

Evaluación de la resistencia al cortante en condición no saturada en suelos residuales del batolito antioqueño estabilizados con cal viva utilizados en la construcción de terraplenes.

Germán Augusto Velásquez Narváez

Universidad de Medellín
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia
Medellín
2023

Evaluación de la resistencia al cortante en condición no saturada en suelos residuales del batolito antioqueño estabilizados con cal viva utilizados en la construcción de terraplenes.

Germán Augusto Velásquez Narvárez¹

Trabajo de grado para optar al título de
Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia

Director
PhD. Hidalgo, César Augusto

Universidad de Medellín
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia
Medellín
2023

¹ Ingeniero Civil del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Especialista en Geotecnia y estabilidad de Taludes de la Universidad de Medellín.
Candidato a Magister en Ingeniería Civil

DEDICATORIA

A Isabel Cristina Gómez mi esposa, Santiago Velásquez mi hijo, María Emma Narváez mi madre y José Amadeo Velásquez mi padre por su amor y comprensión durante el tiempo de la realización de esta maestría.

AGRADECIMIENTOS

Cesar Augusto Hidalgo, mi director de tesis, por el tiempo dedicado para esta investigación y sus valiosos aportes teóricos y prácticos para el desarrollo de la tesis.

A la empresa CIVILC S.A.S por permitir el desarrollo experimental de la investigación en su laboratorio, al igual que las personas que laboran allí, que garantizaron siempre su buena disposición.

Luz Marcela Restrepo, docente de la Universidad de Medellín, por su disposición incondicional para para resolver las inquietudes de los métodos estadísticos desarrollados en la investigación.

También quiero agradecer a la Universidad de Medellín, por mi formación académica, y a todos los profesores que me brindaron su conocimiento en el desarrollo de la maestría.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	10
2	JUSTIFICACIÓN	12
3.	MARCO DE REFERENCIAS CONTEXTUALES	13
4	MARCO TEÓRICO	19
4.1	Estabilización de suelos con cal.....	19
4.2	Resistencia al cortante de suelos	23
4.3	Resistencia al cortante de suelos no saturados	26
4.4	Succión en los suelos.....	28
4.5	Estructura de terraplén	33
4.6	Método de equilibrio Límite para evaluación de taludes de terraplén.....	34
4.7	Métodos estadísticos	38
5	METODOLOGÍA	42
5.1	Fase I: Determinación experimental	42
5.1.1	Suelo batolito antioqueño (limo Vegachí)	43
5.1.2	Cal viva (óxido de calcio)	43
5.1.3	Métodos de experimentación	44
5.2	Fase II: Análisis de resultados	49
5.3	Fase III: Aplicación	49
6	RESULTADOS Y ANALÍISIS	50
6.1	Resistencia a la compresión no confinada	52
6.2	Ensayo de corte directo condición CD.....	60
6.3	Ensayos de succión	67
6.4	Ensayos de corte directo no saturados	68
6.5	Aplicación caso real de terraplén	71
8.	REFERENCIAS	78
ANEXOS		83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Métodos de análisis de estabilidad de taludes.</i>	36
Tabla 2 <i>Ficha técnica de Cal viva</i>	44
Tabla 3 <i>Resultados Clasificación Suelo Batolito Antioqueño</i>	51
Tabla 4 <i>Resistencia a la compresión del suelo en estado natural compactado a diferentes densidades.</i>	52
Tabla 5 <i>Diseño de experimentos variables fijas e independientes</i>	53
Tabla 6 <i>Resultados de la Validación del Modelo</i>	59
Tabla 7 <i>Resultados comparativos q_u naturales y tratados con cal al 2%.</i>	60
Tabla 8 <i>Variables definidas para el ensayo de corte directo CD</i>	61
Tabla 9 <i>Resultados de ensayo de corte directo saturado, temperatura de 22°C y 40°C.</i>	62
Tabla 10 <i>Resultados de pruebas de Bondad y ajuste (Test Shapiro).</i>	63
Tabla 11 <i>Resultado de prueba F, comparación de las variables cohesión natural (C_n) y cohesión tratada con Cal Viva al 2% (C_t)</i>	64
Tabla 12 <i>Resultado de Prueba F, Comparación de las Variables ángulo de fricción natural (F_n) y ángulo de fricción con cal viva al 2% (F_t)</i>	64
Tabla 13 <i>Variación de los parámetros de resistencia naturales y tratados con cal viva.</i>	67
Tabla 14 <i>Parámetros de resistencia no saturados</i>	69
Tabla 15 <i>Parámetros de resistencia al corte utilizados en el modelo terraplén.</i>	72
Tabla 16 <i>Resultados de modelación con volúmenes de suelo.</i>	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Comparación de los resultados del factor de seguridad del talud por diferentes métodos.	22
Figura 2 Envolvente de falla	23
Figura 3 Resistencia pico y residual de un suelo.....	25
Figura 4 Angulo de fricción pico y residual	26
Figura 5 Curva característica de succión en el suelo.....	31
Figura 6 Rango de medidas de succión.	32
Figura 7 Envolvente extendida de Fredlund de resistencia al cortante para suelos no saturados	27
Figura 8 Capas que conforman un terraplén	33
Figura 9 Paralelismo de las fuerzas entre dovelas.	35
Figura 10 Ilustración método de dovelas.....	35
Figura 11 Falla de un muro de contención por estabilidad global	37
Figura 12 Distribuciones de probabilidad de mayor uso	41
Figura 13 Fallo de resistencias a la compresión no confinada.....	47
Figura 14 Esquema de terraplén	50
Figura 15 Proctor modificado y estándar del suelo de Batolito Antioqueño.	51
Figura 16 Determinación del porcentaje de cal viva para el suelo del batolito antioqueño, ASTM D-6276.....	51
Figura 17 Comportamiento a la resistencia a compresión no confinada Limo Batolito antioqueño a 22°C de curado y 7 días de curado.	54
Figura 18 Resistencia a compresión no confinada Limo Batolito antioqueño a 40°C de curado y 7 días de curado	54
Figura 19 Diagrama de caja y bigotes de incidencia de la densidad en la Resistencia a compresión no confinada (q_u).....	56
Figura 20 Diagrama de caja y bigotes de incidencia de % de Cal viva en la Resistencia a compresión no confinada (q_u).....	56
Figura 21 Diagrama de caja y bigotes de incidencia de la temperatura de curado en la Resistencia a compresión no confinada (q_u).....	57
Figura 22 Gráfico de interacción resistencia a la compresión no confinada (q_u), densidad seca (ρ) y porcentaje de cal adicionado al suelo del batolito antioqueño.....	57
Figura 23 Gráfico de interacción q_u , (ρ) y % de Cal para temperatura de 40°C.....	58

Figura 24 Gráfico de contorno de evaluación ρ , % cal, $T^\circ 40^\circ\text{C}$, T_c 7 días y respuesta de qu..	58
Figura 25 Imagen de corte directo del suelo natural.....	61
Figura 26 Comparativo cohesión (kPa) del suelo natural y suelo tratado con cal viva al 2%. ...	65
Figura 27 Comparativo ángulo de fricción ($^\circ$) del suelo natural y suelo tratado con cal viva al 2%.	66
Figura 28 Variación de la cohesión del suelo tratado con cal viva y natural vs % de humedad de compactación.....	66
Figura 29 Curvas de retención de agua para suelo natural y tratado con cal viva.	68
Figura 30 Cohesión en condición saturado y no saturado	70
Figura 31 Ángulo de fricción en condición saturado y no saturado.....	70
Figura 32 Modelo terraplén suelo natural	72
Figura 33 Modelo terraplén suelo tratado saturado	73
Figura 34 Modelo terraplén suelo no saturado	73
Figura 35 Variación de volúmenes según suelo, condición y altura de terraplén	75

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Resultados de compresión no confinada de diseño de experimentos.....	83
Anexo 2 Resultados estadísticos compresión no confinada.	91
Anexo 3 Resultados de Corte directo suelo del batolito antioqueño en estado natural.	91
Anexo 4 Resultados de corte directo de suelo del batolito antioqueño tratado con cal viva.....	91
Anexo 5 Datos de succión para curvas de retención	93
Anexo 6 Resultados corte directo no saturado	94
Anexo 7 Datos de modelación de terraplén.....	94

RESUMEN

El objetivo de esta tesis es evaluar la resistencia al cortante no saturada en suelos del batolito antioqueño estabilizados con cal viva utilizados en la construcción de terraplenes, este trabajo investigativo se llevó a cabo por medio de la implementación de tres fases y estado del arte que aporten los antecedentes respecto a la estabilización de suelos con cal y el comportamiento en terraplenes. *Fase I*, por medio de determinación experimental se realizó una serie de ensayos de laboratorio al suelo del batolito antioqueño en estado natural y tratado con cal viva, para determinar la incidencia de la cal viva inicialmente en el parámetro de resistencia a la compresión no confinada variando la densidad de compactación, temperaturas y tiempos de curado, demostrando estadísticamente la mejora de la resistencia del suelo; se procedió a definir cuál es el porcentaje de cal viva en el cual sus características de resistencia geomecánica presentan un aumento considerable, comparado con la resistencia a la compresión no confinada del suelo en estado natural; una vez identificado el porcentaje de cal, se realizaron ensayos de corte directo determinando los parámetros de resistencia al corte cohesión y ángulo de fricción en condiciones saturadas con la caja inundada y no saturada con la caja sin inundar, en condiciones de densidad de Proctor modificado y variando la humedad de compactación, los tiempos y temperaturas curado, que conllevaron al análisis de resultados. *Fase II*, se demostró estadísticamente que para el suelo del batolito antioqueño, la incidencia de la cal viva mejora en gran medida el parámetro de resistencia al corte cohesión y manteniendo estable el ángulo de fricción en las condiciones saturadas, seguidamente se determinó la succión del suelo en estado natural y tratado con cal viva y los parámetros de resistencia al corte en condición no saturado. *Fase III*, con los parámetros cohesión y ángulo de fricción del suelo en estado natural y tratado con cal viva en condiciones saturado y no saturado se realizó la estabilidad de un terraplén en el cual se evidenció el aumento de los factores de seguridad cuando se utilizó el suelo tratado con cal viva, y una reducción de volumen de material para la construcción de terraplén cuando se utiliza suelo tratado con cal viva en condiciones no drenadas. *Conclusiones*: El suelo del batolito antioqueño estabilizado con cal viva mejora en más del 100% el parámetro de resistencia al cortante cohesión, que al ser usado en una estructura de terraplén aumenta el factor de seguridad de estabilidad entre un 30% y 80% dependiendo de la altura del terraplén tanto en condiciones saturadas como como no saturadas, y una reducción en el volumen de suelo necesario para la construcción de un terraplén de 20% utilizando suelo estabilizado con cal viva al 2% en condiciones no utilizando suelo tratado con cal viva en condiciones no saturado.

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo socioeconómico de un país, depende en gran medida de la existencia y movimiento en la dotación de su infraestructura vial; ya que facilitan los intercambios comerciales e impulsan a la eficiencia técnica de su canasta de insumos; y para llevar a cabo éstas construcciones y/o mejoramiento de vías es necesario utilizar materiales que cuenten con las especificaciones técnicas requeridas por la normatividad; es muy dado que las obras por los movimientos o cortes de los suelos, generen materiales que no cumplen con los requisitos de calidad para la construcción y estabilidad de terraplenes, y una alternativa es utilizar métodos de estabilización que apoyen el mejoramiento de las características del suelo, aportando un menor impacto al medio ambiente y desincentivar el uso de fuentes no renovables.

Uno de los métodos de estabilización de las características de los suelos es la Cal viva; y el uso de la cal viva en Colombia es regulado por el (INVIAS, 2022) en la sección 600 – Estabilización de Suelos (INVIAS, 2022); y se ha venido incrementando notoriamente tanto en construcciones de vías de primera categoría como en vías terciarias; por lo que *“aumenta la resistencia mecánica, la trabajabilidad del suelo y reduce su potencial de hinchamiento”* (UMV, 2020), el incremento en suelos limo arcillosos en la capacidad de soporte (CBR), plasticidad y expansión principalmente; además los requisitos de calidad de suelos para terraplén exigidos por las entidades regulatorias como el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2022), son cada vez más rigurosos; esto con el fin de garantizar la construcción con las mejores condiciones técnicas de estas estructuras.

La cal viva se ha utilizado como producto estabilizador desde hace miles de años y se ha logrado demostrar que los suelos que no cumplen requisitos técnicos iniciales generados por las obras, utilizando este producto mejoran las características geomecánicas (Rivera, y otros, 2020).

