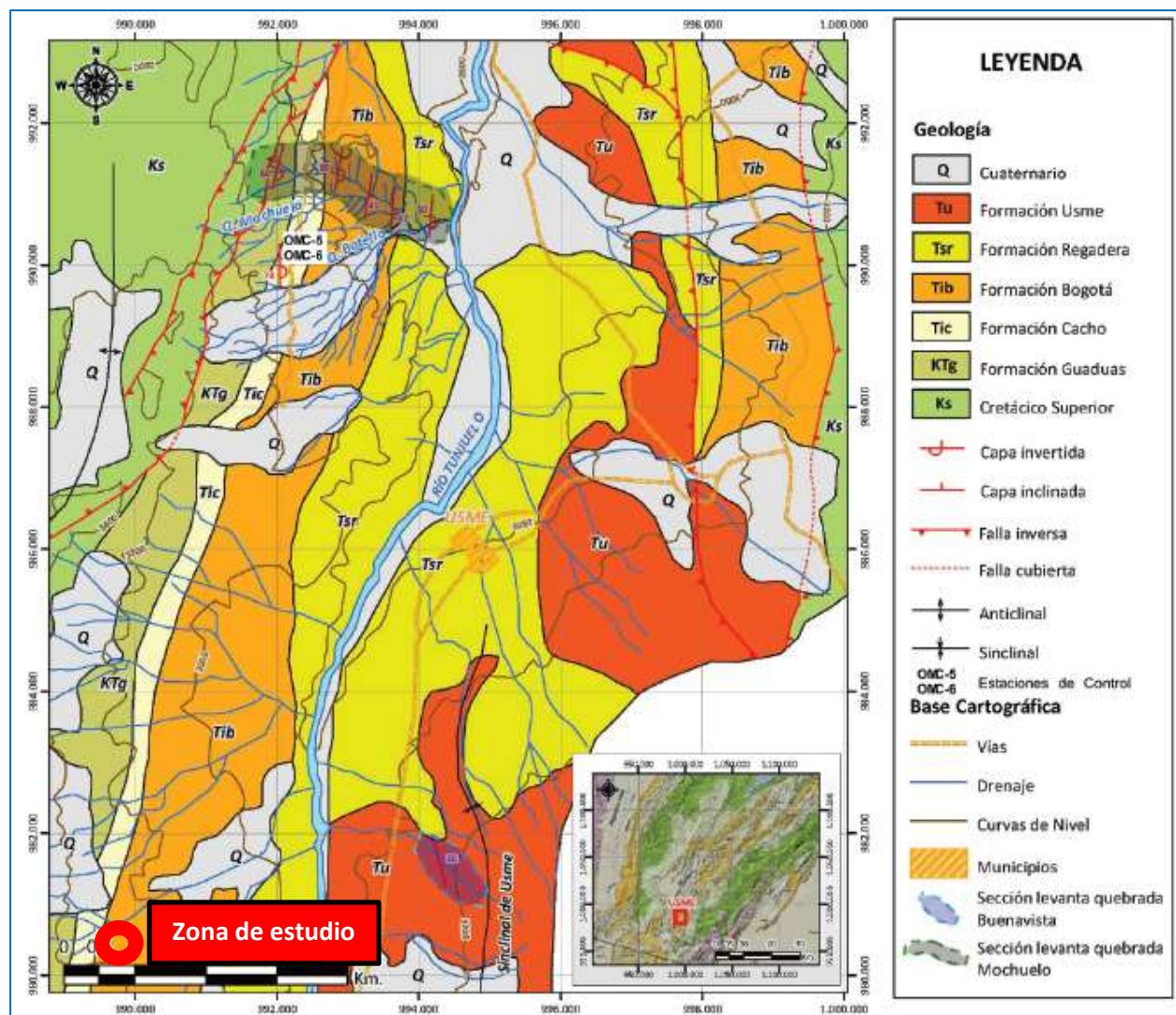


Figura 14. Mapa geológico del Sinclinal de Usme

Fuente: (modificado de Hoorn, 1988; Montoya y Reyes, 2005) (OMC-5, OMC-6) (de la plancha topográfica del IGAC, 246 II B, escala 1:25000).

11. ANÁLISIS DEL SUELO NATURAL.

11.1 Caracterización del suelo natural

Para conocer el valor de las propiedades físicas y mecánicas que tienen el suelo, conocer su clasificación, y poder inferir posibles comportamientos de este frente al uso del aditivo, se realizaron ensayos de humedad, límites de Atterberg, límite de contracción, gravedad específica, pasa 200, equivalente de arenas e hidrometría, proctor, CBR, compresión incofinada y columna resonante. Los resultados de estas pruebas de laboratorio se muestran a continuación:

Descripción del suelo

La presente descripción se realizó conforme lo descrito en la norma I.N.V. E – 102, DESCRIPCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE SUELOS (PROCEDIMIENTO VISUAL Y MANUAL) del instituto nacional de vías.

El suelo obtenido de los diferentes apiques realizados, son todos de características similares por cuanto se describe de manera general las muestras obtenidas de campo.

El sitio en estudio, geológicamente se encuentra cercano al sinclinal de Usme, en el área se encuentran las formaciones Usme, la formación Bogotá y la formación Regadera, la muestra de suelo se tomó a una profundidad de 20 cm de la subrasante sobre el eje de la vía, el material obtenido pertenece al horizonte B, la descripción se realizó sobre una muestra de seca al aire, suelo color café claro, con algunas betas de color naranja, suelo fino, arcilloso, sin presencia de arenas y materiales gruesos, inoloro, humedad baja, reacción al HCL nula, presenta una cementación moderada, dilatancia lenta, estructura uniforme, con presencia de

algo de raíces. El suelo en presencia de agua tiene una consistencia muy blanda, mientras que seco al aire es de resistencia dura, característica muy común en las arcillas.

11.2 Clasificación del suelo

Humedad Natural

En promedio la humedad del suelo natural corresponde a 3,5%, se pudo estimar que este valor varía 0,5% según la humedad del ambiente y el almacenamiento del material, en la época que se tomó la muestra en campo el clima se encuentra en estado seco. Ver anexos.

Límite Líquido

El límite líquido (LL) corresponde al valor de humedad a los 25 golpes, para la zona de estudio este límite es de 45% de humedad. Ver anexo.

Límite Plástico

Para la zona de estudio el límite plástico (LP) se encuentra con un 27% de humedad; es decir, que cuando el suelo alcanza esa humedad pasa de una consistencia sólida a una consistencia semilíquida. Ver anexo

Índice de Plasticidad

Una vez determinado el índice de plasticidad al suelo natural, se tiene un valor de 18%. Aplicando los conceptos de Atterberg para determinar las características de plasticidad y cohesión de acuerdo con el índice de plasticidad se tiene que es una arcilla limosa medianamente cohesiva y una resistencia media en estado seco.

Límite de Contracción

Para la zona de estudio el límite de contracción (LC) es de 21.96%, es decir, que los contenidos de humedad superiores a este valor, el suelo presentará cambios volumétricos. Su relación de contracción (RC) es de 1,91%, su cambio volumétrico (CV) es de 72.65% y su contracción lineal (CL) es de 16,64%. Ver anexo.

Gravedad Específica

Para la zona de estudio la gravedad específica del suelo es 2,67 afirmando la clasificación de ser un suelo limo-arcilloso. Ver anexo

Material pasante del tamiz No 200

Al realizar el lavado de la muestra con agua potable, la pérdida de masa como resultado de este lavado fue del 97,80%. Ver anexo.

Hidrometría

Con los resultados obtenidos de esta prueba, se infiere y afirma que el tipo de suelo encontrado en el sitio es limo-arcilloso en un 88,2%, con algunas partículas más pequeñas llamadas coloides en un 11,8%. En la tabla 6, se presentan los resultados obtenidos en la prueba de hidrometría.

Tabla 6. Resultados prueba de hidrometría

Resultados de prueba por hidrometría		
5< limo μ <75	arcilla <5 μ	coloides <1 μ
41,2	47	11,8

Fuente: el autor

Actividad

Skepton en 1953 observó que el índice de plasticidad crece linealmente con el porcentaje de partículas de arcilla $<2\mu$, a este concepto lo denominó actividad, que corresponde a la pendiente de la línea que correlaciona en IP con el porcentaje de partículas menores de 2μ y se puede expresar como.

Ecuación 1.

$$Actividad = \frac{Indice\ de\ plásticidad}{\% Particulas < 0.002\ mm}$$

Para el suelo en estudio se tiene,

Ecuación 2

$$Actividad = \frac{18}{82.2} = 0,20$$

Con el resultado obtenido de 0,20 el cual es menor de 0,75 se tiene que el suelo tiene una actividad calificada como inactiva lo cual es beneficioso ya que ni tiene mayor efecto en cuanto a los límites líquido y plástico.

Equivalente de Arena

Para la zona de estudio el ensayo de equivalente de arena es de un 100% de contenido de polvo fino de material limo arcilloso. Ver anexo.

11.3 Clasificación Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Según la clasificación S.U.C.S, el suelo de estudio con un LL de 45%, IP de 18%, y teniendo en cuenta que más de la mitad del material pasa el tamiz N200, el suelo de estudio

se clasifica como CL (Arcilla de plasticidad media a baja). Ver anexo F: Clasificación Sistema Unificado de Clasificación (SUCS).

11.4 Clasificación AASHTO

Para la clasificación AASHTO, teniendo en cuenta que el material en mención pasa más del 35% del tamiz No 200, es un material limo-arcilloso (A-7), y su IP es de 18%, su límite líquido es menor que LL (45%)-30, se considera un suelo limo-arcilloso de baja plasticidad con cambios de volumen no tan grandes. Se clasifica como A-7-5. Ver anexo.

11.5 Propiedades de Resistencia del Suelo Natural.

Proctor

En la figura 15, se muestra la densidad máxima seca de compactación para el suelo natural la cual es de $2,14 \text{ gr/cm}^3$, la cual se obtuvo con una humedad óptima de compactación de 16%.

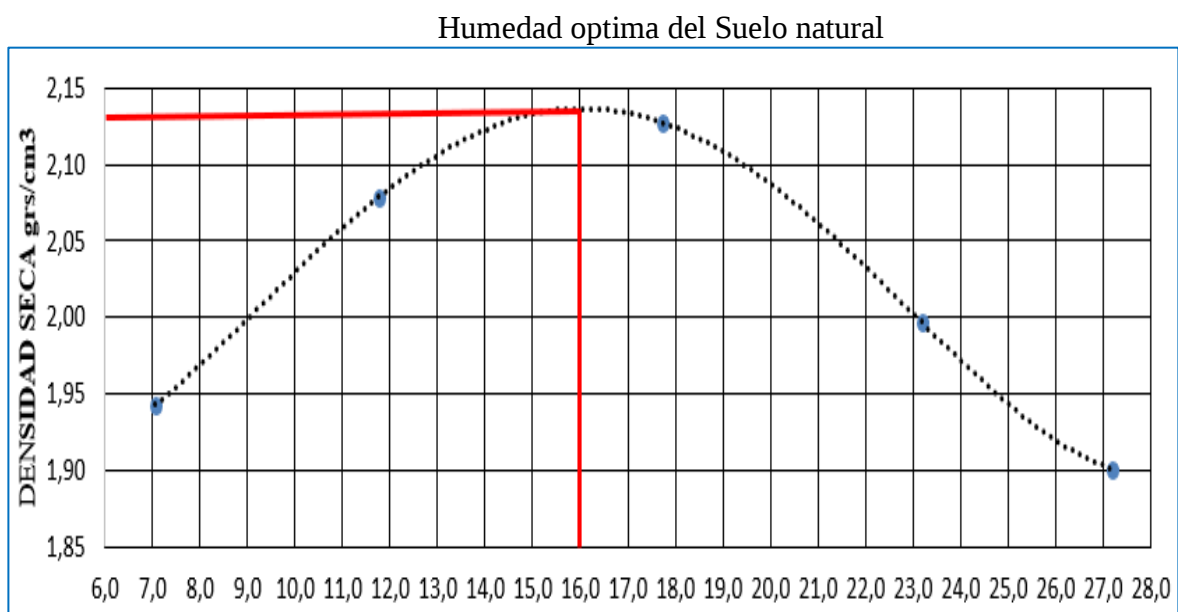


Figura 15. Curva Proctor densidad Vs Humedad

Fuente: el autor

C.B.R.