Con la creciente utilización de la cal viva como agente estabilizador y de mejora, de las propiedades geomecánicas de los suelos, es importante conocer los cambios que sufren las diferentes propiedades de los suelos principalmente la resistencia al cortante; con base en lo anterior, nace el interés de evaluar dicho comportamiento, por lo que en este trabajo se realiza una evaluación del efecto de la cal viva en un suelo residual del batolito antioqueño, donde se revisará el efecto que presenta en la resistencia al corte en condiciones saturadas y no saturadas, siguiendo las diferentes metodologías de ensayos de laboratorio de las normas

nacionales INVIAS y la normas internacionales ASTM. Se verifica la estabilidad de un terraplén con los diferentes resultados obtenidos, mediante el diseño de experimentos de diferentes combinaciones de suelo y cal viva, se mide inicialmente la resistencia a la compresión no confinada, luego se determina el porcentaje de cal que presenta mejor efecto en la resistencia y se verifica estadísticamente; seguidamente se mide los parámetros de resistencia al corte cohesión y ángulo de fricción del suelo estabilizado con cal viva en el porcentaje que presentó mejor desempeño en la resistencia a la compresión no confinada, para después analizar los resultados obtenidos estadísticamente.

Para medir los parámetros de resistencia al corte, se realizaron ensayos de corte directo en condición no consolidado no saturado y consolidado drenado, con suelo natural y tratado con cal viva, con tiempos de curado y temperaturas de curado diferentes, y así hallar la envolvente del suelo extendida de Fredlund (Díaz Coral, 2018).

Se finalizó con un caso de aplicación de estudio de estabilidad de un terraplén, modelándolo con los parámetros de resistencia al corte del suelo del batolito antioqueño en condición saturada y no saturada en estado natural y estabilizado con cal viva, logrando conocer cómo se afectaron los factores de seguridad para diferentes alturas del terraplén y dimensiones de éste; y de esta manera, se definió en los casos analizados, la reducción de volumen de suelo tratado con cal viva comparado con el suelo en estado natural para la construcción del terraplén tomado como caso de estudio, y responder la pregunta de investigación ¿Cómo afecta y en qué porcentaje el contenido de cal viva el comportamiento de suelos residuales del batolito antioqueño compactados en condición no saturada en la estructura de terraplén?.

Para brindar la respuesta al problema planteado, el objetivo general de este trabajo es evaluar la resistencia al cortante en condición no saturada en suelos residuales del batolito antioqueño estabilizados con cal viva utilizados en la construcción de terraplenes; y para lograrlo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Determinar experimentalmente las propiedades de resistencia al cortante de suelos residuales del batolito antioqueño estabilizado con cal viva en condiciones no saturadas.
- Establecer relaciones entre los diferentes resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio entre suelos sin cal y con cal en condiciones no saturadas y el comportamiento como material para terraplenes.

- Evaluar el efecto de la estabilización con cal viva sobre terraplenes mediante el diseño y análisis de un caso de un terraplén construido con suelo residual del batolito antioqueño estabilizado con cal viva.

2 JUSTIFICACIÓN

Mejorar la estabilidad de las propiedades del suelo para que aumente la densidad, resistencia mecánica, disminuir porosidad y permeabilidad, es de las mayores retos que presentan los proyectos de vías a nivel tanto regional como país.

Las obras de infraestructura vial a nivel mundial siempre han requerido el consumo de materiales no renovables tales como los agregados pétreos y suelos. Desde tiempos antiguos para la construcción de vías los ingenieros seleccionaban los mejores materiales, que facilitarían el desarrollo de la construcción; y los suelos de baja calidad eran desechados o utilizados en otras actividades; y a medida que las obras de infraestructura vial exigían gran demanda de materiales de buena calidad, éstos a su vez iban presentando escasez y en la mayoría de los casos encareciendo su obtención. A raíz de esta problemática, se generó la necesidad de realizar estudios de las características de los suelos, con el propósito de demostrar que algunos materiales con características irregulares para su uso podían mejorarse en la obra en construcción, ya fuera realizando combinaciones con otros de mejores calidades o adicionando componentes que mejorarán las propiedades técnicas exigidas (Ankit Singh Negi, y otros, 2013).

En Sur América, en las últimas décadas, se ha logrado un desarrollo en la infraestructura vial (Chauvert, y otros, 2019), alcanzando la construcción de mega obras que incluyen viaductos de grandes dimensiones, túneles y vías de varias calzadas; que han demandado el uso de materiales no renovables que se encuentran en la zona o cerca de la zona de influencia de la obra. Todos los materiales deben de cumplir unos parámetros de calidad regulado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2022), para poder ser utilizados y dar cumplimiento su función según el diseño previamente establecido.

En los proyectos de construcción y mejoramiento de vías; en el caso en que los parámetros de calidad de los suelos no sean los exigido por el ente regulador; se puede recurrir indiscutiblemente a la mejorar de los materiales existentes; con el objetivo propio según (Rivera, y otros, 2020)“de generar estabilidad de las propiedades para que aumente la densidad, resistencia mecánica, disminuir porosidad y permeabilidad” (p. 4); lo que implicará muy seguramente mayores costos y encarecimiento de la construcciones y/o mejoras de vías.

En este sentido y como lo referencian (Moreno Natera & Villa San Miguel, 2020), dentro de la problemática más notable para la planificación y ejecución de los proyectos de construcción y/o mejoramiento de vías a nivel país y regional, no es solo el sobrecosto por el mejoramiento de las propiedades de los suelos, además lo son también los retrasos que se tienen en la ejecución de la obra por las esperas de seleccionar el material adecuado de fuentes lejanas, para por ultimo tener como solución que se debe aplicar en el proyecto con algún tipo aditivo y/o adición (Yepes Piqueras, 2021). Esto a su vez altera el cronograma de actividades de las obras de infraestructura (vías) y puede ocasionar multas por incumplir tiempos de entrega.

Actualmente en Colombia se rigen una serie de normatividad de control calidad para los materiales y procesos constructivos de proyectos de infraestructura de la Red vial; emitidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), principalmente. Cada vez estos entes presentan actualizaciones más exigentes y rigurosas en los requisitos de los parámetros de control.

En el caso de las construcciones de vías y específicamente en la conformación de terraplenes una de las grandes problemáticas de la escases de materiales en que cumplan en su totalidad la normatividad vigente (INVIAS, 2022), obedecen a motivos de agotamiento de zonas o minas para extracción de materiales no renovables, a acarreos a grandes distancias que encarecen el material a utilizar; incentivando al tratamiento de los suelos con productos que garantice el cumplimiento de la normatividad. (Di Sante, y otros, 2015).

Con el desarrollo de esta investigación, se pretende responder la pregunta ¿Cómo afecta y en qué porcentaje el contenido de cal viva el comportamiento de suelos residuales del batolito antioqueño compactados en condición no saturada en la estructura de terraplén?; con el propósito de contribuir con información útil de referencia para diferentes sectores productivos, de construcción y/o educación; frente a la incidencia de la cal en el suelo objeto de estudio.

3. MARCO DE REFERENCIAS CONTEXTUALES

Para establecer el eje temático de este trabajo, se considera que la estabilización de suelos se puede explicar cómo la alteración por métodos físicos, químicos, mecánicos y/o biológicos, de las propiedades del suelo con el fin de mejorar las características de resistencia en el tiempo y permeabilidad de éste. En ese sentido, el desempeño a largo plazo de cualquier

proyecto de construcción depende de la calidad y resistencia de los suelos subyacentes, (Rivera, y otros, 2020)

Los suelos inestables pueden crear importantes problemas para los pavimentos y/o estructuras; por lo tanto las técnicas de estabilización de suelos son necesarios para garantizar con mayor probabilidad el soporte de la carga de las estructuras, especialmente en suelos expansivos; aportar al ahorro económico del proyecto y mitigar los impactos ambientales; en comparación con el método de cortar y reemplazar el suelo inestable.

La cal es uno de los materiales más utilizados en la estabilización de suelos; se puede usar en diferentes formas dependiendo del tipo de aplicación, cal viva, como desecante de suelos muy húmedos; cal hidratada y lechada de cal para estabilización de suelos arcillosos de grano fino. Al aplicar la cal a suelos arcillosos inmediatamente sus partículas pierden poder de cohesión transformando al suelo plástico en un material más granular. Los registros de la utilización de cal datan de épocas tan antiguas como la civilización mesopotámica pasando por antiguo Egipto, imperio Romano y la antigua Grecia (McDowell, 1959). En la era moderna, la cal fue utilizada como agente estabilizador aproximadamente desde los años de 1924, su uso se generalizó a partir de la segunda guerra mundial como químico estabilizador de suelos para construcción de carreteras (Rivera, y otros, 2020).

En la mayoría de ocasiones los suelos no presentan las mejores características para su uso, por lo que se hace necesario contar con ciertos materiales y procesos que mejoren las características de estos y así obtener parámetros adecuados para ser usados, mejorar el comportamiento mecánico del suelo en estudio a través de estabilización con agentes químicos. (Parra Gómez, 2018), que basados para el caso de Colombia en las normas de (INVIAS) y los fundamentos teóricos de los diferentes tipos de ensayo que determinan los parámetros de resistencia.

Los estudios analizados; se basan en los diferentes tipos de suelos como caolín, naturales, arcillosos de varias regiones del país; los cuales se sometieron a diferentes tipos de ensayos tanto en estado natural como bajo la acción de agentes químicos como la cal, cemento, silicato de sodio, aceite sulfonado, ceniza volante; estas pruebas fueron de compresión y tracción, y criterios de módulo de elasticidad (rigidez), deformación máxima y esfuerzos máximos, al igual que las caracterizaciones y definiciones de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los suelos a analizar. Basados en esta misma fuente de información, se pudo establecer que la cal se utiliza como un excelente material estabilizador de suelos que presentan expansiones y contracciones altas, de actuación inmediata, mejorando las propiedades del suelo como la capacidad de carga, la reducción del índice de plasticidad, el aumento de CBR y el aumento de

la resistencia a la compresión a lo largo del tiempo. (Singh Negi et al., 2013). Los suelos tratados con cal tienden a mejorar su resistencia a la compresión a través del tiempo y con temperaturas de curado de 40°C (Bicalho, y otros, 2018), también se puede observar cómo los suelos tratados con cal adquieren una mejor densificación cuando se utiliza el método de amasado, aumentando hasta un 50% más de compactación que cuando se utiliza el método estático; también se demuestra la correlación de los resultados de compresión no confinada de las muestras tomadas durante la construcción del terraplén con curado acelerado y las tomadas a lo largo de los siete años de estudio del terraplén, en la investigación de Das y Otros (2021).

De igual modo, en el estudio sobre el rendimiento de suelos limosos tratado con cal bajo condiciones hidráulicas a largo plazo, el autor Le Rugino y otros, (2010); en contexto del desarrollo sostenible, fijan una creciente necesidad de recuperar y reutilizar los materiales que se encuentran en las inmediaciones de los proyectos de movimiento de tierras, cualquiera que sea su naturaleza o contenido de agua. En este sentido, la estabilización con cal es uno de los métodos más utilizados en la actualidad para superar los problemas relacionados con las malas características mecánicas de ciertos suelos, y conduce a través del desarrollo de procesos físico-químicos, la mejora de la trabajabilidad del suelo y de las propiedades mecánicas; y obtiene como resultados que el tiempo de curado, del impacto de diferentes condiciones hidráulicas como inmersión y circulación de agua en el desempeño mecánico de un suelo limoso tratado con cal, conduce a la formación de cantidades crecientes de compuestos cementosos y, por lo tanto, fortalece el suelo. También se evidenció que a mayor contenido de cal, mejor desempeño mecánico. Un contenido de cal (3%) mayor que el LMO (1% en el caso del limo de Jossigny) da lugar a una mayor cinética de precipitación de compuestos cementantes, mostrando la importancia de considerar la cinética dependiente del contenido de cal al momento de definir las condiciones para la precipitación de compuestos cementantes. El contacto con el agua condujo a una disminución significativa de la resistencia al corte, principalmente durante la fase de saturación. Una vez que el suelo estaba saturado, se encontró que el impacto del contenido de cal era menos significativo que durante el curado. El comportamiento mecánico del suelo expuesto a la circulación del agua está relacionado con la cantidad de agua que pasa a través del suelo y, por tanto, con su permeabilidad más que con la duración de la circulación del agua. Como resultado, la baja permeabilidad limita la disminución de la resistencia debido a la circulación del agua. En la práctica, dicha permeabilidad se puede obtener compactando el suelo ya sea bajo una alta energía o con un alto contenido de humedad. (Le Rugino, y otros, 2010)

Por otro lado, para la estabilización de suelos con cal, para Bao y otros, (2022), analizan en su investigación, que previamente se debe determinar el contenido de cal aproximado con el cual el suelo a tratar reacciona químicamente, el método para determinar este porcentaje de cal se realiza midiendo el pH de la mezcla del suelo con cal y agua, el pH de un suelo con características de limo arcilloso esta alrededor de 7.0; para garantizar una total reacción de la cal con el suelo se debe llegar a un pH de 12.4, cuando se llega a este valor de pH se puede realizar pruebas de resistencia tomando porcentajes de cal por debajo y por encima del obtenido como optimo en la reacción química.

Otra fuente, menciona que la estabilización de suelos con cal, ayuda considerablemente a la reducción de la porosidad, aumentando la compresión no confinada a medida que se reduce la porosidad de forma lineal. (Consoli, y otros, 2014).

Otra ventaja mencionada del tratamiento de suelos con cal, es el aumento en los parámetros de resistencia al corte tales como cohesión y ángulo de fricción en suelos con índice plasticidad y porcentaje de finos altos, en suelos de características de clasificación como limo, se puede observar como la cohesión del suelo tratado comparado con el suelo en estado natural aumenta más del 100%, mientras que el ángulo de fricción tiende a mantenerse estable, tal como se menciona (Shen, y otros, 2021).

En la publicación de estabilización de un suelo con cal y ceniza volante, mediante los ensayos de compresión y tracción, Parra Gómez (2018), logra concluir que independientemente del porcentaje de adición de cal viva, fue notorio el aumento de la resistencia en dichos cuerpos de prueba, lo que permite ratificar la versatilidad de este material en la estabilización de tipo química en los suelos con altos contenidos de arcilla.

No obstante, los parámetros de esfuerzo máximo y rigidez tienen una tendencia creciente para la cal viva, debido a la reacción que se genera con el agua disuelta (secado), lo que apoya la idea de que este material indiscutiblemente es una buena opción para el tratamiento de suelos, especialmente por su economía y facilidad en cuanto a su uso. (Parra Gómez, 2018)

La Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado, una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad; Llano y otros (2020), logran concluir que los materiales evaluados mostraron desempeños adecuados para objetivos de mejoramiento de propiedades ingenieriles del suelo, al presentar mayores resistencias mecánicas respecto al suelo natural, destacándose los productos de naturaleza puzolánica, por lo que no es posible una comparación directa per se entre estabilizantes químicos, dado que los efectos sobre las propiedades de un suelo dependen tanto de la tipología

del suelo como de la naturaleza química del estabilizante e, incluso, de las condiciones climáticas de la zona.

En este sentido, en cualquier proyecto de ingeniería vial que incluya el mejoramiento de suelos por técnicas de estabilización química, es necesario identificar los parámetros que se requieren mejorar en el suelo, es decir, el objetivo de la estabilización para proceder a seleccionar el tipo de producto químico a usarse para un propósito particular. (Llano, y otros, 2020).

En comparación de las alternativas de estabilización con cal, cemento, silicato de sodio y aceite sulfonado para vías terciarias con presencia de arcilla en la región de la Orinoquía, Álvarez Pizco y otros (2021), concluyen que la cal es el agente estabilizante que permite obtener mejores resultados en el comportamiento mecánico del suelo, ya que evaluando los resultados de los ensayos de CBR inalterado en cada uno de los tramos y realizando la comparación del suelo encontrado en condiciones naturales, se evidencia que promovió un aumento en el CBR del suelo y mejoró la capacidad de soporte respecto al CBR natural en un 370.11%.

Los mismos autores, Con respecto a los ensayos de compresión no confinada el estudio revelan que la cal es el estabilizante que presenta los mejores resultados en cuanto a esfuerzo máximo, causando un aumento del 81,48% respecto a los valores encontrados en el suelo natural, pese a que en los resultados obtenidos del ensayo de proctor modificado la cal produjo un aumento de la densidad seca en un 6.4% ocupando una tercera posición entre los agentes estabilizantes; el silicato de sodio fue la sustancia que manifestó un mejor resultado en su densidad seca máxima con un aumento de 12.58%.

Además ultimando, que la cal como agente estabilizante, favorece en mayor proporción las propiedades del suelo presente en la zona caso de estudio, es decir, presenta una mayor efectividad en el suelo tratado, superando los resultados obtenidos con las otras tres sustancias y promovió un aumento significativo de las propiedades actuales del suelo que conforma la vía caso de estudio, además, el costo para la estabilización por metro cuadrado es menor que estabilizar el suelo con cemento, silicato de sodio y aceite sulfonado. (Álvarez Pizco, y otros, 2021).

Makki-Szymkiewicz y otros (2015), también aseveran que en algunos casos el desempeño de una estructura de terraplén puede mejorarse en términos de estabilidad a través del tiempo con la utilización de un suelo tratado con cal.

En general, se puede ultimar que los diferentes estudios relacionados con el uso de la cal como agente estabilizador de suelos, destacan las bondades como el agente estabilizante por la rapidez en que mejora las características mecánicas del suelo, por la facilidad de su uso, con un

comportamiento de mejoramiento progresivo en el tiempo disminuyendo la plasticidad y optimando la resistencia (Consoli, y otros, 2014), como también lo menciona Alvarez Pizco y otros, (2021), el beneficio económico por su menor costo en relación con otros productos químicos.

Además los tipos de estudios analizados son investigaciones aplicadas a suelos arcillosos y expansivos, que abordan el problema de inestabilidad del terreno y donde revelan las fortalezas de la cal como uno de los agente estabilizador de las propiedades mecánicas, “que indican una ventaja significativa del drenaje cohesivo del suelo, lo que se traduce en un mayor ritmo de trabajo y una mayor independencia de las condiciones climáticas” (Połomski, y otros, 2022).

Teniendo en cuenta las bondades de la cal y sus tres efectos en la estabilización de suelos que los seca, modifica o estabiliza (Calcinor, 2020) y la facilidad de uso; como punto de ruptura se considera el objeto de estudio de la estabilización con cal en suelos limosos en condiciones no saturadas. Dado lo anterior, es posible plantarse como una cuestión interesante indagar en el Departamento de Antioquia la construcción y rehabilitación de las vías en la Concesión Magdalena 2 de una longitud de 144 Km, en donde se están conformando grandes longitudes de terraplenes, con materiales de la zona de corte y/o excavación, muchos de ellos presentan incumplimientos en algunos parámetros de calidad como plasticidad y parámetros de resistencia al cortante, para su utilización en la construcción de terraplenes; basados en los estudios de la empresa constructora; e hincados en este proyecto se realizará un estudio de la incidencia que tiene la adición de cal viva en un suelo residual, variando en porcentajes y comprobando bajo el ensayo de corte directo saturado y no saturado, calculando además la variación en los parámetros de comportamiento tales como la cohesión y el ángulo de fricción, revisar las características de compactación, pH, plasticidad y estabilidad de la estructura de un terraplén, modelado con los parámetros del suelo del batolito antioqueño en estado natural y el mismo suelo estabilizado con cal viva en el porcentaje definido después de la experimentación en el laboratorio de los parámetros de resistencia al cortante cohesión y ángulo de fricción en condiciones saturadas y no saturadas.

4 MARCO TEÓRICO

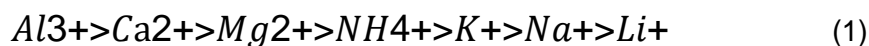
A continuación, se despliegan un conjunto de referencias conceptuales respecto a la resistencia al cortante en condición no saturada en suelos residuales del batolito antioqueño estabilizados con cal viva utilizados en la construcción de terraplenes, en los siguientes 6 ejes conceptuales: Estabilización de suelos con cal, método de equilibrio Límite para evaluación de talud de terraplén, resistencia al cortante de suelos, succión en los suelos, estructura terraplén, comprobaciones estadísticas.

4.1 Estabilización de suelos con cal.

Para la estabilización química de suelos de grano fino en campo, en ocasiones se utilizan aditivos, algunos de los más comunes son la cal, el cemento y la cal con ceniza muy fina. Las finalidades de estabilizar un suelo son, modificar el suelo, agilizar la construcción, mejorar la resistencia y durabilidad del suelo.

Los tipos de cal comúnmente utilizados para estabilizar suelos de grano fino son la cal hidratada con contenido alto de calcio $[Ca(OH)_2]$, cal viva calcítica (CaO), cal dolomítica monohidratada $[Ca(OH)_2 \cdot MgO]$ y cal viva dolomítica $[CaMg(CO_3)_2]$. La cantidad de cal utilizada para estabilizar la mayoría de los suelos suele estar en el intervalo de 5 a 10%. Cuando se agrega cal a suelos arcillosos, ocurren dos reacciones químicas puzolánicas: intercambio de cationes y floculación-aglomeración.

En las reacciones de intercambio de cationes y floculación-aglomeración, los Cationes monovalentes generalmente asociados con arcillas se reemplazan por los iones divalentes de calcio. Los cationes se pueden arreglar en una serie basada en su afinidad de intercambio:

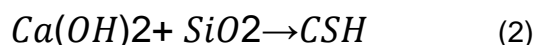


Donde:

- Al = Cation aluminio
- Ca = Cation calcio
- Mg = Cation magnesio
- NH = Cation amonio
- K = Cation potasio
- Na = Cation sodio
- Li = Cation litio

De acuerdo con la ecuación anterior, cualquier catión puede reemplazar los iones a su derecha. Por ejemplo, los iones de calcio pueden reemplazar iones potasio y sodio de una arcilla. La floculación-aglomeración produce un cambio en la textura de los suelos arcillosos. Las partículas de arcilla tienden a agruparse para formar partículas mayores, y en consecuencia a) disminuye el límite líquido, b) aumenta el límite plástico, c) se reduce el índice de plasticidad, d) se incrementa el límite de contracción, e) aumenta la trabajabilidad y f) mejora las propiedades de resistencia y deformación de un suelo.

La reacción puzolánica entre el suelo y la cal comprende la reacción entre la cal y la sílice y la alúmina del suelo para formar un material cementante. Una reacción de ese tipo es



Donde:

- CSH= Arcilla silíceas
- C=CaO
- S=SiO₂
- H=H₂O

La reacción puzolánica puede continuar durante mucho tiempo. Los primeros 2 a 3% de cal (con base en peso seco) afectan en gran medida la trabajabilidad y las propiedades del suelo (como la plasticidad). La adición de cal a suelos arcillosos también afecta sus características de compactación.

Por su parte, la resistencia a la compresión no confinada (q_u) de suelos de grano fino compactados a un contenido de humedad óptimo puede variar de 170 kN/m² a 2100 kN/m², dependiendo de la naturaleza del suelo. Con una adición de entre 3 a 5% de cal y un periodo de curado de 28 días, la resistencia a la compresión no confinada puede aumentar en 700 kN/m² o más.

La resistencia a la tracción σ_T de suelos curados de grano fino también aumenta con la estabilización con cal, y se tienen las siguientes relaciones, las cuales fueron determinadas según Tulloch, y otros, (1970) entre σ_T y q_u :

$$\sigma_T(kNm^2) = 47,54 + 50,6q_u (kN/m^2) \quad (3)$$

Donde σ_T es la resistencia indirecta a la tracción.

Thompson, (1966) proporcionó la siguiente relación para estimar el módulo elástico de suelos estabilizados con cal:

$$E_s(MNm^2)=68,86+0,124qu \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4)$$

Donde

- E_s : Modulo de elasticidad
- qu : Resistencia a la compresión no confinada

La relación de Poisson (μ) de suelos curados estabilizados con aproximadamente 5% de cal varía entre 0,08 y 0,12 (con un promedio de 0,11) a un nivel de esfuerzo de 25% o menos de la resistencia a la compresión última. Aumenta entre 0,27 a 0,37 (con un promedio de 0,31) a un nivel de esfuerzo mayor que 50% a 75% de la resistencia a la compresión última (Transportation Research Board, 1987). (Das, 2012)

El efecto estabilizador de la cal sobre un suelo se obtiene mezclándolo y compactándolo con cal viva o apagada y agua. Los suelos más adecuados son los de granulometría fina y notable plasticidad. Se emplea cal con una riqueza en CaO superior al 90%. Dependiendo del caso, se agrega 4-7% de cal apagada o del 2-5% de cal viva sobre el peso seco del suelo. Hay que proteger a los operadores si se emplea la cal viva, evitando el contacto con la piel. La mezcla se puede realizar "in situ" o en central. Algunos autores (Bouzá, 2003) diferencian entre la mejora y la estabilización de un suelo con cal en función de la ganancia mínima de resistencia a la compresión no confinada sobre el valor inicial del suelo de 350 kPa.