En la tabla 7, se presenta la información de los resultados principales del ensayo de valor de relación de soporte (C.B.R), para cada una de las compactaciones a sus respectivos golpes, los parámetros densidad seca, densidad saturada, expansión y el (C.B.R.) con la densidad seca obtenida en el ensayo.

Tabla 7. Resumen resultados ensayo C.B.R.- Suelo natural

Parámetros	10 golpes	25 golpes	56 golpes
Densidad seca g/cm ³	2	2.14	2.18
Densidad saturada g/cm ³	1.81	2.05	2.14
Expansión %	1.452	3.69	3.18
CBR	15	16	32

²Fuente: el autor

Compresión Inconfinada

Para la zona de estudio, el valor de la resistencia a la compresión en la muestra natural tallada es de 10,274 Kg/cm² y para las muestras de suelo natural moldeadas es de 10,188 Kg/cm², estos resultados nos permitieron tener seguridad de la densidad que se debe tener en los especímenes para las probetas de los suelos modificados.

² Resultados generales del ensayo CBR.

La tabla 8, resume los resultados de la caracterización del suelo en su estado natural, valores que fueron de control en el proceso de modificación.

Tabla 8. Resumen de resultados de caracterización del suelo en estado natural

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Humedad Natural	W _n	%	3,5
Límite Líquido	LL	%	45
Límite Plástico	LP	%	27
Índice de plasticidad	IP	%	18
Plasticidad	PL	-	Baja
Límite de Contracción	LC	%	21,96
Relación de Contracción	RC	%	1,91
Cambio Volumétrico	CV	%	72,65
Contracción Lineal	CL	%	16,64
Pasa No 200	P200	%	97,8
Gravedad Específica	G _s	-	2,67
Hidrometría	H _d	%	88,2
Compresión Inconfinada Muestra Tallada	CI-T	kg/cm ²	10.274
Compresión Inconfinada Muestra Conformada	CI-C	kg/cm ²	10.188
C.B.R.	10 golpes 15%	25 golpes 16%	56 golpes 32%
Clasificación	SUCS		CL
Clasificación	AASHTO - IG		21
Clasificación	AASHTO - Subgrupo		A-7-5

Fuente: el autor

Sensitividad

Cuando a los suelos se le destruye su estructura original, se dice que es remoldeada, esto puede suceder por la intervención humana y por movimientos en masa. cuando una arcilla pierde su estructura original por remoldeo, su resistencia disminuye debido a la ruptura de la adhesión electroquímica entre partículas y a la redistribución del agua adsorbida que se transforma en agua libre, así al comparar las resistencias remoldeada y en estado inalterado de

un mismo suelo sin cambiar el contenido de agua se llama sensibilidad y se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 3

$$Sensitividad = \frac{Resistencia\ de\ la\ arcilla\ inalterada}{Resistencia\ de\ la\ arcilla\ remoldeada}$$

Para el suelo en estudio se tiene,

Ecuación 4

$$Sensitividad = \frac{10.274\ kg/cm^2}{10.188\ kg/cm^2} = 1,0$$

Con el valor obtenido y de acuerdo con la escala de sensibilidad definida en bibliografías de mecánica de suelos, se tiene que para valores de sensibilidad <2 , la arcilla es insesitiva, de lo cual podemos inferir que este suelo al ser sometido a vibraciones u otro tipo de alteraciones no son propensas al colapso.

12. PROCESO DE MODIFICACIÓN DEL SUELO

Actualmente a nivel mundial existen más de 170 alternativas diferentes de aditivos mejoradores de suelos para carreteras, con una gran variedad de resultados que cada uno de los productores tiene su propia justificación, sin embargo, debido a la gran oferta de productos no ha sido posible normalizar un proceso para el uso de los modificadores, en principio esto se debe a que cada modificador tiene su origen de diferentes formas, algunos como subproductos de procesos industriales y otros son realizados en laboratorios químicos en los cuales están protegidos por sus patentes. Esto hace que se tenga muy poca información sobre ellos y de manera general en América Latina y Sur América, no se cuente con manuales o normas oficiales que permitan tener guía del uso de modificadores desarrollados actualmente lo que nos lleva a seguir metodologías empíricas y aquellas recomendadas por el productor las cuales tienen sustento en sus propias experiencias.

12.1 Determinación de la cantidad optima de aditivo.

El modificador que se uso es de fabricación Española, las cantidades que recomienda el fabricante adicionar al suelo se extrae de experiencias en otros países en su mayor parte Europeos cuyo seguimiento a sus resultados ha permitido realizar algunas mejoras al producto, la cantidad de aditivo a utilizar que recomienda es 0.5 kg/m^3 de suelo, partiendo de esta indicación del fabricante del producto se eligen dos cantidades adicionales en la cantidad de aditivo para evaluar las propiedades mecánicas del suelo natural las cuales son de 0.25 kg/m^3 y 1 kg/m^3 , con la finalidad de evaluar unos porcentajes tanto por encima como por debajo de lo sugerido. Así, se decide evaluar las propiedades mecánicas del suelo natural con las cantidades de aditivo de 0.25 kg/m^3 , 0.5 kg/m^3 y 1 kg/m^3 .

12.2 Manejo del producto.

El manejo del aditivo se crea a partir de la premisa que da la empresa fabricante, la cual señala que para un metro cúbico de suelo se necesitan 0,5kg de aditivo (0.5 kg/m^3). Ahora bien, de las pruebas realizadas al suelo natural que se va a modificar se tiene que la densidad máxima seca del suelo es de $2,14 \text{ g/cm}^3$ y teniendo en cuenta las relaciones de aditivo/suelo anterior, se obtiene que para una masa de 2140000g (2140 kg) a la humedad optima, se necesitan 500g (0.5kg) de aditivo (esta humedad estará dada de acuerdo con la humedad óptima). Con la relación de suelo/aditivo, se emplea una regla de tres ordinaria.

Es de resaltar que la humedad no variará si la cantidad de aditivo cambia, ya que la cantidad de agua depende exclusivamente de la masa de suelo que se vaya a utilizar y el tipo de prueba que se realiza. Sin embargo, la regla de tres también se podría aplicar dependiendo de la cantidad de agua para alcanzar una humedad determinada en el suelo. En la tabla 9, se ilustra un ejemplo del cálculo del aditivo con la variable de cantidad de agua y masa del suelo.

Tabla 9. Determinación de la cantidad de agua y masa del suelo

	Masa del suelo (g)	aditivo (g)
Ejemplo	2140000	500
	1000	X

³ Fuente el autor

$$\text{Ecuación 5 } x = \frac{(1000g \cdot 500g)}{2140000g} \quad x = 0.234g$$

Para el cálculo de aditivo a utilizar en las pruebas de límites de Atterberg, Proctor, CBR y Compresión Inconfinada de suelos, se procedió con la metodología anteriormente descrita.

³ Planteamiento regla de tres para el cálculo de aditivo a usar dependiendo la masa del suelo.

13. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LA MUESTRA DE SUELO

MODIFICADO

Límite Líquido

En la figura 16, se observan los resultados del límite líquido del suelo modificado en cantidades de 0.25kg/m^3 , 0.5kg/m^3 y 1kg/m^3 de aditivo. Los resultados obtenidos indican que para los tres porcentajes de aditivo adicionado el efecto es el mismo en cuanto al límite líquido, presentando una mejora 8.88% respecto al suelo natural. Así, podemos inferir que el suelo requiere una mayor cantidad de agua para llegar a una consistencia líquida.

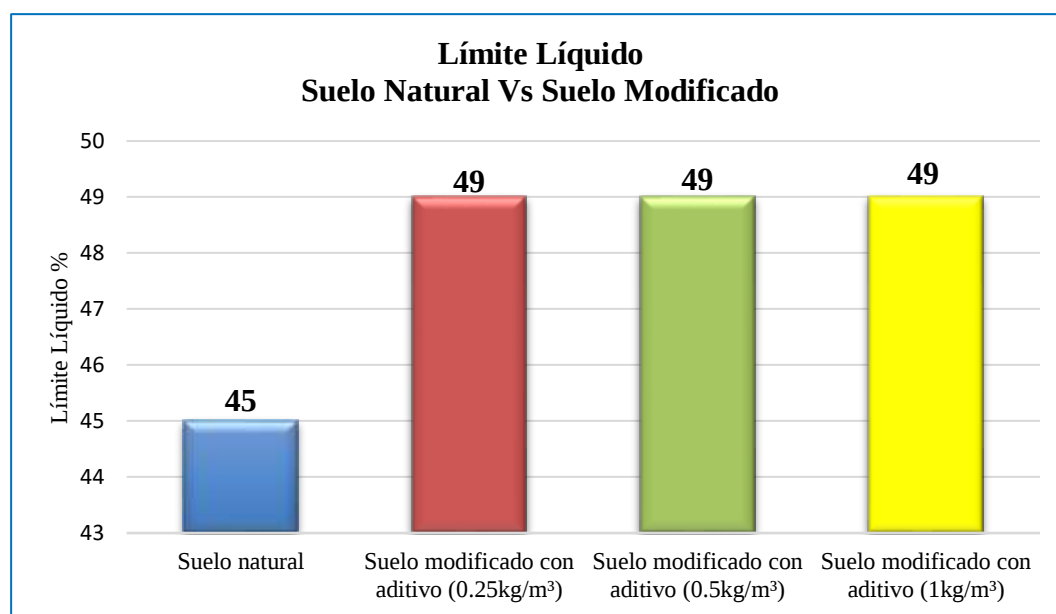


Figura 16. Comparación del Límite Líquido suelo modificado

Fuente: el autor

Límite Plástico

Los resultados obtenidos del suelo modificado con el aditivo nos indican que se presentó una reducción favorable en su límite plástico en valores de 22.22%, para adiciones de 0.25kg/m^3 y 0.5kg/m^3 y 3.7% para la cantidad de 1kg/m^3 , tomando como referencia el suelo

en condiciones naturales. En la figura 17, se observa que el límite plástico del suelo natural disminuyó al adicionarles el aditivo, lo que nos permite ver que el suelo en su estado plástico tendrá un rango más amplio de moldeado sin romperse.