La cal viva (óxido de calcio), seca de forma efectiva la humedad del suelo por hidratación y evaporación al reaccionar de forma exotérmica. Se puede bajar entre un 2% y un 5% la humedad en función de la cal añadida y las condiciones del suelo, este proceso es inmediato. Otro efecto inmediato es una reacción rápida de floculación e intercambio iónico que modifica la granulometría, la textura y la capacidad del suelo, así como la propiedad de retener agua, a continuación se forman nuevos productos químicos mediante una reacción muy lenta de tipo puzolánico, elevándose el pH del suelo a valores en torno al 12,5. La sílice y la alúmina del suelo se combinan con la cal en presencia de agua para formar silicatos y aluminatos cálcicos insolubles, lo que supone una mejora de las características resistentes, así como una mayor estabilidad frente a las heladas. (Yepes Piqueras, 2021)

Las mejoras que se presentan en los suelos cuando son estabilizados con cal, son de efecto inmediato tales como una reducción en el Índice de plasticidad cambiando de un estado plástico a un estado más rígido y granulado, lo cual presenta beneficios en la última condición para su excavación, cargue, descargue, compactación y nivelación. La compactación mejora, al descender la densidad seca máxima y aumentar el contenido óptimo de agua, la trabajabilidad en obra es mejor. La capacidad de carga en la mayoría de los casos aumenta a las pocas horas el CBR aumenta entre 4 a 10 veces que un suelo no tratado con cal, mejorando rápidamente las condiciones de la vía para ser transitada, (Ankit Singh Negi, y otros, 2013).

Los métodos para evaluar la estabilidad de los taludes son diversos. Los de equilibrio límite están basados en el método de las dovelas, dividiendo la masa de suelo en dovelas o rebanadas. Un análisis de equilibrio límite permite obtener un factor de seguridad teniendo en cuenta los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla; una vez que se han determinado las propiedades de resistencia al cortante de los suelos y las propiedades geométricas del talud, se puede calcular el factor de seguridad (FS), ver Figura1, (Mesa Lavista, y otros, 2018).

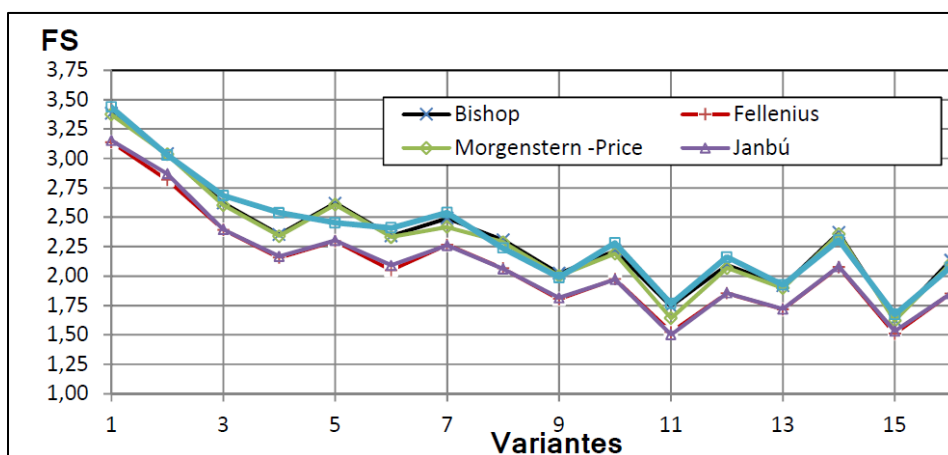


Figura 1 Comparación de los resultados del factor de seguridad del talud por diferentes métodos.

Nota. Tomado (Mesa Lavista, y otros, 2018)

La cal viva es un producto utilizado en la estabilización de suelos, permitiendo la compactación permanente de arcillas y tierras de alto grado de expansión formando una mezcla cementante natural, lo que permite obtener un incremento en su resistencia y capacidad de soporte, así como la disminución de sensibilidad al agua y a los cambios de volumen constantes. Tomado de (Calidra S.A. , 2020).

En la actualidad en el proyecto concesionado Magdalena 2 se está controlando la construcción de terraplenes con parámetros de cohesión y ángulo de fricción, cuales tienen una exigencia de $C \geq 10$ kPa y Ángulo de fricción $\geq 30^\circ$, encontrando que los suelos residuales que se encuentran en la zona (Vegachí-Antioquia) presentan valores de cohesión y ángulo de fricción por debajo de lo exigido, y se han encontrado que adicionando diferentes cantidades de cal se obtienen valores más altos de cohesión y fricción.

4.2 Resistencia al cortante de suelos

El círculo de Mohr se utiliza para representar o describir la resistencia al cortante de los suelos, utilizando la envolvente de falla Mohr-Coulomb, lo cual equivale a que una combinación crítica de esfuerzos se ha alcanzado. Los esfuerzos por encima de la envolvente de falla no pueden existir. En la práctica normal de ingeniería, generalmente, esta curva se define como una recta aproximada dentro de un rango seleccionado de esfuerzos Figura 2F, en el cual:

$$s = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (5)$$

Donde s = Resistencia al cortante, σ' = Esfuerzo normal efectivo, ϕ' = ángulo de fricción y c' = Cohesión (Suárez, 1998).

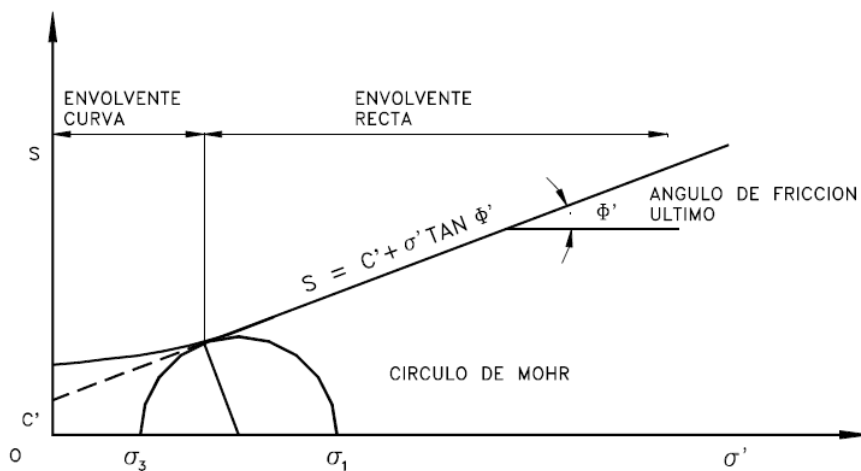


Figura 2 Envolvente de falla

Nota. Tomado (Suárez, 1998)

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física; coeficiente de rozamiento es igual a $\tan \Phi$. El ángulo de

fricción depende de varios factores, entre ellos algunos de los más importantes son el tamaño y forma de los granos, la distribución de los tamaños de los granos, permeabilidad (Facilidad de drenaje), presión normal o de confinamiento y la densidad. El ángulo de fricción es el resultado de la combinación de todos los factores. Por ejemplo, el ángulo de fricción es mayor al aumentar la densidad, pero si las presiones normales son muy altas, el ángulo de fricción tiende a disminuir. En arcillas, el ángulo de fricción depende de las condiciones de pre-consolidación. (Suárez, 1998).

La cohesión es la medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión. En suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero y a estos suelos se les denomina suelos no cohesivos (Suárez, 1998).

“En los suelos no saturados el agua en los poros produce un fenómeno de adherencia por presión negativa o fuerzas capilares. Esta cohesión aparente desaparece con la saturación.” (Suárez, 1998).

Una masa de suelo saturada consiste en dos fases distintas: el esqueleto de partículas y los poros entre partículas llenos de agua. Cualquier esfuerzo impuesto sobre el suelo es soportado por el esqueleto de partículas y la presión en el agua. Típicamente, el esqueleto puede transmitir esfuerzos normales y de corte por los puntos de contacto entre partículas y el agua a su vez puede ejercer una presión hidrostática, la cual es igual en todas las direcciones. Los esfuerzos hidrostáticos del agua se les denominan presión de poros.

Los esfuerzos efectivos son los que controlan el comportamiento del suelo y no los esfuerzos totales. En problemas prácticos el análisis con esfuerzos totales podría utilizarse en problemas de estabilidad a corto plazo y las presiones efectivas para analizar la estabilidad a largo plazo (Suárez, 1998).

En suelo parcialmente saturado, el agua en los espacios vacíos no es continua, y se tiene un sistema de tres fases, es decir, sólido, agua de poros y aire de poros. Por consiguiente, el esfuerzo total en cualquier punto en un perfil de suelo está formado por presiones intergranulares, presiones de aire de poro y presiones de agua de poros. (Das, 2012).

En un suelo parcialmente saturado, el agua en los espacios vacíos no es continua, y se tiene un sistema de tres fases, es decir, sólido, agua de poros. Por consiguiente, el esfuerzo total en cualquier punto en un perfil de suelo está formado por presiones intergranulares, presiones de aire de poro y presiones de agua de poros (Das, 2012).

La resistencia máxima o pico, es la resistencia a la corte máxima que posee el material que no ha sido fallado previamente, la cual corresponde al punto más alto en la curva esfuerzo-deformación, Figura 3 . El uso de la resistencia pico en el análisis de estabilidad asume que la resistencia pico se obtiene simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla. Sin embargo, algunos puntos en la superficie de falla han alcanzado deformaciones mayores que otros, en un fenómeno de falla progresiva y asume que la resistencia pico actúa simultáneamente en toda la superficie de falla puede producir errores en el análisis (Suárez, 1998).

La resistencia residual, es la respuesta al corte que posee el material después de haber ocurrido la falla. Skempton, (1964) observó que en arcillas sobreconsolidadas, la resistencia calculada del análisis de deslizamientos después de ocurridos correspondía al valor de la resistencia residual y recomendó utilizar para el cálculo de factores de seguridad, los valores de los parámetros obtenidos para la resistencia residual (ángulo de fricción y cohesión residuales). Figura 7.

Otro factor que determina las diferencias entre la resistencia pico y residual es la sensibilidad, la cual está relacionada con la pérdida de resistencia por el remoldeo o la reorientación de las partículas de arcilla (Suárez, 1998).

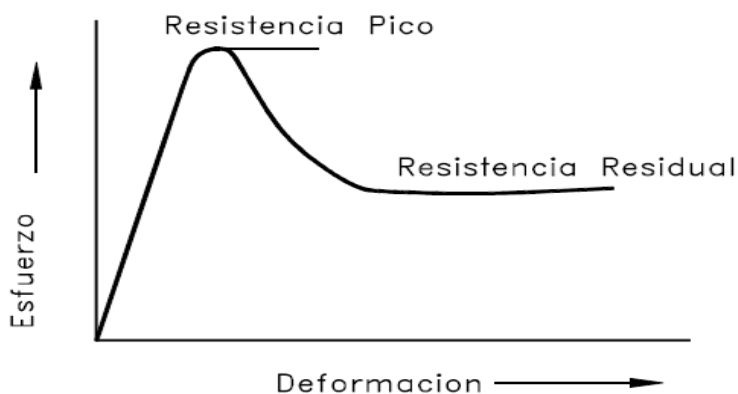


Figura 3 Resistencia pico y residual de un suelo.

Nota. Tomado (Suarez Diaz, 1998)

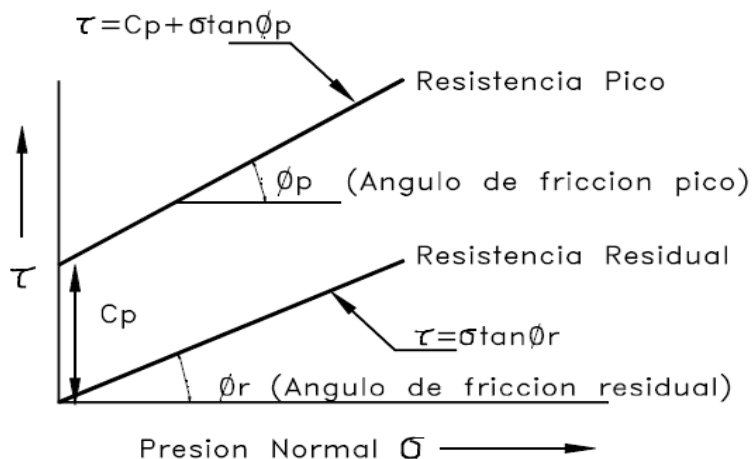


Figura 4 Ángulo de fricción pico y residual

Nota. Tomado (Suárez, 1998)

4.3 Resistencia al cortante de suelos no saturados

La resistencia al corte de los suelos parcialmente saturados o no saturados depende de la variación del contenido de humedad o el grado de saturación, el cual se representa por medio del parámetro denominado succión. La succión es una presión interna negativa que se genera en la estructura del suelo, producida por un fenómeno de capilaridad y por la concentración de sales en los vacíos. Se ha observado que la resistencia al corte crece directamente con la succión y que dicho crecimiento se produce hasta un valor máximo a partir del cual la resistencia comienza a disminuir hasta llegar al estado seco y perder el efecto de succión (Arango, y otros, 2019) (Chowdhury, y otros, 2016).