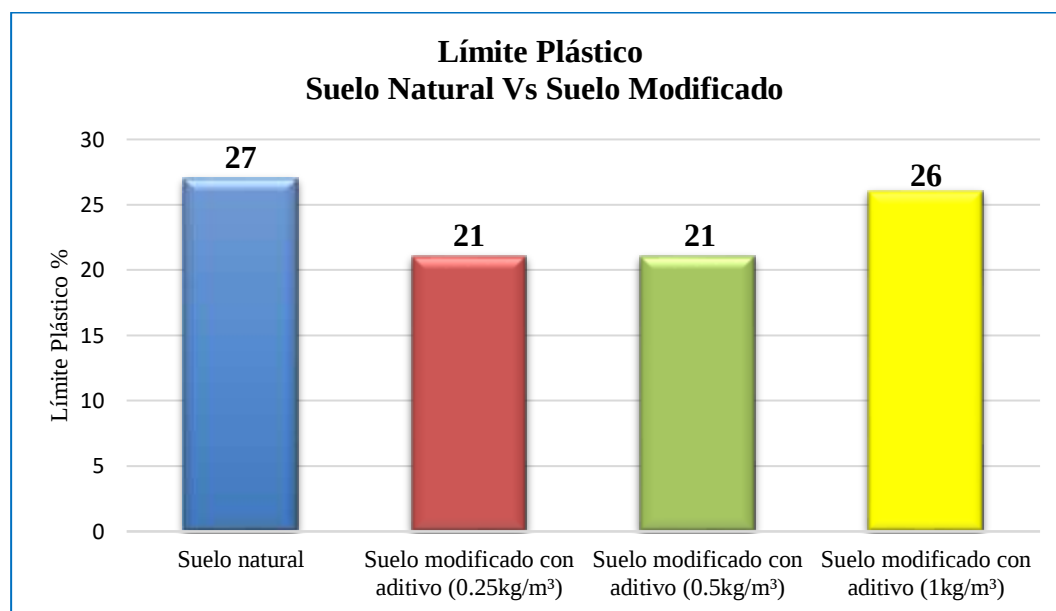


Figura 17. Comparación del Límite Plástico suelo natural vs suelo modificado

Fuente: el autor

Índice de Plasticidad

Para el suelo modificado con el aditivo en cantidades de 0.25kg/m^3 y 0.5kg/m^3 se obtuvo un incremento del 55.55%, y para una cantidad de aditivo de 1kg/m^3 obtuvo un incremento del 27.77% respecto al suelo en condiciones naturales. En la figura 18, se observan los resultados obtenidos para la prueba de índice de plasticidad.

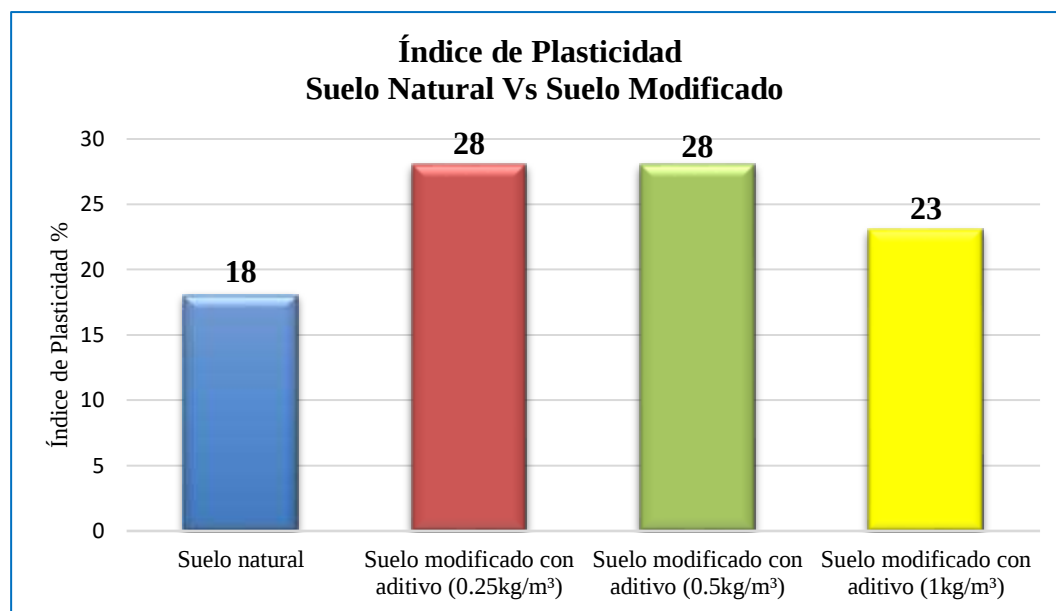


Figura 18. Comparación del Índice de Plasticidad suelo natural vs suelo modificado

Fuente: el autor

Los límites de Atterberg, del suelo natural, indican que tiene una alta actividad para la fracción fina, con un límite líquido de 45 e índice de plasticidad de 18, los resultados obtenidos después de la adición del modificador reflejan que el material tiene capacidad de ionizar la molécula de agua y por consiguiente producir un comportamiento plástico, lo cual indica presencia de limos y arcillas de alta actividad eléctrica. Lo más relevante de este resultado es que el suelo con aditivo necesita una mayor cantidad de humedad para pasar de un estado plástico a un estado líquido.

Límite de Contracción

En el suelo modificado con el aditivo en sus diferentes cantidades 0.25kg/m^3 , 0.5kg/m^3 y 1kg/m^3 para esta prueba se aprecia una reducción favorable de su límite de contracción en un 16.30%, 23.63% y 11.93% respectivamente, tomando como referencia el suelo en

condiciones naturales. En la figura 19, se observa los resultados obtenidos del límite de contracción.

La contracción, disminuyó en presencia del aditivo en comparación al del suelo natural, lo que nos permite determinar que el aditivo disminuye la contracción de los suelos, siendo muy beneficioso para suelos de Subrasante.

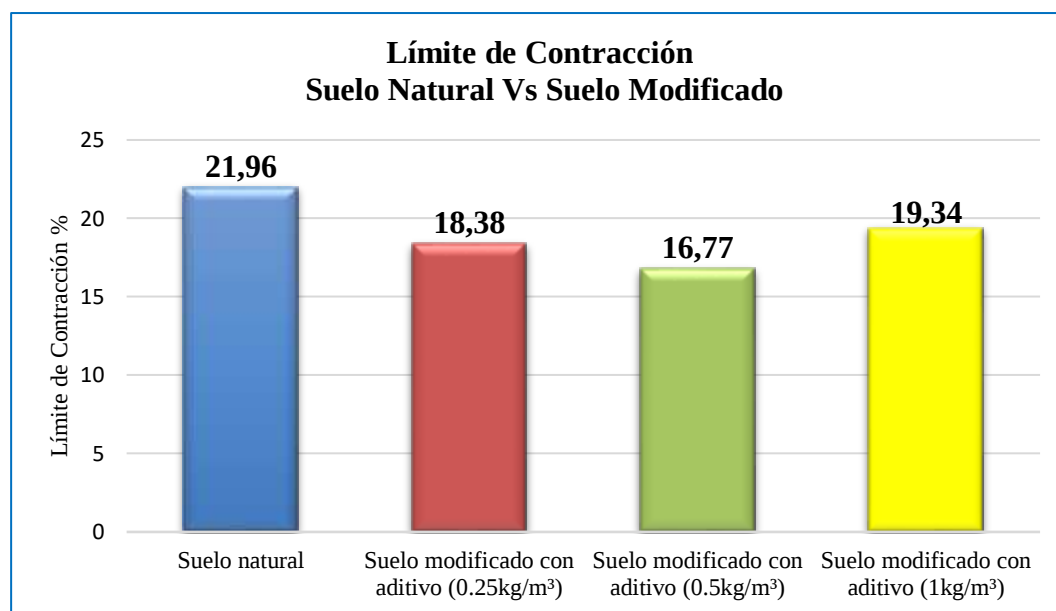


Figura 19. Comparación del Límite de Contracción suelo natural vs suelo modificado

Fuente: el autor

Relación de Contracción

El suelo modificado con el aditivo en cantidades en las tres cantidades de aditivo, mostro una reducción de la relación de contracción, en un 5.75% para una cantidad de aditivo de 0.25kg/m³ y un 6.80% para las cantidades de 0.5kg/m³ y 1kg/m³ como referencia el suelo en condiciones naturales. En la figura 20, se observan los resultados de la relación de contracción del suelo con las diferentes cantidades de aditivo y la comparación con el suelo natural. Se observa la reducción de la relación de contracción en presencia del aditivo, lo que

indica que el aditivo incluido en el suelo mejora la susceptibilidad al agua beneficiando los cambios de volumen del suelo.

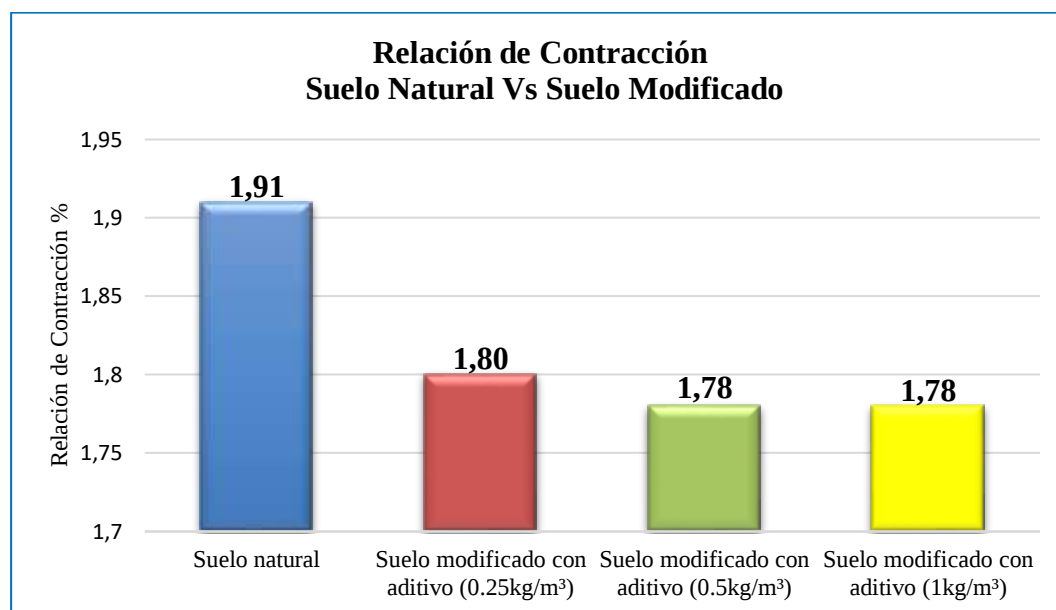


Figura 20. Comparación de la relación de contracción suelo natural vs suelo modificado

Fuente: el autor

13.1 Propiedades de Resistencia del Suelo Modificado.

Proctor

En la figura 21, se puede ver que al estabilizar el suelo con el aditivo en las cantidades de 0.25kg/m^3 y al $0,5\text{ kg/m}^3$, el porcentaje de humedad de estos es el mismo, 16.5%; sin embargo, esta humedad es 3.12% mayor que el porcentaje de humedad del suelo natural. Por otro lado, la densidad de compactación aumenta un 0,42% y 0,28% respectivamente en referencia con el suelo natural, es decir que, aunque la densidad seca incrementó, se requirió de mayor agua para lograrlo. Mientras que el suelo estabilizado con 1 kg/m^3 su densidad disminuye 0,75% respecto al suelo natural, al igual que la humedad de moldeo que disminuye en un 12,5% lo que significa que para obtener su densidad máxima necesita una menor

cantidad de agua, aunque su densidad sea menor. Para ver los datos de laboratorio del ensayo Proctor del suelo con aditivo ver anexo: Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación). I.N.V. E - 141.

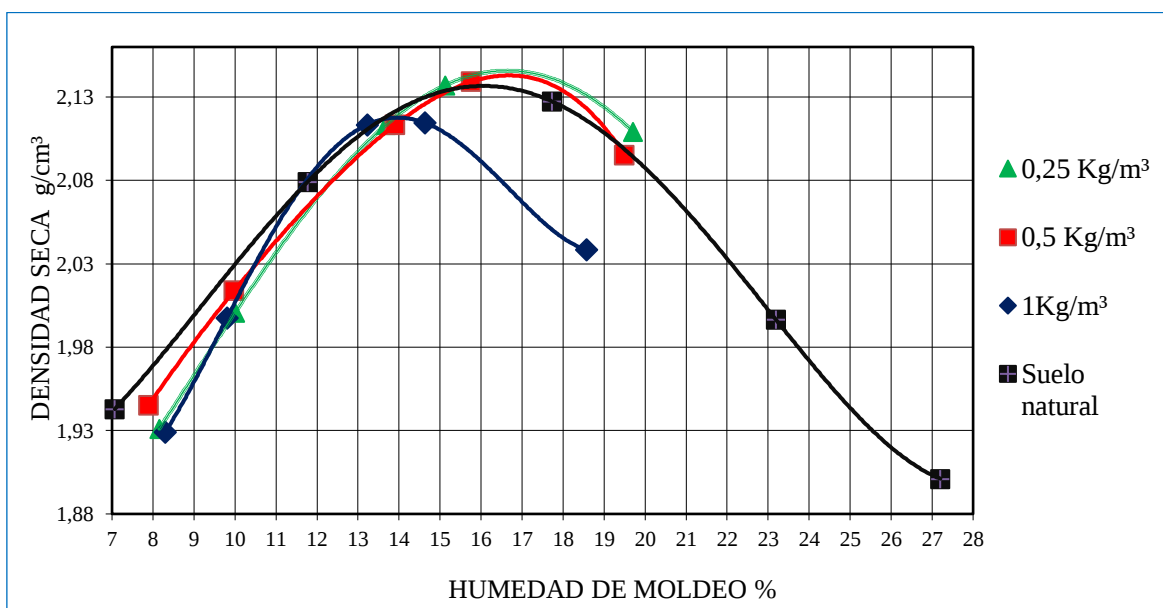


Figura 21. Comparación de los resultados, ensayo Proctor suelo natural vs suelo modificado

Fuente: el autor

C.B.R.

Como se observa en la figura 21, al realizar el ensayo de CBR a los 10 golpes, se analiza que el suelo estabilizado con el 0,25 kg/m³, se obtiene el mayor incremento de la capacidad portante con un valor de 13,33% con respecto al suelo natural, para una cantidad de aditivo de 0,5 kg/m³ se mantiene igual, es decir, que a los 10 golpes y esta cantidad de estabilizante, el suelo no adquiere ninguna mejora, finalmente con 1kg/m³ la capacidad aumenta un 3,33%, teniendo en cuenta que es la cantidad más grande del aditivo suministrado y su aumento en capacidad no es tan significativa. Para ver los datos de laboratorio del ensayo

CBR del suelo con aditivo ver anexo: CBR suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada. I.N.V. E - 148.

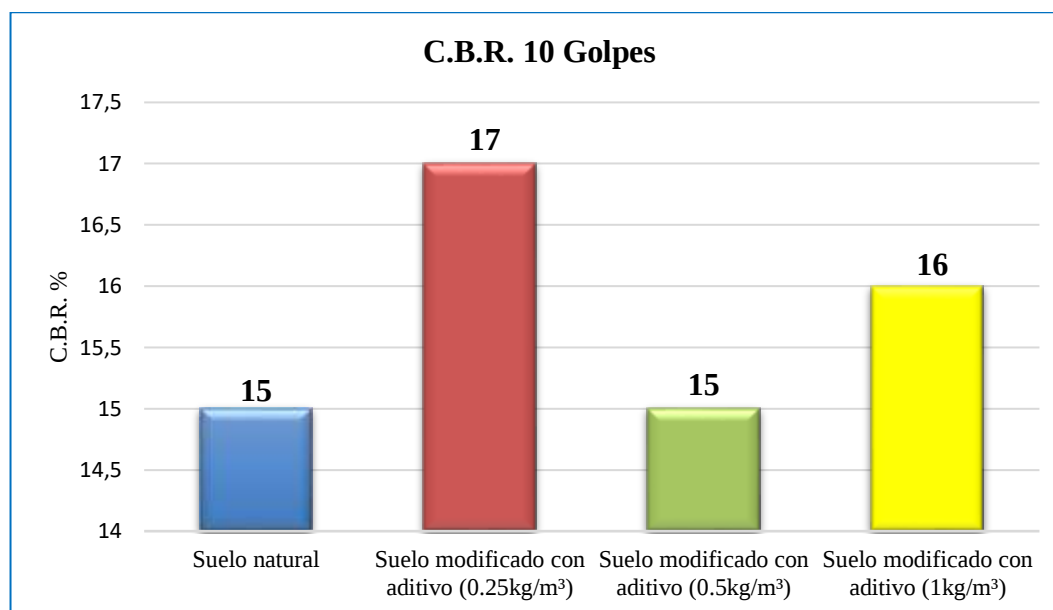


Figura 22. Comparación del CBR a 10 golpes suelo natural vs suelo modificado

Fuente: el autor

⁴En la figura 23, se observa que al realizar el ensayo con 25 golpes el incremento más significativo es con 1 kg/m³ del aditivo, obteniendo un resultado de 112% respecto al suelo natural, mientras que con 0,25 kg/m³ y 0,5Kg/m³ el incremento es de 56,3% y 62,5% respectivamente; lo que demuestra que, aunque el aumento es la mitad con respecto al 1kg/m³ sigue siendo un aumento mayor del 50% en su capacidad portante.

⁴ Los datos para la comparación son del ensayo antes de inmersión.

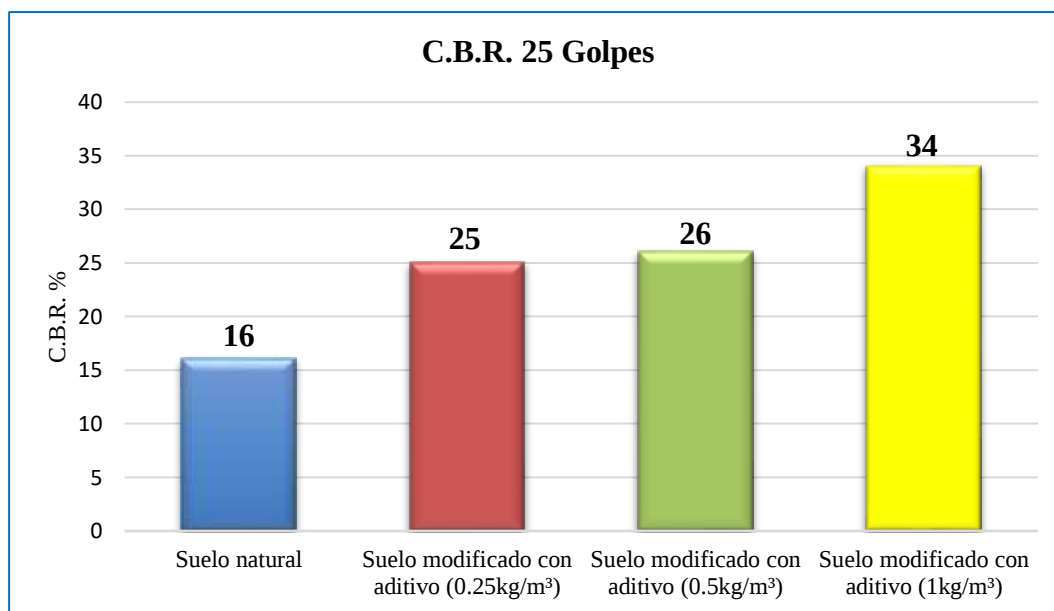


Figura 23. Comparación del CBR a 25 golpes suelo natural vs suelo modificado

Fuente: el autor

⁵Para la prueba con 56 golpes, en la figura 24, se evidencia que el aumento más importante se presenta en la muestra con una cantidad de aditivo de 1Kg/m³ de aditivo, pues se incrementa en un 46,8%, mientras que para el suelo adicionado con cantidades de 0,25 Kg/m³ y 0,5 Kg/m³ de aditivo el aumento es de 6,25%.

⁵ Los datos para la comparación son del ensayo antes de inmersión.

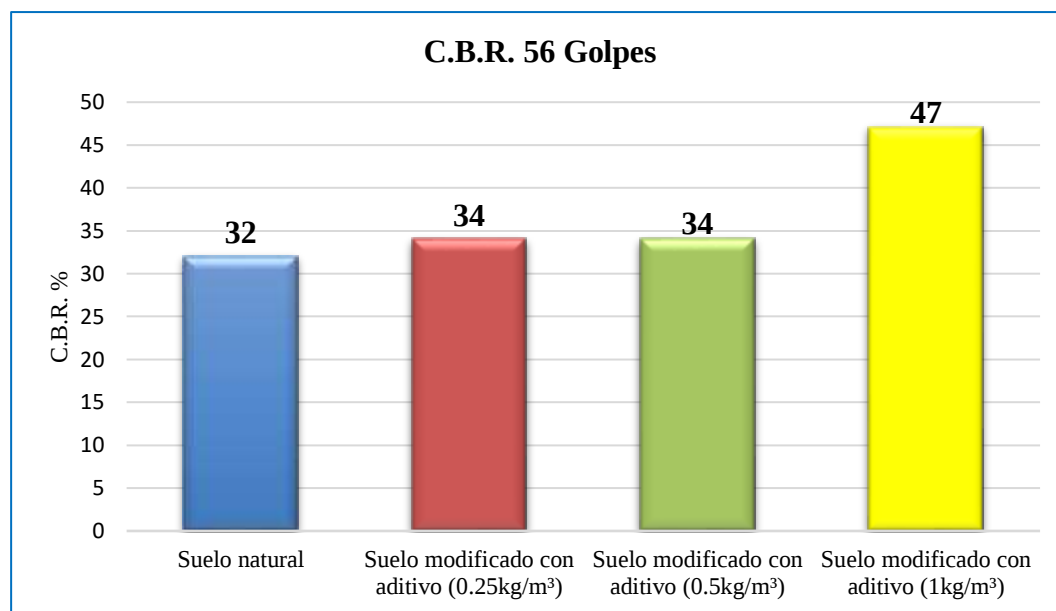


Figura 24. Comparación del CBR a 56 golpes suelo natural vs suelo modificado

Fuente: el autor⁶

De forma general, se observa que:

- El aditivo tiene efectos positivos en su capacidad portante cuando se utiliza 1kg/m^3 desde la energía de compactación más baja, y a medida que va aumentando esta energía, igualmente crece su capacidad portante, incluso en comparación con las otras cantidades de aditivo, la cantidad de 1kg/m^3 obtiene el CBR más alto con las energías de compactación de 25 y 56 golpes con capacidades portantes de 34% y 47% respectivamente.

- Cuando se utiliza el aditivo en cantidades de $0,25\text{ Kg/m}^3$ y $0,5\text{Kg/m}^3$ se obtienen resultados similares con las diferentes energías de compactación, con diferencias máximas de 2% de CBR por la parte superior.

⁶ Los datos para la comparación son del ensayo antes de inmersión.

- La presencia del aditivo en estas dos cantidades si mejora la capacidad portante del material, aunque respecto al material en estado natural el aumento es significativo, con una energía de compactación de 25 golpes se evidencian aumentos de 56,3% y 62,5% para 0,25 Kg/m³ y 0,5Kg/m³ respectivamente, mientras que, con la energía de 10 golpes y 56 golpes, el aumento de energía máximo es de 13,33%. El material con la cantidad de aditivo de 0,25kg/m³ se comporta similar al material en estado natural.

En la tabla 10, se presentan los resultados finales de CBR para la densidad de óptima de compactación de Proctor, debido a que la densidad seca máxima que se obtiene en el CBR cuando se utiliza 1kg/m³ de aditivo es de 2,12 gr/cm³ se toma este como la mayor.

Tabla 10. Resultados de C.B.R. suelo natural y modificado.

	DENSIDAD(g/cm ³)	CBR
Suelo natural	2,14	32
0,25 Kg/m ³	2,14	34
0,5 Kg/m ³	2,14	34
1 Kg/m ³	2,12	47

⁷Fuente: el autor

Compresión Inconfinada

En la figura 25, se presentan los resultados del ensayo de compresión simple de una probeta tallada de una muestra en bloque, una muestra del mismo suelo natural conformada en laboratorio y las muestras conformadas en laboratorio con las diferentes cantidades de aditivo. Para ver los datos de laboratorio del ensayo de Compresión Inconfinada del suelo con aditivo, ver anexo: Compresión Inconfinada en muestras de suelo. I.N.V. E - 152.

⁷Resultados finales de la densidad máxima seca y CBR en suelo natural y modificado.