Muchos investigadores desde los años cincuenta hasta la actualidad han propuesto ecuaciones para representar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos no saturados. En la Ecuación 7 se puede observar la propuesta presentada por W Bishop (W. Bishop, 1959) donde se relacionan la resistencia al cortante, el esfuerzo efectivo normal y la succión y un parámetro que depende del tipo de suelo.

$$\sigma'_n = \sigma_n - u_a + x (u_a - u_w) \quad (8)$$

Donde:

- σ'_n = Esfuerzo efectivo. Es
- $(\sigma_n - u_a)$ = Esfuerzo neto.
- $(u_a - u_w)$ = Succión (La Cual se tratará en detalle en el capítulo 4.4).

- α = Parámetro de Bishop que depende del material.

Por otro lado, a finales de los años setenta Fredlund presentó una fórmula que incluye tres variables independientes y que es la base para muchas ecuaciones empíricas de resistencia al corte. Esta ecuación, basada en el criterio de falla de Mohr-Coulomb, es conocida como la forma extendida de Fredlund (Ecuación 8), ya que le agrega un término a la expresión de la Ecuación 5 que depende de la succión (Díaz Coral, 2018).

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (9)$$

Donde:

- u_a = Presión del aire en los poros del material.
- u_w = Presión del agua en los poros del material.
- ϕ^b = Ángulo que define el aumento de resistencia al cortante con el aumento de la succión.
- ϕ = Ángulo de fricción interna con el aumento del esfuerzo normal efectivo.
- c' = Cohesión efectiva

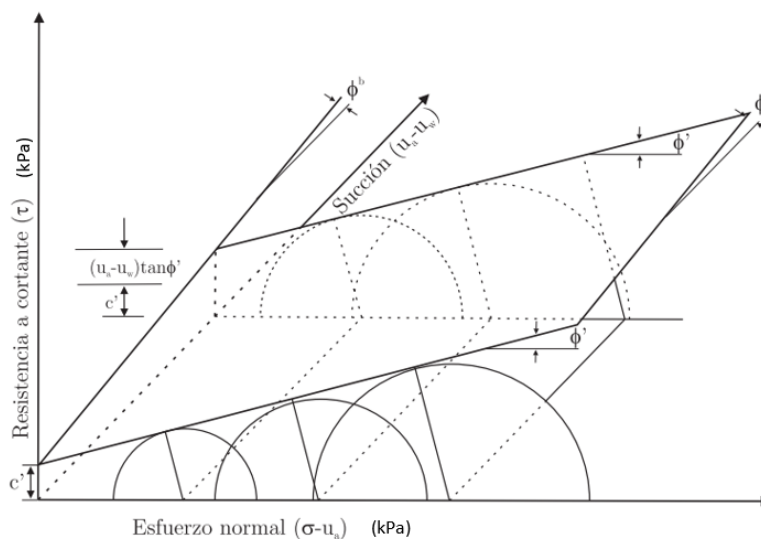


Figura 5 Envolvente extendida de Fredlund de resistencia al cortante para suelos no saturados

Nota. Tomada (Fredlund, y otros, 1978)

La determinación de los parámetros de la resistencia al cortante en condiciones no saturadas es compleja debido a la alta variabilidad de la succión con propiedades del suelo como la densidad y el nivel de esfuerzo (Fredlund, y otros, 1978) (Thomé Jucá, 1990), sin embargo en la literatura se encuentran varias propuestas metodológicas que permiten estimar los parámetros de forma aproximada (Bai, y otros, 2012) (Díaz Coral, 2018) (Patiño Restrepo, 2021) (Arango, y otros, 2019). La propuesta metodológica de Bai and Liu permite determinar los parámetros de resistencia al cortante usando ensayos de corte directo en condición no saturada (caja sin inundar) y la curva de retención de agua elaborada mediante el ensayo de papel filtro. Este tipo de procedimiento también ha sido utilizado por autores como (Arango, y otros, 2019) para suelos Colombianos.

El procedimiento descrito por Bai and Liu, como primera medida es utilizar el método del papel filtro para establecer la curva característica suelo-agua del suelo y posteriormente se realiza una serie de pruebas de corte directo convencionales para medir la resistencia al corte del suelo. La succión matricial del suelo en el momento de la falla se estima a partir de la curva característica suelo-agua basada en el contenido de agua del suelo analizado. El parámetro de resistencia al corte ϕ^b es igual al ángulo de fricción efectivo ϕ' cuando el suelo está cerca a la saturación, y ϕ^b disminuye a medida que el suelo se vuelve más seco. El método combinado propuesto por Bai and Liu puede ser una técnica práctica para analizar la resistencia al corte de suelos no saturados en términos de dos variables de estado de tensión independientes por que puede realizarse en la mayoría de los laboratorios geotécnicos (Bai, y otros, 2012).

4.4 Succión en los suelos

Hace un siglo, Edgar Buckingham presentó datos y una conceptualización teórica del movimiento de la humedad del suelo. Su trabajo constituye un hito en la historia de la física del suelo y, más en general, del movimiento de múltiples fases fluidas en medios porosos. A partir de los primeros principios, Buckingham formuló un modelo conceptual para dar sentido racional a las observaciones a largo plazo de la evaporación de las columnas del suelo. El centro de su modelo era la noción de un potencial capilar, la curva de retención de humedad del suelo y la conductividad hidráulica dependiente del potencial. Buckingham reconoció que mientras que la capacidad calorífica y la conductividad térmica eran independientes de la temperatura en la ecuación de calor de Fourier, en el caso de la humedad del suelo, la pendiente de la curva de retención de humedad del suelo (análoga al calor específico) y la conductividad capilar eran funciones importantes del potencial capilar. . Al señalar que las soluciones disponibles de la

ecuación diferencial lineal de Fourier no se aplicaban al movimiento de la humedad en los suelos, Buckingham se mostró escéptico frente a que el problema no lineal pudiera resolverse matemáticamente. Esta es quizás la razón por la que no presentó una ecuación diferencial parcial para el movimiento de la humedad del suelo. (Narasimhan, 2007)

La succión es uno de los conceptos más relevantes en el estudio de los suelos no saturados, su concepción se sitúa en las relaciones entre las fases del suelo que son líquida, sólida y gases, que en la mayoría de suelos, sería agua, las partículas de suelo y el aire; la succión es un concepto que se conoce en física desde principios del siglo veinte y está basado en la interfaz agua aire de los poros del suelo, en los que la formación de meniscos del agua genera por efecto de la tensión superficial unas fuerzas entre las partículas sólidas.

La succión que es cuantificada en términos de la humedad relativa es denominado succión total y tiene dos componentes una matricial y otra osmótica, la primera se refiere al componente de energía libre por efecto de la tensión superficial en los poros del suelo y la osmótica es la presión a la que debe someterse el agua químicamente pura para que esté en equilibrio a través de una membrana semipermeable con el agua del suelo y esta componente depende de las sales disueltas en el agua del suelo (INVIAS, 2022), la succión total es la suma de la osmótica y la matricial (Díaz Coral, 2018).

$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (6)$$

Donde:

Ψ = Succión total.

$(u_a - u_w)$ = Succión matricial.

u_a = Presión de aire en los poros.

u_w = Presión de agua en los poros.

π = Succión osmótica.

Una de las técnicas para determinar la succión en los suelos es el método del papel filtro; utilizada para obtener la curva característica de retención de agua del suelo analizado, es uno de los métodos más sencillos de usar y relativamente económico entre algunas de sus ventajas, aunado a esto al rango amplio de succiones que pueden ser medidas del orden de 10 a 100000 (kPa) teniendo definida la curva de distribución de poros del suelo Figura 7, se obtiene succión

osmótica y matricial en el rango de humedades cercana a la óptima de compactación modificada o estándar y en un solo ensayo es posible obtener muchos puntos de la relación saturación – succión en la trayectoria de humedecimiento, lo que se traduce en una curva característica con muchos datos, con una mejor aproximación del material; hay que tener en cuenta que es un método de laboratorio que requiere el uso estricto del procedimiento normativo (INVIAS, 2022), ya que es una forma de medición indirecta de succión y el papel utilizado es muy sensible a los cambios de humedad, este método proporciona una curva característica con muchos puntos para su ajuste y que puede perder precisión para valores de succión por debajo de los 10 kPa. (Díaz Coral, 2018).

Durante la obtención de las curvas características por medio del ensayo de succión con el método del papel filtro se debe realizar un ajuste a los datos obtenidos, para así lograr tener una tendencia adecuada, uno de los autores que presenta la fórmula de ajuste de más uso y que se trabajará en este trabajo es (Van Genuchten, 1980). Para la preparación de las muestras y la generación de las curvas características de los suelos se toma como referencia (Parra Obando, 2015).

Los métodos directos, miden la presión negativa del agua en los poros del suelo o controlan las presiones del agua y del aire en los poros, para obtener la succión. Los métodos indirectos determinan la succión basados en la condición de equilibrio de humedad del suelo, con medidas de: presión de vapor, contenido de humedad o propiedades físicas (conductividad térmica o eléctrica) de un medio poroso en equilibrio con el suelo (Fan, y otros, 2023).

La curva característica de succión en trayectoria de secado fue caracterizada por White, en la SWCC en términos del grado de saturación existen tres zonas claramente identificables, como se muestra en la Figura 6, la zona de efecto de borde, zona de transición y zona de saturación residual, y existen dos puntos característicos que marcan el límite entre cada capa, el valor de entrada de aire y el grado de saturación residual. (Meza, 2012)

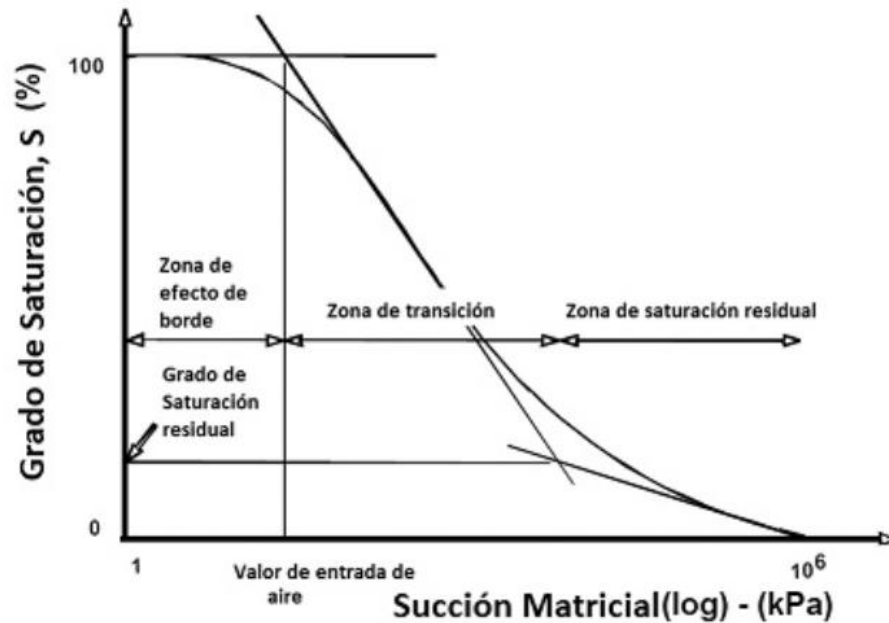


Figura 6 Curva característica de succión en el suelo.