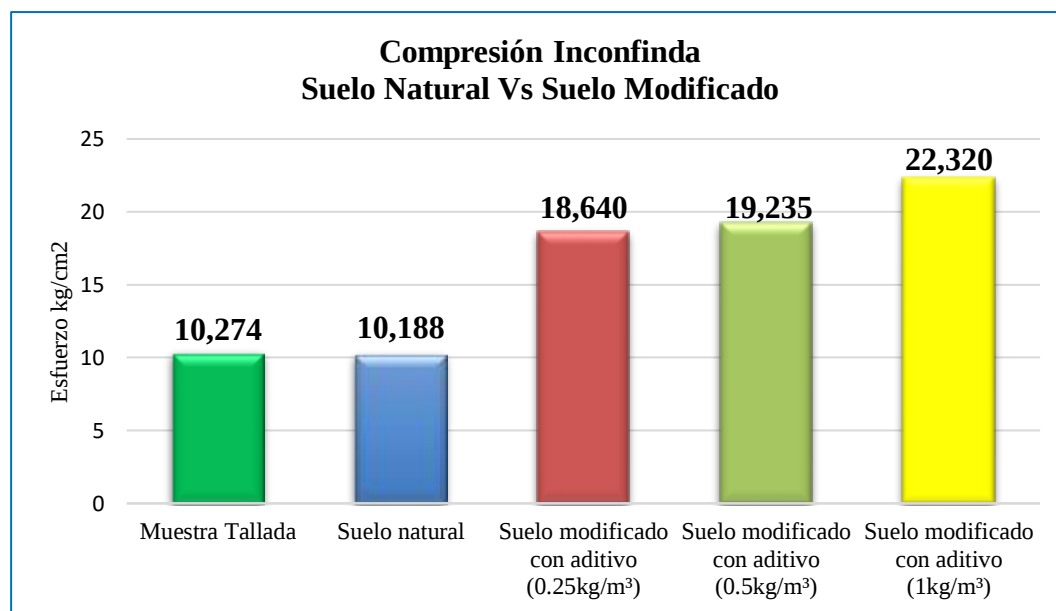


Figura 25. Comparación de la Compresión Inconfinada del suelo natural vs suelo modificado

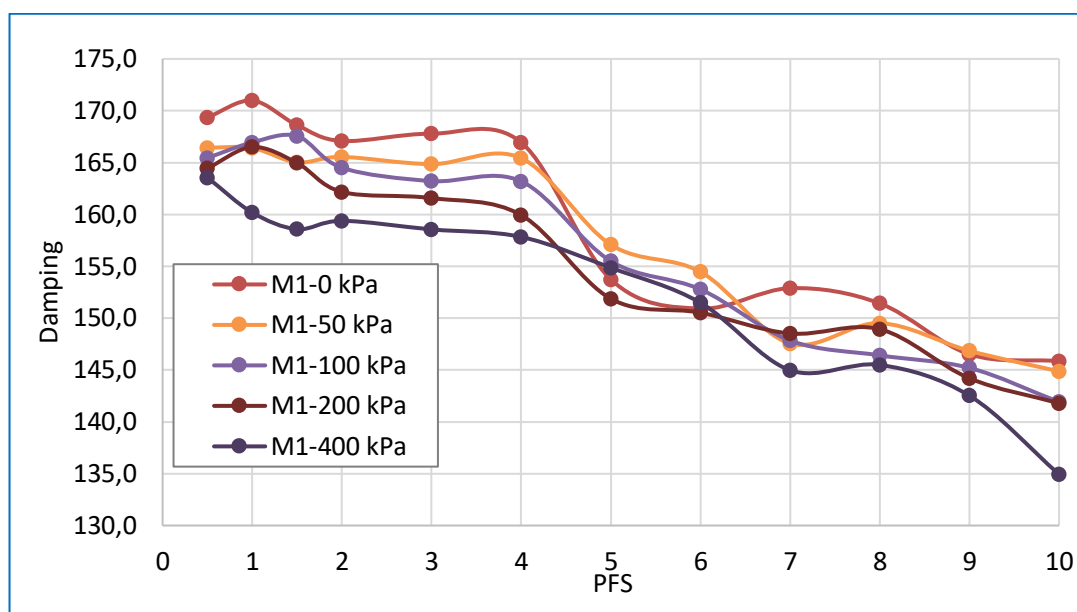
Fuente: el autor

En la figura 25, se observa que el uso del estabilizante en el suelo natural tiene un gran impacto de manera mecánica a la hora de resistir esfuerzos, aumentando su capacidad de carga por unidad de área, respecto al suelo natural con 1Kg/m^3 de estabilizante se incrementa en un 119,1%, con una cantidad de $0,5\text{kg/m}^3$ de aditivo es del 88,8% y con $0,25\text{ kg/m}^3$ del 82,9%.

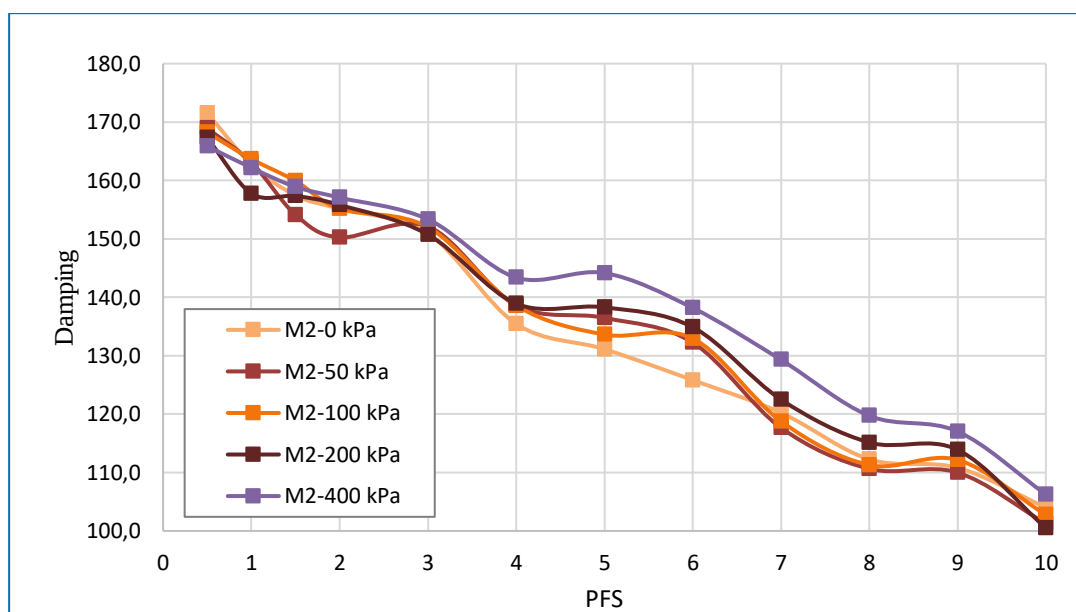
De los resultados, se puede inferir que el uso del estabilizante ayuda a mejorar la capacidad de resistir esfuerzos con respecto al suelo natural, siendo la muestra de suelos estabilizado con 1kg/m^3 el que tuvo un mayor incremento en la resistencia, con las cantidades de aditivo de $0,25\text{ kg/m}^3$ y $0,5\text{ kg/m}^3$ la resistencia a esfuerzo bajaría un 16,5% y 13,8% respectivamente, con relación al 1kg/m^3 de aditivo.

Columna resonante

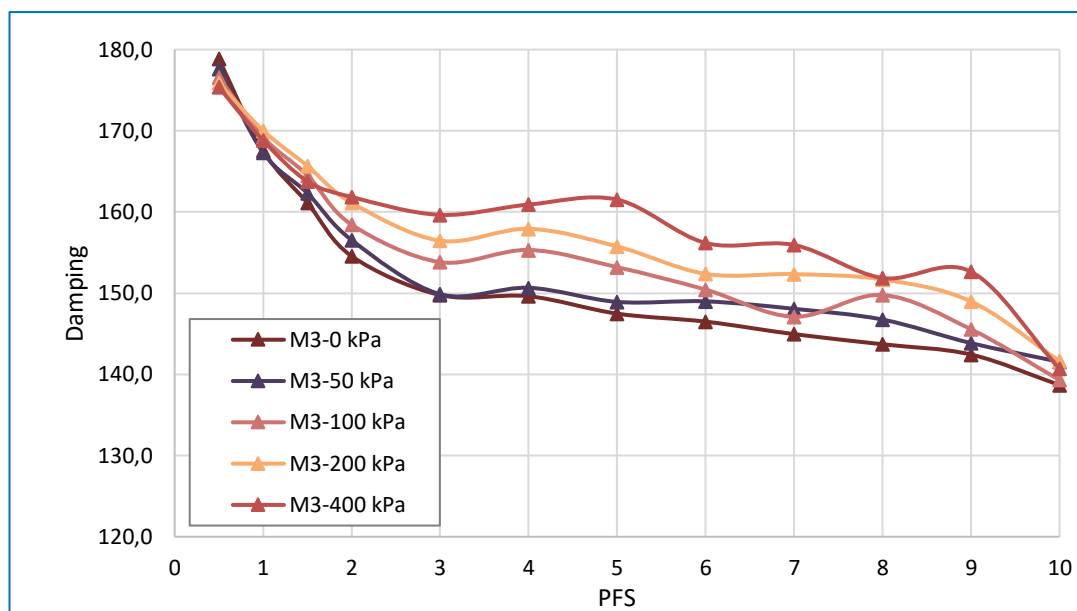
De las pruebas de columna resonante realizados a los especímenes de suelo natural y suelo modificado se obtuvieron resultados que se presentan a continuación con su respectivo análisis.



(a)



(b)



(c)

Figura 26. Gráficas de Amortiguamiento vs PFS en los suelos analizados

(a) Suelo Natural, (b) Suelo modificado al 0.5kg/m³, (c) Suelo modificado al 1.0kg/m³.

Fuente: el autor

En las gráficas de la figura 26, podemos intuir el efecto que produce el aditivo en el suelo respecto al amortiguamiento. En suelo natural se tiene que el amortiguamiento promedio es de 165.9; para el suelo modificado con una cantidad de 0.5% de aditivo el amortiguamiento promedio es de 168.4, en donde la variación del amortiguamiento inicial no es tan marcada como, para la muestra de suelo con un porcentaje de modificador al 1.0% en donde el amortiguamiento promedio esta alrededor 170. Claramente se evidencia el efecto del modificador en el suelo, el cual se manifiesta incrementando la rigidez del suelo, esto teniendo en cuenta que el amortiguamiento está relacionado con la matriz de la masa de suelo y la rigidez, este incremento es desfavorable para el suelo de subrasante ya que en vías terciarias la subrasante está sometida directamente a las solicitaciones del tránsito lo que la hace más susceptible a fisurarse prematuramente.

El valor máximo del amortiguamiento del suelo natural tiene valores máximos de 169 mientras que los suelos modificados con porcentajes de 0.5% y 1.0% presenta valores máximos de 172 y 179 respectivamente, los cuales afirman que el efecto es desfavorable.

La Figura 27, se presenta la frecuencia respecto al esfuerzo de corte a una presión de 200 MPa para el suelo natural y el suelo tratado con modificador.

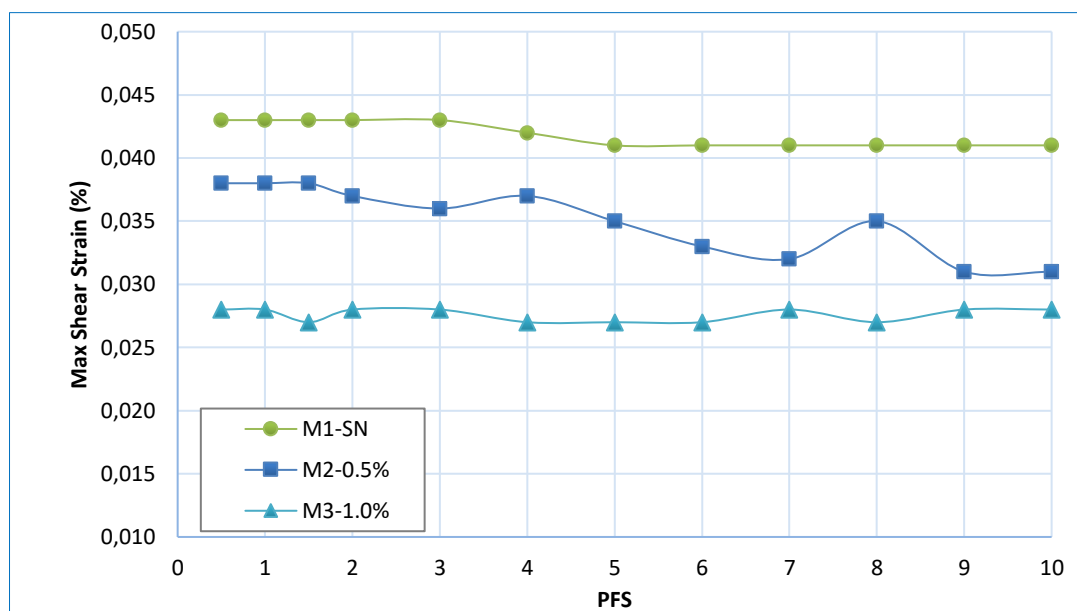


Figura 27. Gráfica de los esfuerzos cortantes máximos Vs PFS

Fuente: el autor.

En la gráfica de la figura 27, podemos apreciar para el primer modo de vibración del sistema de Columna resonante, que para la muestra de suelo natural (M1-SN), la deformación cortante presenta una leve disminución conforme se va incrementando los PFS (Percent Full Scale, 1pfs=0.023 N m, unidades de torque). Para la muestra tratada con 0.5% de modificador (M2-0.5kg/cm³), se evidencia la disminución de la deformación cortante máxima y para la muestra tratada con 1.0% de modificador (M3-1.0kg/m³), la deformación máxima, permanece relativamente constante. Lo que nos permite evidenciar que la muestra M3, presenta un

incremento en la rigidez del material. Esto hace que, a pequeñas deformaciones el material tenga una tendencia ser menos susceptible a cambios de amplitud del corte cíclico en el equipo de columna resonante.

Se puede evidenciar que, el suelo estabilizado con las dos cantidades de 0.5kg/m^3 y 1.0kg/m^3 , el esfuerzo cortante máximo disminuyo considerablemente 10% y 33% respectivamente, valores que indican un efecto negativo del agente modificador haciendo el suelo más susceptible a deformación por cortante.

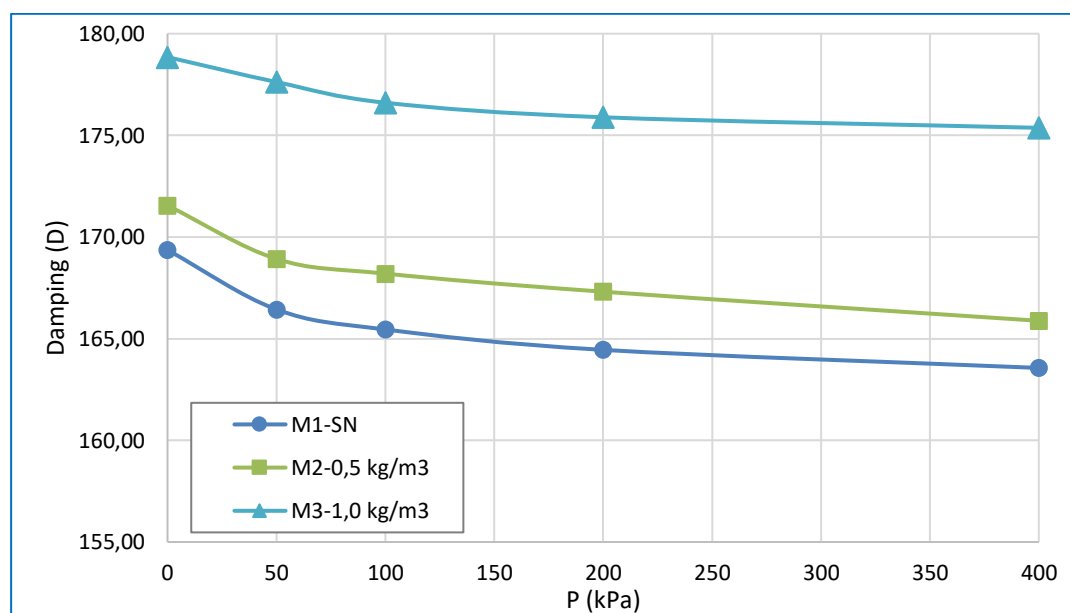


Figura 28. Gráfica variación del amortiguamiento (D) Vs confinamiento (P)

Fuente: el autor

En la figura 28, podemos evidenciar que en principio el modificador tiene un impacto considerable en el incremento del amortiguamiento, siendo más significativo para la muestra de suelo estabilizada con 1.0kg/m^3 , a sí mismo conforme se incrementa el confinamiento, todos los especímenes presentan una disminución en el amortiguamiento con tendencias bien

definidas y casi constantes para las muestras analizadas en la columna resonante. Al presentar menor amortiguamiento, en general es un reflejo claro del incremento en la rigidez del suelo.

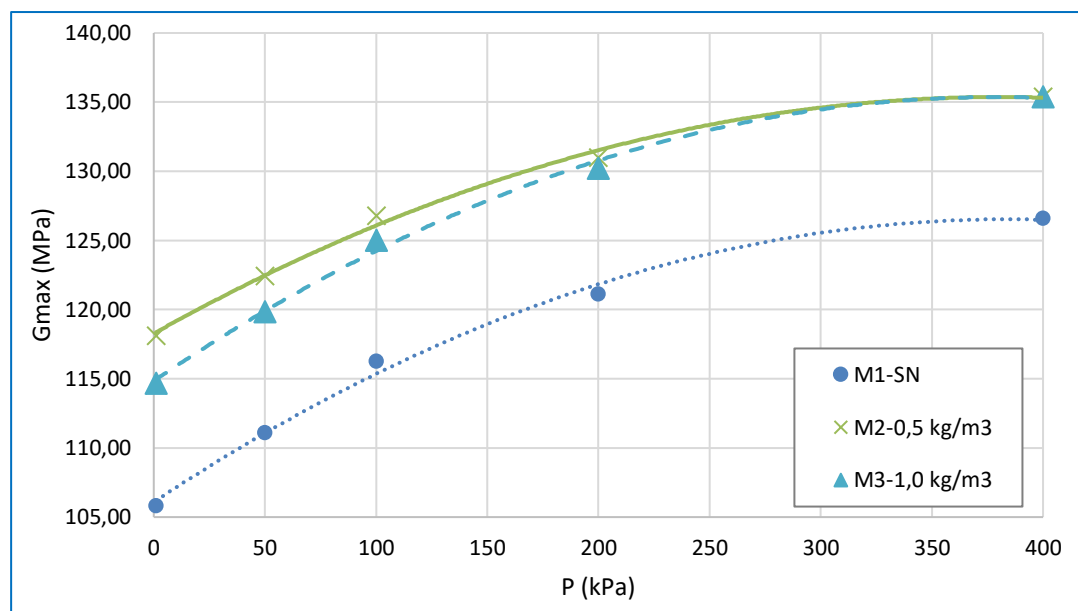


Figura 29. Variación del Gmax con el Confinamiento

Fuente: el autor

En la figura 29, podemos apreciar que con el incremento del confinamiento, el módulo de corte máximo (G_{max}), tiene un incremento tanto en la muestra de suelo natural como en las muestras tratadas con el modificador, independientemente de las cantidades adicionadas, además el G_{max} del suelo tratado con una cantidad de $0,5\text{kg/m}^3$ presenta un incremento alrededor del 1,1% respecto al suelo sin tratar, mientras que el suelo tratado con una cantidad del $1,0\text{kg/m}^3$ de aditivo, el G_{max} presenta un crecimiento menor que la muestra modificada con $0,5\text{ kg/m}^3$, en los confinamientos iniciales. Sin embargo conforme se incrementa el confinamiento el G_{max} de los suelos modificados comienzan a tomar valores de G_{max} similares, con esto podemos intuir que a grandes confinamientos la cantidad de aditivo que se adiciona es indiferente, lo que finalmente dan como resultado un incremento global en la

rigidez del suelo. así mismo podemos evidenciar que el incremento de la cantidad de aditivo de $0,5\text{kg/m}^3$ a 1.0kg/m^3 presentan incrementos del módulo de corte en valores pequeños.

La influencia del aditivo en los suelos en el G_{max} , se puede avaluar a partir de los parámetros de mejor ajuste de las curvas de regresión de potencia de la figura 25, (Pineda, Colmenares y Hoyos, 2014).

$$G_{max} = A(p')^B \quad \text{Ecuación 6}$$

Se determinan los parámetros A y B de la ecuación, en donde el parámetro A puede relacionarse con los valores de G_{max} a presiones de confinamiento muy bajas y b se puede asociar con la pendiente de la curva de regresión de potencia. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Modelos de parámetros A y B para el suelo natural y suelos modificados.

Muestra	A	B	R ²
M1-SN	104,040	0,0274	0,8322
M2-0,5 kg/m ³	116,550	0,0209	0,8259
M3-1,0 kg/m ³	112,860	0,0254	0,8274

Fuente: el autor

Los valores de la constante A variaron de 104, 040 para la muestra de suelo natural (M1-SN), hasta valores de 116,55 y 112, 860 para las muestras de suelo modificado M2 - 0.5kg/m^3 y M3 - 1.0kg/m^3 respectivamente. De esto podemos evidenciar que, al adicionar el suelo con la cantidad de $0,5\text{kg/m}^3$, el aditivo presenta efectos mayores en el módulo de corte sobre el suelo que para el incremento de 1.0kg/m^3 , en donde la constante A tome un menor valor.

El parámetro B para los suelos modificados, toman valores de 0.0209 y 0.0254, que representan una disminución respecto a el parámetro B de 0.0274 del suelo natural, esta variación indica que el suelo modificado fue menos susceptible a la aplicación de tensiones. Esto sugiere que el suelo modificado es un material más rígido que el suelo natural.

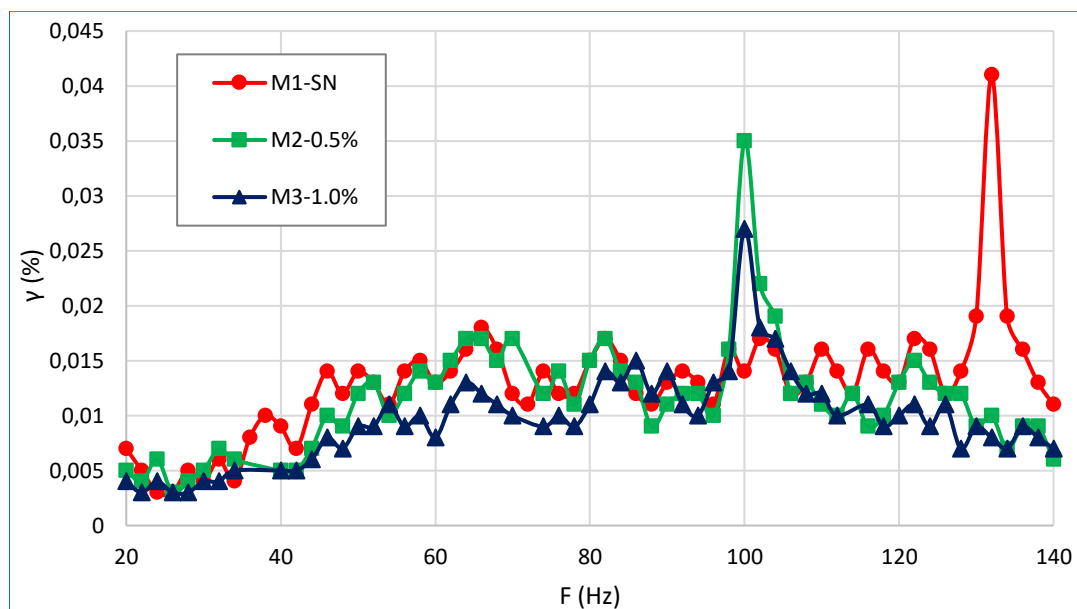


Figura 30. Frecuencia Vs Esfuerzo Cortante (%) – P 200 MPa

Fuente: el autor

De la figura 30, relaciona la frecuencia de resonancia para los especímenes a una presión de confinamiento de 200 MPa. En principio, la disminución de esto, nos indica que dentro del sistema entre la columna resonante y el suelo vibra más rápido alcanzando la resonancia más rápidamente.