Nota. Tomado (Meza, 2012)

Van Genuchten (1980), desarrolló una ecuación empírica para la curva característica, la cual es una función continua, con tres parámetros de ajuste. La expresión matemática del modelo se expresa de la siguiente forma:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (7)$$

Donde:

- α, n y m = Parámetros de ajuste
- ψ = Succión matricial del suelo en el punto de interés
- θ_s = Contenido de agua volumétrico saturado
- θ_r = Contenido de agua residual del suelo

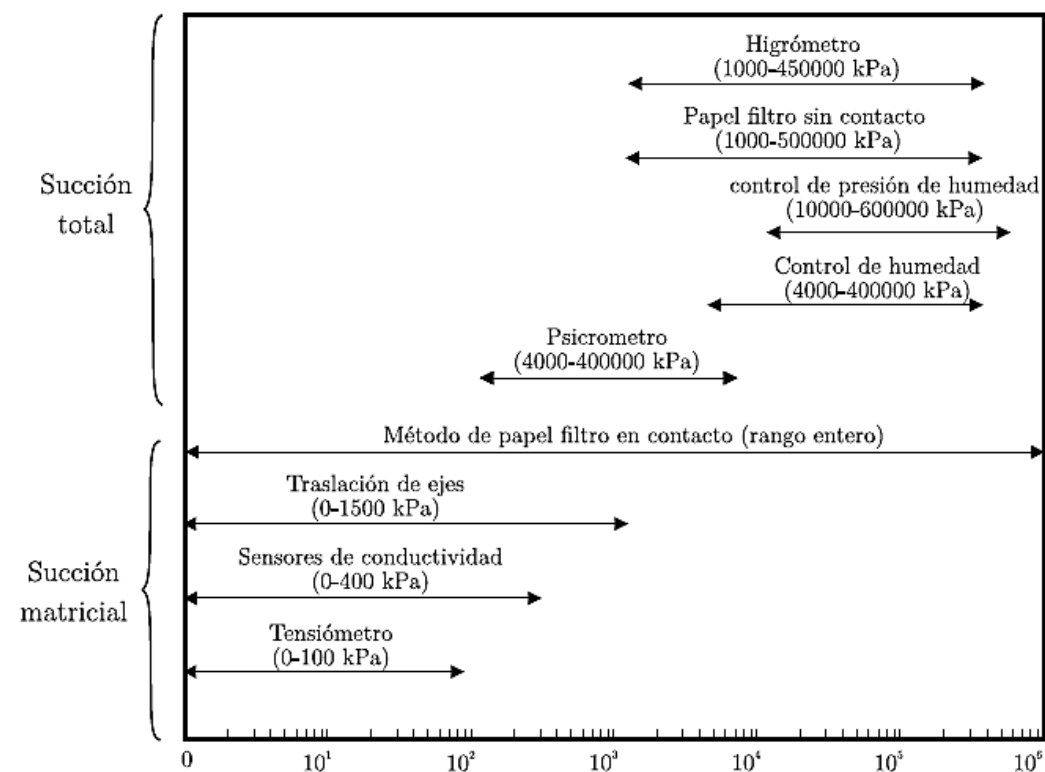


Figura 7 Rango de medidas de succión.

Nota. Tomado (Díaz Coral, 2018)

En la investigación presentada por (Patil, y otros, 2017) se presenta un aumento en la succión matricial que hace que el área de contacto humedecida entre las partículas del suelo pueda disminuir, por lo tanto existe una relación no lineal entre las curvas de retención de agua del suelo y la resistencia al corte del suelo a medida que cambia de estado saturado a no saturado.

En la investigación de (Songa, y otros, 2020), presenta cantidad de salida y entrada de agua intersticial en función del tiempo para un suelo de granito meteorizado y un suelo de lilita meteorizado. La presión de aire controlada aplicada a los suelos parcialmente saturados supera el valor de entrada de aire, que se define como la succión matricial en la que el aire comienza a infiltrarse en los poros más grandes del suelo. Por lo tanto, el agua de los poros se expulsa de las muestras de suelo, mientras que los poros se llenan de agua cuando se aplica presión. Estos procesos se denominan secado y humectación. En el proceso de secado, la salida de agua intersticial aumentó a medida que se incrementa la succión matricial, mientras que la entrada de agua intersticial aumentó con la disminución de la succión matricial en el proceso de

humectación. Una vez que se comprobó que la salida de agua se mantuvo en un cierto nivel de succión matricial, se aplicó el siguiente nivel de succión matricial. El proceso de humectación tuvo un tiempo de prueba más largo que el proceso de secado, posiblemente debido a la resistencia del agua, que resulta del aire atrapado en los poros durante proceso de secado. El tiempo experimental total para el suelo de lutita meteorizada fue más largo que el del granito, debido a la conductividad hidráulica más alta presentada por el granito meteorizado.

4.5 Estructura de terraplén

Un terraplén es un lleno que se realiza con suelo con el fin de elevar las cotas para seguir con las capas estructurales de un pavimento, se utilizan regularmente en zonas inundables o que tengan una topografía con depresiones que sea necesaria rellenar.

Las capas para la conformación de un terraplén son las siguientes según el Instituto nacional de vías INVIAS en el Art. 220.2.3 (INVIAS, 2022): Corona, cimiento, núcleo, espaldones; los cuales se deben de diferenciar bajo las características de la norma (INVIAS, 2022) Art. 220.

Figura 10.

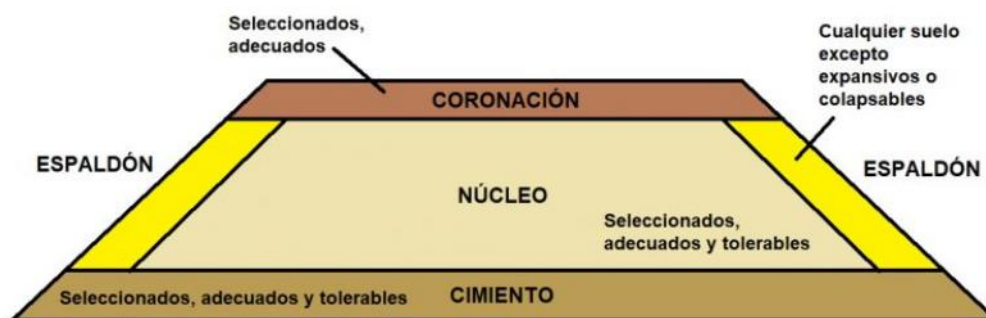


Figura 8 Capas que conforman un terraplén

Nota. Tomado (Yepes Piqueras, 2021)

Los terraplenes son estructuras muy susceptibles a problemas de deslizamientos y erosión debido a su bajo grado de cementación y a que generalmente su colocación genera una disminución del factor de seguridad del talud preexistente, por aumento de los esfuerzos actuantes (Yepes Piqueras, 2021).

4.6 Método de equilibrio Límite para evaluación de taludes de terraplén

El análisis de estabilidad de taludes permite determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud y la base para soportar los esfuerzos que pueden causar la falla por cortante y deslizamiento. Se asumen condiciones de equilibrio estático para una superficie de deslizamiento supuesta y se determina en esta el factor de seguridad. El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas de equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación. Tabla 1

El método que se utilizará para el análisis de estabilidad de los taludes del terraplén y factor de seguridad para el caso de aplicación de este trabajo es Método de equilibrio Límite y factor de seguridad por el método de Spencer,

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han mejorado los sistemas de Dovelas desarrollados a inicios del siglo XX. Generalmente, los métodos son de interacción y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión, (Suárez, 1998)

El Factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el coeficiente de amenaza frente a que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1927) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla; la mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de "equilibrio límite" donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie (Tabla 1).

Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del Factor de Seguridad.

Otro criterio, es el de dividir la masa a estudiar en una serie de tajadas, dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos, según (Suárez, 1998)

Método de análisis Spencer

El método de Spencer es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. El procedimiento de Spencer (1967) se basa en la suposición que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas con las otras, o sea, que tienen el mismo ángulo de inclinación Figura 2.

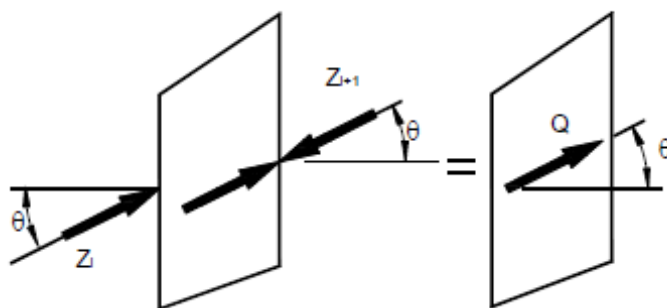


Figura 9 Paralelismo de las fuerzas entre dovelas.

Nota. Tomada (Suárez, 1998)

La inclinación específica de estas fuerzas entre partículas es desconocida y se calcula como una de las incógnitas en la solución de las ecuaciones de equilibrio. Spencer inicialmente propuso su método para superficies circulares pero este procedimiento se puede extender fácilmente a superficies no circulares.

Spencer plantea dos ecuaciones una de equilibrio de fuerzas y otra de equilibrio de momentos, las cuales se resuelven para calcular los factores de seguridad F y los ángulos de inclinación de las fuerzas entre dovelas θ (Suárez, 1998) Figura 3.

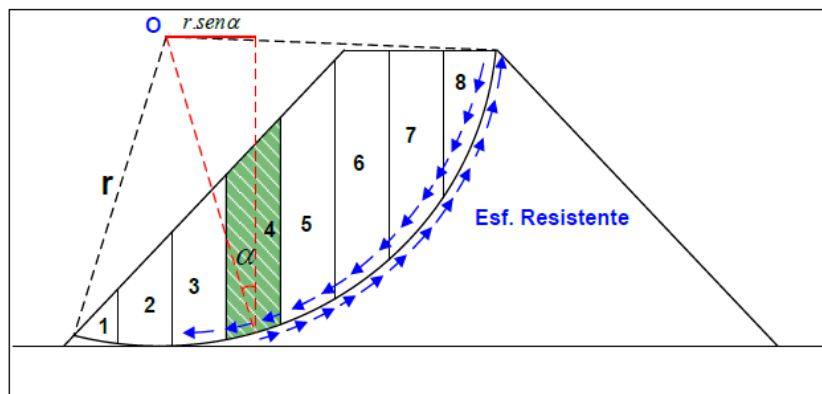


Figura 10 Ilustración método de dovelas

Nota. Tomada (Lugo Alvarez, 2018)

Tabla 1 Métodos de análisis de estabilidad de taludes.

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_c para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstem y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficiente sísmico. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.
Elementos finitos	Cualquier forma de la superficie de falla.	Analiza esfuerzos y deformaciones.	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral logarítmica	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas.	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.

Nota. Tomado de (Suárez, 1998)

La ecuación general para el cálculo del factor de seguridad según Spencer (1967) (Suárez, 1998) es la siguiente:

$$F.S = \frac{\Sigma c' l + \tan \phi' \Sigma N'}{\Sigma W \operatorname{sen} \alpha} \quad (10)$$

Donde:

$F.S$: Factor de seguridad

C' : Cohesión efectiva

l : Longitud de arco de círculo

Φ : Angulo de fricción

N' : Fuerza Normal

α : Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.

La Figura 4 muestra una falla por estabilidad global de un muro de contención. La estabilidad global es un tema relacionado con la estabilidad de taludes y, por lo tanto, se considera una verificación a realizar en el estado límite de servicio. Pueden utilizarse los métodos de análisis de Bishop modificado, Janbu simplificado o de Spencer.

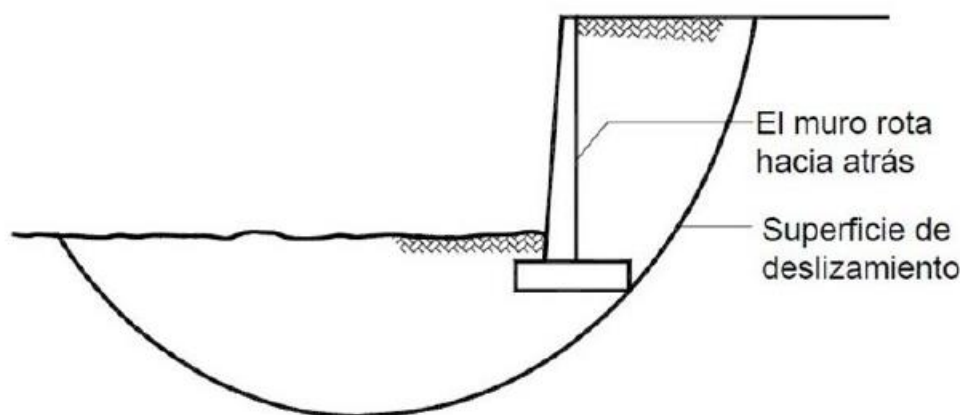


Figura 11 Falla de un muro de contención por estabilidad global

Nota. Tomado (CCP14, 2014)

Los depósitos de suelos blandos pueden estar sujetos a consolidación y/o flujo lateral, lo cual podría producir asentamientos o movimientos horizontales inaceptables a largo plazo.