Así, se puede apreciar que la frecuencia natural del suelo sin aditivo es de 132 Hz, con un módulo de corte de 0.041%, para los suelos con 0.5% y 1.0% de cantidad de aditivo, el módulo de corte disminuye significativamente a 0.035% y 0.022% respectivamente con una frecuencia de 100Hz claramente se evidencia la respuesta dinámica del suelo al ser

modificado, presentando efectos negativos indicando incrementos de la rigidez del suelo, convirtiéndolo en un suelo susceptible a fisuramiento al ser sometido a bajas deformaciones.

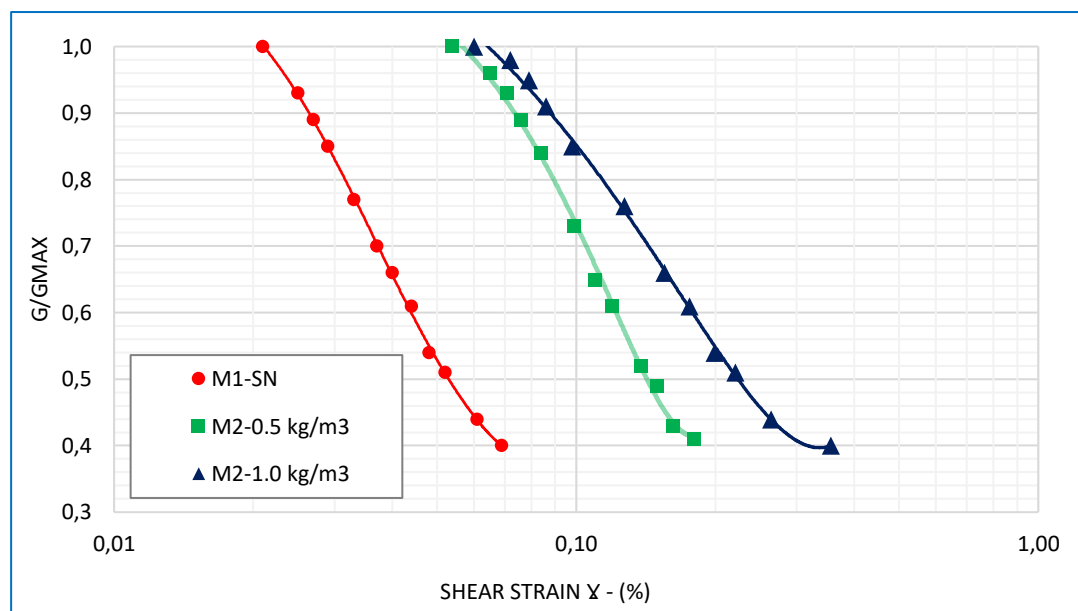


Figura 31. Curvas de Degradación del Módulo

Fuente: el autor

En la figura 31, podemos apreciar las curvas de degradación del módulo que se obtuvieron de los ensayos de columna resonante, realizados al suelo natural y los suelos modificados al 0.5kg/m^3 y 1.0kg/m^3 . Una vez normalizados los módulos de corte, determinamos las curvas de degradación del módulo, en las que podemos apreciar el efecto en los módulos de corte G del modificador. En los suelos modificados M2 – 0.5kg/m^3 y M3 – 1.0kg/m^3 , presentan un distanciamiento considerable respecto a la curva de degradación del suelo en condiciones naturales, lo que nos indica que los suelos modificados presentan mayores deformaciones que es claramente el efecto que ocasiona el modificador. Por otra parte, el incremento en el módulo de corte y la disminución del módulo G , tiene relaciones directas en el incremento de la rigidez del suelo, y se debe al aumento entre los contactos

intergranulares. Sin embargo, la muestra M3-1.0kg/m³, presenta una curva de degradación menos pronunciada lo que nos lleva a considerar que al suelo es conveniente realizar pruebas de imágenes SEM, con el fin de analizar los efectos del modificador en la microestructura.

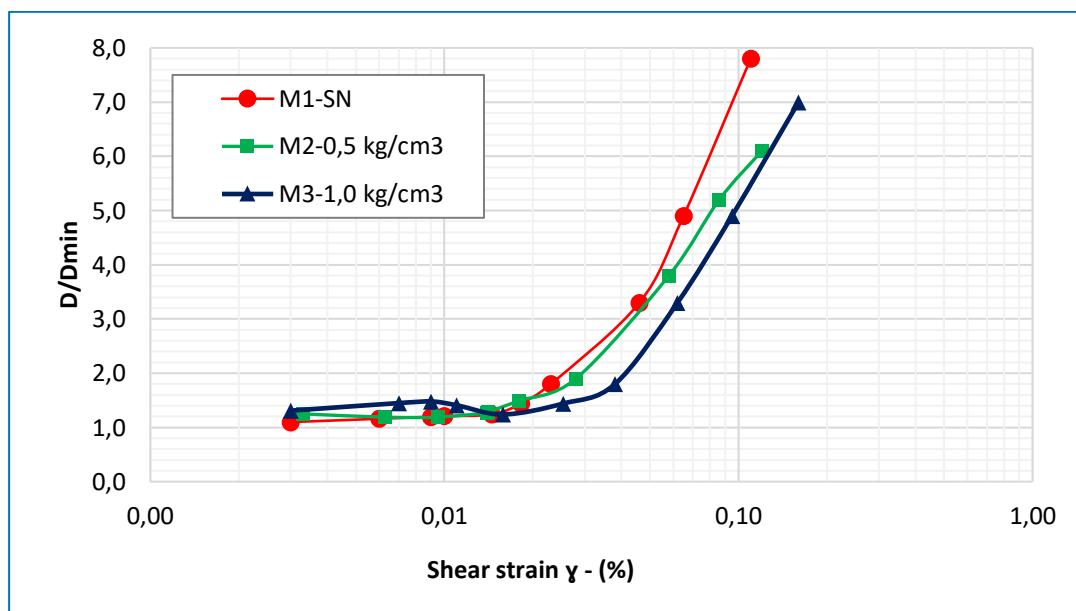


Figura 32. Relación de amortiguamiento Vs esfuerzo cortante

Fuente: el autor

En la figura 32, se presenta el amortiguamiento respecto a esfuerzos cortantes de los tres especímenes ensayados. La muestra de suelo natural y la muestra con una cantidad de aditivo de 0.5 kg/cm³, la relación de amortiguamiento a bajos esfuerzos cortantes es similar, mientras que la muestra mejorada con 1.0 kg/cm³ presenta un leve crecimiento de la relación de amortiguamiento. Las muestras modificadas con 0.5 y 10 kg/cm³, la relación de amortiguamiento se incrementa hasta llegar a valores que tiende a ser constante, esto nos permite inferir que la cantidad de aditivo que requiere el suelo es de 0.5 kg/cm³, cantidades mayores del producto no tienen mayor efecto en el suelo y solo influenciaría en la parte económica de la modificación.

14. CONCLUSIONES

- Los resultados de caracterización obtenidos clasifican el suelo como una Arcilla de alta plasticidad, cohesiva, con una resistencia en estado seco de alta a muy alta, altamente susceptible al agua, esta arcilla presenta una relación de soporte de C.B.R. clasificada como buena y una resistencia a la compresión de 10.2 kg/cm^2 , lo que permite definir que este suelo en estado natural y con una humedad óptima es resistente, presentando un buen comportamiento como suelo de Subrasante, con el inconveniente que ante cambios de humedad se convierte en un suelo muy débil e inapropiado para tal fin.
- La modificación del suelo de los tres especímenes se realizó siguiendo las recomendaciones del fabricante, apoyados en algunos documentos de países que cuentan con lineamientos sobre el tema, debido a que, en Colombia, aún no existe normativa sobre la modificación de suelos con aditivos a base de polímeros. Por lo tanto, es estrictamente necesario contar con un documento que recopile información sobre suelos estabilizados, con experiencias en nuestro país, tanto en laboratorio como el seguimiento en campo y estandarizar procesos de modificación que permitan tener control de los procedimientos de modificación en laboratorio, en campo y el seguimiento de la efectividad de los.
- De los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, se pudo determinar que el aditivo tiene efectos beneficiosos en el suelo tanto en los parámetros índice, disminución de la susceptibilidad al agua, incremento de resistencia bajo carga puntual y permite obtener mejores densidades. Así mismo se pudo determinar que el suelo modificado requiere de una mayor cantidad de humedad para pasar de un estado plástico a un estado líquido lo que para el caso de carreteras sin pavimentar es muy beneficioso.

- En las muestras modificadas, se evidencia que el aditivo tiene efectos en el comportamiento dinámico como respuesta a las vibraciones producidas por cargas cíclicas, presentando variaciones claramente apreciables en la velocidad de corte, módulos de rigidez y en el amortiguamiento.
- El objetivo de estudiar el comportamiento a pequeñas deformaciones en las pruebas de Columna resonante, los análisis realizados permitieron determinar que el suelo mejorado presentó incrementos en el amortiguamiento y su módulo de corte (rigidez), lo que hace que el suelo se vuelva más frágil lo que implica que es altamente susceptible a fisuramiento por efectos de las sollicitaciones lo que desencadenaría deterioro y deformaciones de la subrasante.
- En los análisis, se observa que el cambio del módulo de corte en función de la deformación es rápido y con cambios bruscos, lo que implica fisuración súbita en el suelo ante las cargas dinámicas que soporta el suelo de subrasante.
- Si bien los resultados obtenidos mediante la clasificación y ensayos convencionales nos dan idea que el modificador presenta beneficios en el suelo, las pruebas de Columna resonante indican lo contrario, ya que el suelo incrementa drásticamente su rigidez convirtiéndolo en un suelo frágil.
- El evaluar la resistencia de los suelos solo con pruebas de C.B.R., nos estaría llevando a subestimar los beneficios de los modificadores ya en principio las cargas que se aplican en este ensayo no representa la realidad de lo que ocurre en las carreteras en donde las cargas son dinámicas, y ante este comportamiento se puede presentar fisuración del suelo en muy corto tiempo permitiendo el ingreso de agua a la estructura del pavimento conllevando a deterioros acelerados con problemas de subrasante.

15. RECOMENDACIONES

- Se requiere en futuras investigaciones analizar la durabilidad de los modificadores, pues una de las debilidades de los polímeros es el tiempo de vida útil y ante todo cuando se encuentran sometidos a los agentes climáticos.
- En el mundo existen muchos aditivos químicos para la estabilización de suelos de carreteras, el principal inconveniente de la gran mayoría, es que no tienen estudios suficientes que respalden su eficacia en cuanto a cantidades y procedimientos respecto al tipo de suelo que se desea mejorar; son varias las marcas de ellos que se comercializan en Colombia, lo que hace necesario que las entidades a cargo de proyectos de infraestructura controlen el uso de este tipo de mejoradores en los proyectos viales y desarrolle lineamientos sobre el uso de estos, así mismo incentiven el uso de alternativas diferentes que sean amigables con el medio ambiente.
- Es importante tener en cuenta que los ensayos especializados como el de Columna resonante cuando se usan en materiales duros las pruebas no son tan fáciles de realizar ya que los datos que se obtienen son de alguna manera difíciles de interpretar por cuanto se recomienda realizar varias muestras para ensayar con el fin de poder tener panoramas más amplios y llegar a conclusiones más claras.
- Se recomienda realizar todos los ensayos pertinentes de laboratorio y con diferentes porcentajes para determinar el porcentaje óptimo de aditivo a utilizar ya que esto depende del tipo de suelo y las propiedades que se desee mejorar.
- Las muestras de suelo a mejorar se deben secar al aire, es conveniente realizar pruebas de materia orgánica por ignición al suelo a modificar con el fin de conocer los efectos del producto modificante ante la presencia de materiales orgánicos presentes en los suelos de subrasante.

- Para tener certeza de los tiempos de efectividad de los modificadores, es conveniente una vez adicionado el producto, dejar las muestras debidamente protegidas durante un periodo de 24 a 48 horas antes de realizar las pruebas, con el fin de lograr que el aditivo sea absorbido por el suelo, así mismo dejar una cantidad de material necesario para realizar ensayos 8 días después de adicionado el modificador ya que en la presente investigación se determinó que después de un periodo de 7 días los resultados varían respecto a las pruebas realizadas al suelo modificado 48 horas después.

16. REFERENCIAS

- Agencia Nacional de Infraestructura. (2015). Plan maestro de transporte 2015-2035, El horizonte de Colombia: Vargas Lleras. Obtenido de Agencia Nacional de Infraestructura: <https://www.ani.gov.co/article/plan-maestro-de-transporte-2015-2035-el-horizonte-de-colombia-vargas-lleras-21832>
- Alcárcel, F., & Gómez, J. (2019). *Mapa Geológico de Colombia 2019 Escala 1:2 000 000*. Obtenido de Servicio Geológico Colombiano: <https://bit.ly/2UoZTQV>
- Borda Riveros, Y., & Aguilar Castañeda, C. G. (2016). *Revisión del estado del arte del uso de polímeros en la estabilización de suelos*. Obtenido de Repositorio Universidad Santo Tomas: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/3923/Bordayeraldin2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Camacho Tauta, J. F. (2011). *Evaluation of the small-strain stiffness of soil by nonconventional dynamic testing methods*. Obtenido de Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico: https://www.researchgate.net/publication/264862188_Evaluation_of_the_small-strain_stiffness_of_soil_by_non-conventional_dynamic_testing_methods
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2012). *Pasado, presente y futuro de la localidad de usme*. Obtenido de Camara de Comercio de Bogotá: https://issuu.com/ollaartistica/docs/camara_de_comercio_usme-todo
- Cepeda Gómez, D. I., & Arenas Lopez, L. B. (2010). *Caracterización dinámica de suelos; estado del arte e implementación del laboratorio*. Obtenido de Universidad Industrial de Santander: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/133501.pdf>

Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2016). *CONPES 3857*. Obtenido de Consejo Nacional de Política Económica y Social:

https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3857_RedTerciaria.pdf

Cruz, O. (2018). Entrevista Personal Ingeniero de planeación Localidad Usme.

D4015-15. (2016). *Modulus and damping of soils by fixed-base resonant column*.

Das, B. (1993). *Principles of Soil Dynamics*. Boston: PWS-KENT Publishing Company.

Díaz Rodríguez, J. A. (2005). *Dinámica de Suelos*. México: Limusa.

Drnevich, V. (1978). *Recent Developments in Resonant Column Testing*. Obtenido de Civil Engineering Database: <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0046565>

El Espectador. (10 de junio de 2015). *Colombia, entre los países con peores carreteras de Latinoamérica*. Obtenido de El Espectador:

<https://www.elespectador.com/noticias/actualidad/colombia-entre-los-paises-con-peores-carreteras-de-latinoamerica/>

Fredlund, & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Soilvision*, 521-532.

García, J. (s.f.). *Diseño y construcción de pavimentos*.

García Castillo, X. (2015). *Comparación de los efectos de diferentes métodos de estabilización de subrasantes en arcillas bogotanas*. Obtenido de Repositorio Universidad de los Andes:

https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor_de_tesis/web/?SessionID=L1Rlc2lzXzIwMTUyMDEvNzU2My5wZGY%3D

García Quistián, J. A. (s.f.). *Diseño y construcción de pavimentos*. Obtenido de Instituto Tecnológico de Tijuana:

https://www.academia.edu/28491163/Generalidades_de_los_Pavimentos_docx

Garnica Anguas, P., Pèrez Salazar, A., Gómez López, J., & Obil Veiza, E. (202). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres*. Obtenido de Instituto Mexicano del Transporte:

<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt201.pdf>

Herrera Rojas, R. (2014). *Efecto del cemento Portland tipo I, como estabilizante del material granular de la cantera el guitarrero para bases de pavimentos rígidos*. Obtenido de Repositorio Universidad Nacional de Cajamarca:

<http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/644/T%20666.94%20H565%202014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

IDEAM. (s.f.). *Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca Alta del Río Tunjueki*. Obtenido de IDEAM:

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+CLIMATICA+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>

Instituto Español del cemento y sus aplicaciones. (2008). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Madrid: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.

Instituto Mexicano del Transporte. (2014). *Comportamiento dinámico de suelos no saturados y su aplicación a las vías terrestres*. México: Instituto Mexicano del Transporte.

Instituto Nacional de Vías. (2012). *Normas de ensayo de materiales para carreteras: Sección 100*

- *suelos*. Obtenido de Instituto Nacional de Vías:

<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/2740-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-version-pdfsept14/file>

Instituto Nacional de Vías. (2012). *Normas de ensayo de materiales para carreteras: Sección 200*

- *Agregados Petreos*. Obtenido de Instituto Nacional de Vías: <https://bit.ly/3bubJAe>

Ishihara, K. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. Oxford Engineering Science Series.*

Obtenido de

[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50946447/Ishihara.pdf?1482054718=&response-content-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50946447/Ishihara.pdf?1482054718=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DIshihara.pdf&Expires=1599491590&Signature=bEV-Rt5-IPSeVvFHfV~RNBFknBVafJw3hWG44Oa-xhDQeyD5--8NVIZPh6ZzGjnCNTysrj~NqzElxiM0sNK-ncm9BbF)

[disposition=inline%3B+filename%3DIshihara.pdf&Expires=1599491590&Signature=bEV-Rt5-IPSeVvFHfV~RNBFknBVafJw3hWG44Oa-xhDQeyD5--8NVIZPh6ZzGjnCNTysrj~NqzElxiM0sNK-ncm9BbF](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50946447/Ishihara.pdf?1482054718=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DIshihara.pdf&Expires=1599491590&Signature=bEV-Rt5-IPSeVvFHfV~RNBFknBVafJw3hWG44Oa-xhDQeyD5--8NVIZPh6ZzGjnCNTysrj~NqzElxiM0sNK-ncm9BbF)

Jones, R. (1958). Medición in situ de las propiedades dinámicas del suelo mediante métodos de vibración. *Geotechnique*, 8(1), 1-21.

Khoury, N. (1984). *Dynamic properties of soils*. Syracuse University.

Latifi, N., Safuan, A., Siddiqua, S., & Zaimi, M. (2016). Strength measurement and textural characteristics of tropical residual soil stabilised with liquid polymer. *ELSEVIER*, 46 - 54.

Lopez Lara, T., Hernandez Zaragoza, J. B., Horta Rangel, J., Coronado Marquez, A., & Castaño Meneses, V. M. (2010). Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 11(3), 159-168.

Lozano Rivas, W. A. (2016). *Suelos: Guía de prácticas simplificadas en campo y laboratorio*. Universidad Piloto de Colombia.

Merchan Infante, S. D. (2009). *Comportamiento de suelos expansivos en cimentaciones superficiales*. Obtenido de Repositorio Universidad de los Andes: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/11460/u470796.pdf?sequence=1>

Ministerio de minas y energías. (2005). *Geología de la sabana de Bogotá*. Bogotá. Obtenido de Ministerio de minas y energías.

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos*. Bogotá: Agora Editores.

Murcia López, D. A., & Perdomo Cruz, L. M. (2012). *Implementación del ensayo de columna resonante*. Obtenido de Repositorio Universidad Militar Nueva Granada: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/7191/MurciaLopezDerlyAndrea2012.pdf;jsessionid=B085D7617C6FDE48764D143280E23FA2?sequence=2>

Molina Cárdenas, J. L. (2019). Optimización del afirmado de la cantera La Campana incorporando TerraSil con propósito de pavimentación en los Jardines de Shangrila – Puente Piedra, Lima 2019

Pineda, J. A., Cruz, J. A., & Avila, P. (2017). Dynamic behavior of naturally desiccated clays via resonant column testing at constant water content conditions. *ASCE*, 533- 542. Obtenido de Repositorio: <http://hdl.handle.net/11634/19728>

Pineda, J. A., Colmenares, J. E., & Hoyos, L. R. (2014). Effect of fabric and wathering intensity on dynamic properties of residual and saprolitic soils via resonant Column testing. *Geotechnical Testing Journal*, 37(5), 805-813. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/276887011_Effect_of_Fabric_and_Weathering_

Intensity_on_Dynamic_Properties_of_Residual_and_Saprolitic_Soils_via_Resonant_Column_Testing

Puri , V. (1969). *Natural Frequency of Block Foundation under Free and Force Vibration*.
Obtenido de University of Roorkee.

Ramírez Triviño, V., & Hincapie, J. C. (2018). *Evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias*. Obtenido de Repositorio Universidad Libre:
<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17063/EVALUACION%20CBR%20DE%20SUB-BASE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rauch, A. F., Harmon, J. S., & Katz, L. E. (2002). Measured Effects of Liquid Soil Stabilizers on Engineering Properties of Clay. *Sage Journals*, 33-41.

Rodríguez Serquen, W. (2019). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica suelos y cimentaciones*.

Rosyidi, S., Nayan , K., Taha, M., & ISMAIL, A. (s.f.). Estimating G-Max & Field CBR of Soil Subgrade Using a Seismic Method. *NDT NET*.

Royidi, S., Taha, M., & Nayan, K. (2005). *Assesing In Situ dynamic stiffness of pavement layers with simple seismic test*. Obtenido de Proceeding of international seminar and exhibition on road construction.

Salas Mercado, D. (2018). *Estabilización de suelos con Adición de cemento y Aditivo Terrasil para el mejoramiento de la Base del Km 11+000 al Km 9+000 de la Carretera Puno - Tiquillaca - Mañazo*. Obtenido de Repositorio Universidad Andina Bestor Cáceres Velasquez:
<http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/1378>

Salgado, L. G. (s.f.). *Aproximación de la zonificación del CBR en la localidad de Chapinero*.

Obtenido de Repositorio Universidad Militar Nueva Granada:

<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/9929/SalgadoRivasLuisGabriel2013.pdf;jsessionid=A2B06B675EC19D66A8D6956BFC4DC1BF?sequence=2>

Secretaria Distrital de Planeación. (2011). *21 monografías de las localidades*. Obtenido de

Secretaría Distrital de Planeación.

Servicio Geológico Colombiano. (2014). *Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado*

a movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 153 – chita, departamentos de boyacá, arauca y casanare.. Bucaramanga.

Thomas, Ansu & Tripathi, Rajesh & Yadu, Laxmikant & Roy, S.. (2016). Soil stabilisation using Terrasil. 9. 1049-1052.

Vardanega, P., & Bolton, M. (2013). Stiffness of clays and silts: Normalizing shear modulus and

shear strain. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(9), 1575-1589.

Zea Constantino, C., & Rivera Constantino, R. (2004). *Notas Sobre los Fundamentos de la*

mécanica de los suelos. Obtenido de

<https://es.slideshare.net/AlahorCondoriMoya/esfuerzos-de-deformacion>