Respecto a la selección de un factor de resistencia para la evaluación de la estabilidad global de los muros, ejemplos de elementos estructurales soportados por un muro que pueden justificar el uso de un factor de resistencia de 0,65 incluyen la cimentación de un puente o de un arco tubular, la cimentación de un edificio, una tubería, una infraestructura crítica, u otro muro de contención. Si el elemento estructural está localizado más allá de la superficie de falla, para la estabilidad externa detrás del muro puede usarse un factor de resistencia de 0,75.

Los programas para análisis de estabilidad de taludes disponibles producen un factor de seguridad único, FS. Los factores de resistencia especificados son esencialmente el inverso del FS que debe fijarse como objetivo en el programa de estabilidad de taludes (CCP14, 2014)

4.7 Métodos estadísticos

Anova, es uno de los métodos estadísticos que ayuda a determinar que incidencia tiene la cal cuando se le adiciona al suelo (batolito antioqueño) en diferentes porcentajes, de tal forma que comparando tres porcentajes de cal viva mezclada con el suelo comprobar si estudiando las adiciones de cal propuestas alguno de los porcentajes es mejor o igual que los ya existentes, en este caso los resultados de resistencia a la compresión no confinada que se realizan son la variable de interés, probando la hipótesis de igualdad de los tratamientos con respecto a la media de la correspondiente variable respuesta. Así, desde el punto de vista estadístico, Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar (2008), definen que la hipótesis fundamental a probar cuando se comparan varios tratamientos es:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots \mu_k = \mu$$

$$H_A : \mu_i \neq \mu_j \text{ para algùn } i \neq j$$

Donde:

- H_0 = Hipótesis nula
- H_A = Hipótesis alternativa
- μ_1, μ_2, μ_k = Medias poblacionales

La cual se puede escribir en forma equivalente como:

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0$$

$$H_A : \tau_i \neq 0 \text{ para algún } i$$

Donde τ_i , es el efecto del tratamiento i sobre la variable respuesta. Si se acepta la H_0 se confirma que los efectos sobre la respuesta de los k tratamientos son estadísticamente nulos o iguales a cero, y en caso de rechazar se estaría concluyendo que al menos uno del efecto es diferente de cero.

El análisis de varianza se realiza para corroborar la validez del modelo del diseño de experimentos, el cual se desarrolla con los datos de las pruebas de laboratorio definidas, cuya variable respuesta se estudia y analiza estadísticamente. Tal como se menciona, se incluyeron todos los datos resultantes de las combinaciones de las variables ya mencionadas. El análisis se realiza con un valor alfa fijo en $\alpha = 0,05$ (significancia de la prueba) con un nivel de confianza de $\beta = 95 \%$. Tomado de T-student prueba paramétrica para comparación de varianzas, es otro método estadístico, donde la distribución de probabilidad o distribución de una variable aleatoria X relaciona el conjunto de valores posibles de X (rango de X), con la probabilidad asociada a cada uno de estos valores y los representa a través de una tabla o por medio de una función planteada como una fórmula. Por ejemplo, sea la variable aleatoria dada por el estadístico media muestral, X , entonces al conocer su distribución de probabilidad se logra saber cuáles son los valores que puede tomar X y cuáles son más probables.

En otras palabras, la distribución de probabilidad de la media muestral X señala qué valores se espera que tome X , de acuerdo con los supuestos asumidos. De esta forma, la distribución de probabilidad hace que lo aleatorio no sea un capricho, y modela (describe, acota) los posibles valores de un estadístico muestral, con lo que al observar una realización específica de un estadístico se pueden corroborar o rechazar supuestos (prueba de hipótesis), o bien, hacer estimaciones poblacionales.

Las distribuciones de probabilidad que más se usan en intervalos de confianza y pruebas de hipótesis son las distribuciones: normal, T de Student, ji-cuadrada y F. En la figura 10 se representan las formas típicas de estas cuatro distribuciones. La distribución normal está completamente definida por sus parámetros, que son la media, μ , y la desviación estándar, σ . Por ejemplo, en la figura 10 se muestra la distribución normal con $\mu = 0$ y $\sigma = 1$, que se simboliza con $N(0,1)$ y se conoce como la distribución normal estándar.

En la figura 11, también se observa que, tanto la distribución normal estándar como la T de Student son simétricas y centradas en cero, mientras que las distribuciones ji-cuadrada y F son sesgadas y sólo toman valores positivos. Las cuatro distribuciones están relacionadas entre sí, ya que las distribuciones T de Student, ji-cuadrada y F se definen en términos de la distribución normal estándar. Los parámetros que definen por completo las distribuciones T de Student, ji-cuadrada y F, reciben el nombre de grados de libertad, que tienen que ver con los tamaños muestrales involucrados. Por ejemplo, si se tiene una muestra de tamaño 20, será de interés una distribución T de Student con 19 grados de libertad para hacer inferencia sobre la media poblacional; o una ji-cuadrada con 19 grados de libertad para hacer inferencias sobre la varianza poblacional. Tomado de (Gutiérrez, y otros, 2008)

Un procedimiento gráfico para verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos consiste en graficar los residuos en papel o en la gráfica de probabilidad normal que se incluye casi en todos los paquetes estadísticos. Esta gráfica del tipo X-Y tiene las escalas de tal manera que si los residuos siguen una distribución normal, al graficarlos tienden a quedar alineados en una línea recta; por lo tanto, si claramente no se alinean se concluye que el supuesto de normalidad no es correcto. Cabe enfatizar el hecho de que el ajuste de los puntos a una recta no tiene que ser perfecto, dado que el análisis de varianza resiste pequeñas y moderadas desviaciones al supuesto de normalidad. (Gutiérrez, y otros, 2008)

La prueba de Lilliefors es una adaptación del test de Kolmogorof-Smirnoff, para verificar la normalidad de un conjunto de datos, usando la media y la desviación estándar calculados del propio conjunto de datos. (Ederson, y otros, 2021)

Homocedasticidad (homogeneidad de varianzas) entre los grupos a comparar: las varianzas de la variable dependiente en los grupos que se comparan deben ser aproximadamente iguales. Por ello uno de los pasos previos a la comprobación de la existencia de diferencias entre las medias de varias muestras es determinar si las varianzas en tales muestras son iguales, es decir, comprobar si se cumple la condición de homogeneidad de varianzas, ya que del cumplimiento de esta condición dependerá la formulación que se emplee en el contraste de medias. Existen varias pruebas que permiten comprobar la igualdad de varianzas (F de Fisher, Fmax de Hartley, prueba de Bartlett, Goldfeld-Quandt, etc.). (Rubio, y otros, 2011)

Prueba de Durbin-Watson. Esta prueba permite diagnosticar la presencia de correlación (autocorrelación) entre los residuos consecutivos (ordenados en el tiempo), que es una posible manifestación de la falta de independencia. La autocorrelación se presenta en experimentos en

los cuales cada medición tiene alguna contaminación de la medición inmediata anterior, lo cual contradice el supuesto de independencia. (Gutiérrez, y otros, 2008)

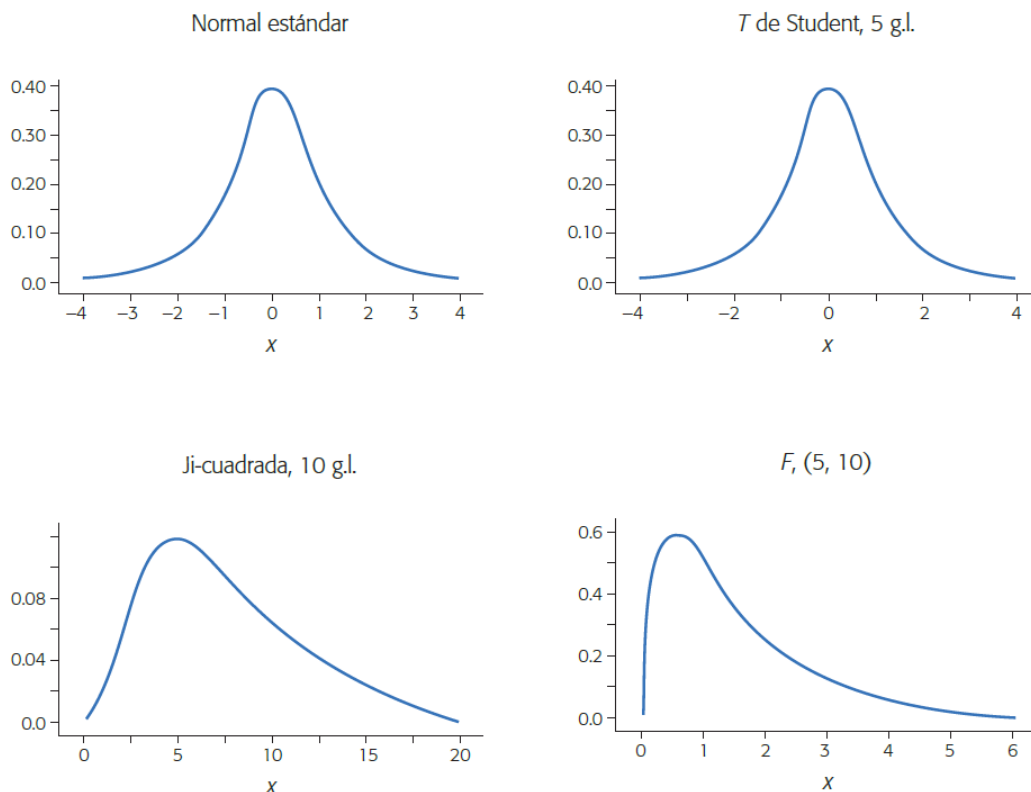


Figura 12 Distribuciones de probabilidad de mayor uso

Nota. Tomado de (Gutiérrez, y otros, 2008)

- Diseños factoriales mixtos

Se tiene un diseño factorial mixto cuando los factores estudiados no tienen el mismo número de niveles. Por ejemplo, el factorial $4 \times 3 \times 2$ significa que se experimenta con tres factores, con 4, 3 y 2 niveles, respectivamente. El total de tratamientos es 24. La necesidad de utilizar un diseño factorial mixto surge por las mismas razones de un factorial 3^k (considera k factores con tres niveles cada uno y tiene 3^k tratamientos). La diferencia es que el diseño factorial mixto es más frecuente que se utilice cuando, por su naturaleza discreta o categórica, los factores tienen un número finito y distinto de niveles, y el interés es estudiar todos los niveles. Por ejemplo las tres marcas de cierto material. La otra razón, aunque menos frecuente en los diseños mixtos que en los factoriales 3^k , es la posibilidad de estudiar efectos de curvatura de los factores con más de dos niveles. (Gutiérrez, y otros, 2008)

5 METODOLOGÍA

En este trabajo se propone evaluar la resistencia al cortante en condición no saturada en suelos residuales del batolito antioqueño estabilizados con cal viva utilizados en la construcción de terraplenes, y para lograrlo se propone revisar el estado del arte sobre la estabilización de suelos con cal y el comportamiento en terraplenes, seguido se realizará un estudio experimental de las propiedades de resistencia al cortante de suelos residuales del batolito antioqueño estabilizado con cal viva en condiciones no saturadas para cotejar resultados y por último evaluar el efecto de estabilización con cal viva sobre terraplenes; y para ello se proponen las siguientes fases:

5.1 Fase I: Determinación experimental

Para esta fase, que tuvo como objetivo determinar experimentalmente las propiedades de resistencia al corte mediante los ensayos de compresión no confinada y corte directo de suelos residuales del batolito antioqueño estabilizado con cal viva en condiciones saturadas y no saturadas; basado en las normas de regulación colombiana INVIAS 2022; se contó con el apoyo técnico y tecnológico de un laboratorio de mecánica de suelos, y el resultado esperado es la incidencia que puede tener la cal viva en el suelo; para los estudios realizados se tomaron los siguientes materiales y se realizó la caracterización de suelo mediante los ensayos de laboratorio granulometría, límites de atterberg (límite líquido y límite plástico), clasificación SUCS, Proctor modificado y Proctor estándar, además se realizó la prueba de Eades y Grim (ASTM, 2004) D-6276 para estimar la proporción suelo-cal para la estabilización del suelo; seguidamente se define con el suelo mezclado con cal realizar 54 ensayos de compresión no confinada con los porcentajes de cal de 1%, 2% y 3% , con dos energías de compactación la modificada y la estándar, y dos temperaturas de curado 22°C y 40°C en un tiempo de 7 días, los ensayos de compresión no confinada se realizan para definir el porcentaje de cal viva que mejor desempeño presente en función de la resistencia q_u , en esta etapa experimental no se tiene en cuenta la saturación o no saturación del suelo estabilizado. Para los ensayos de corte directo en condición saturado con la caja inundada se realizaron 9 ensayos, 3 ensayos con la humedad óptima y

energía de compactación del Proctor modificado, 3 ensayos con la humedad óptima menos 4% y 3 pruebas más 4% con la energía de compactación modificada con un porcentaje de cal viva. Para los ensayos de corte directo en condición no saturado con la caja sin inundar se realizaron 6 pruebas variando la temperatura (22°C y 40°C) y tiempo de curado (7, 14 y 28 días), compactando las pastillas con la energía de compactación del proctor modificado y humedad óptima.

5.1.1 Suelo batolito antioqueño (limo Vegachí)

Las muestras del suelo se tomarán de un Proyecto vial ubicado al nordeste de Antioquia en el Municipio de Vegachí. En esta zona superficialmente se identifican suelos residuales provenientes de la meteorización del Batolito Antioqueño, aunque en la zona también afloran suelos residuales provenientes de Neis Feldespático.

Según el Servicio Geológico Colombiano (Botero Arango, 2023), el Batolito Antioqueño, aflora en un área de 7.221 km², en la Cordillera Central, es una unidad monótona; 97% cuarzodiorita o granodiorita, compuesta de cuarzo (23,9%), feldespatos de potasio (6,7%), plagioclasa (48%), hornblenda (9,3%), biotita (9,3%), clorita secundaria (1,6%) y minerales accesorios (0,8%). Se han reconocido facies félsicas y gabroicas. Numerosas edades radiométricas indican edad cretácea superior. Son comunes diques andesíticos con espesores de 1 a 2 cm. (Feininger & Botero, 1982). Gómez et al (2015) le asignaron la nomenclatura cronostratigráfica de K2-Pi.

La roca del batolito es maciza en su mayoría; es común la presencia de inclusiones máficas (gabros). Los suelos residuales de este batolito pueden tener más de 100 m de profundidad e incluyen los horizontes IV a VI (CORNARE).

5.1.2 Cal viva (óxido de calcio)

En la Tabla 3 se presenta la composición de la cal viva empleada en la investigación.

Tabla 2 Ficha técnica de Cal viva

CARACTERISTIAS FISICO/QUIMICAS	METODO ENSAYO DE REFERENCIA	CAL PULVERIZADA	VIVA
CaO (Total), %	ASTM C-25/NTC 5059		90,0 Min.
CaO (Disponible), %	NTC 1398		87,0 Min.
MgO, %	FRX		0,5 Max.
SiO ₂ , %	FRX		2,5 Max.
Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ , %	FRX		0,7 Max.
Granulometría (% que pasa)-Malla 100	ASTM C-110/NTC 5233		95 Min.
Granulometría (% que pasa)-Malla 200	ASTM C-110/NTC 5233		90 Min.
Reactividad, ΔT 30 segundos, °C min	ASTM C-110/NTC 5233		30 Min.

Nota. Tomado de (Calidra S.A. , 2020)

5.1.3 Métodos de experimentación

Se realizó la caracterización del suelo residual del batolito antioqueño, proveniente de la cantera El Diamante en el municipio de Vegachí Antioquia, obra Autopista Rio Magdalena, donde se tomarán muestras a las cuales se le aplicarán los ensayos de laboratorio bajo los parámetros de la norma (INVIAS, 2022) , como la determinación de los tamaños de las partículas de los suelos, límite líquido de los suelos, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos, determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, aplicación de picnómetro con agua, compresión no confinada en muestras de suelo, ensayo de corte directo en condición saturada con la caja inundada y no saturada con la caja sin inundar, relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos (Ensayo normal de compactación), relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación), determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado.

Para la determinación del porcentaje de cal viva inicial para comenzar los ensayos de laboratorio se utilizó el procedimiento en la norma (ASTM, 2004) referenciado en la D- 6276 Eades & Grim, que consistió en determinar la cantidad de cal necesaria para que en su reacción al ser mezclado con el suelo produzca un valor de pH de 12.4, el ensayo se determinó secando el suelo en estado natural al aire o al horno a 60°C , se procede a pasar una muestra aproximada de 350 gramos por el tamiz #4, y después separar 6 cantidades de suelo con un peso de 25

gramos y depositar cada muestra en un recipiente de vidrio con tapa, y agregar a cada uno los porcentajes de cal que se van a evaluar (0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%) con respecto a peso del suelo seco (25 g) y se mezcla cada uno, después se agrega 100 ml de agua destilada y se agita rigurosamente garantizando que se forme un fluido homogéneo, se deja reposar por 15 min, y se realiza la medida de pH (Con medidor de pH calibrado) a cada recipiente con su fluido (mezcla de cal, agua destilada y suelo), con los resultados obtenidos se realiza una gráfica de %cal vs pH Figura13; y con el porcentaje de cal en el cual el pH es 12.4 se define los porcentajes cal para realizar un diseño de experimentos con el ensayo de compresión no confinada (INVIAS, 2022) E-128, y obtener la resistencia a la compresión no confinada q_u mayor al 50% de la obtenida en el mismo suelo en estado natural, siendo la resistencia obtenida una comprobación que la cal viva mejora las propiedades geomecánicas del suelo estabilizado.

En la caracterización del suelo (limo pasante tamiz 4) del batolito antioqueño en estado natural, se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión no confinada con las densidades secas máximas obtenidas de los ensayos Proctor modificado utilizando un molde de 4 pulgadas de diámetro, peso del martillos 10 libras, altura de caída de 18 pulgadas, 5 capas y 25 golpes en cada una de ellas; para el Proctor estándar se utiliza un molde de 4 pulgadas de diámetro, peso del martillos 5,5 libras, altura de caída de 12 pulgadas, 3 capas y 25 golpes en cada una de ellas y se define el valor medio de las densidades secas máximas por el método modificado y estándar , para obtener resultados en el rango de estas dos y revisar la variabilidad que presentan en pruebas de resistencia a la compresión no confinada que se realizarán con la adición de la cal viva en diferentes porcentajes y poder compararlos con los resultados del suelo en estado natural. En la Tabla 4 se. Seguidamente se procede a compactar las probetas para ensayo de compresión no confinada mediante la aplicación de presión con gato hidráulico, conociendo el volumen del cilindro metálico (diámetro 3,65 cm y altura 8 cm) garantizando que la relación altura/diámetro este entre 2 y 2,5 , y con la densidad máxima, se procede a hallar la masa necesaria para ocupar el volumen del cilindro, con lo cual se garantiza que las densidades van a ser iguales o muy cercanas a las definidas (el suelo se compacta con cada humedad óptima del proctor modificado y estándar , y el valor medio)

El diseño de experimentos utilizado es de tipo Factorial Mixto que consiste cuando los factores en el experimento no tienen el mismo número de niveles (Gutiérrez, y otros, 2008), con tres factores; donde dos factores cuentan con tres niveles y uno con dos niveles, dándonos la como variable respuesta la resistencia a la compresión no confinada q_u , tomando como variables

fijas el tiempo de curado a 7 días y los factores variables porcentajes de cal viva y la densidad seca máxima obtenida del ensayo Proctor modificado, Proctor Estándar y promedio de las dos como se describen.

Para el diseño de experimentos con el suelo limo del batolito antioqueño se realizaron con tres réplicas para cada factor fijo y con cada factor variable para un total de 54 ensayos de compresión no confinada, de la cuales antes de empezar las pruebas se realizó un proceso de aleatorización mediante números aleatorios en Excel, tomando la totalidad de las muestras definidas y dándole un número aleatorio diferente a cada uno y después proceder a ordenarlos de menor a mayor obteniendo la secuencia a seguir para la ejecución de las pruebas aleatoriamente y así minimizar la ocurrencia de sesgos en los resultados obtenidos.

Seguidamente se procedió con la ejecución de los ensayos de compresión no confinada, para lo cual se seca el suelo del batolito antioqueño a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para después pasarlo por el tamiz No. 40 (425 micras) y garantizar homogeneidad en el total de la muestra de trabajo, como las probetas para los ensayos de compresión no confinada son remodelados, se selecciona un molde cilíndrico que garantice una relación altura-diámetro entre 2 y 2,5, por lo cual se tomó un molde de 132 cm^3 . Teniendo la densidad seca máxima, la humedad óptima y el volumen, se calculó la cantidad de masa en gramos que se compactó mediante presión, para garantizar que los especímenes cilíndricos tuvieran las densidades que se programaron en el diseño de experimentos, después se procedió a envolver cada espécimen en papel Stretch con la finalidad que la humedad no se perdiera y así se pudiera dar la reacción de la cal viva con el suelo, para proceder a dejarlos curado a 40°C 27 especímenes y a 22°C los otros 27 especímenes por un lapso de tiempo de 7 días.

Después de cumplir el tiempo de curado se procedió a sacarlos del horno, dejarlos aproximadamente 2 horas a temperatura ambiente y retirar el papel stretch, para después ejecutar el procedimiento de hallar la resistencia a la compresión no confinada según norma de ensayo E-128 de (INVIAS, 2022) Figura 13. (a) Estándar (b) Media (c) Modificado.

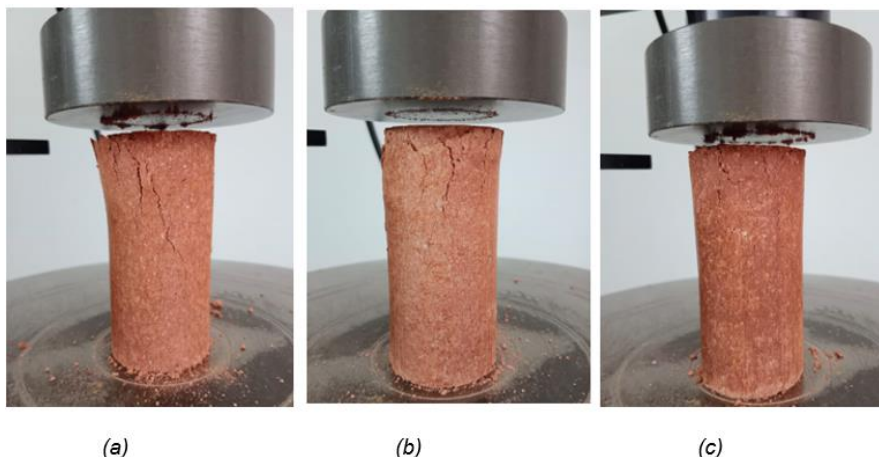


Figura 13 Fallo de resistencias a la compresión no confinada

Nota. Fuente propia.

Con los resultados de resistencia a la compresión no confinada, se procedió a realizar el análisis estadístico como se puede ver en el punto de comprobaciones estadísticas, y según estos análisis se definió un porcentaje de cal óptimo basado en la resistencia a la compresión no confinada con la tres densidades secas máximas; con el porcentaje de cal viva ya definido se procedió a definir las pruebas de resistencia al cortante (I.N.V. E-152) en estado saturado con la caja inundada y no saturado con la caja sin inundar.

Definido el porcentaje de cal viva bajo las normas internacionales de (ASTM, 2004) por el método de pH ASTM D 6276 y por el ensayo de compresión no confinada (I.N.V. E-128) de (INVIAS, 2022), se realizaron ensayos de corte directo (I.N.V E-154) de (INVIAS, 2022) en condiciones saturadas con la caja inundada y no saturada con la caja sin inundar, tomando la densidad seca máxima que mejor resultado de resistencia a la compresión no confinada y el porcentaje de cal viva.

Los suelos tratados con cal viva para la construcción de terraplenes han sido poco estudiados; no obstante se han realizado investigaciones basados ensayos triaxiales (Shen, y otros, 2021); y ensayos de Corte directo; siendo el último el método seleccionado para este trabajo.

La determinación de los parámetros de resistencia al cortante en condiciones no saturadas se realizó siguiendo la metodología realizada Bai and Liu descrita en el Capítulo 4.4 con los siguientes pasos:

- Para las pruebas de corte directo se definieron tres tiempos de curado 7, 14 y 28 días, dos temperaturas de curado 22°C y 40°C, a una densidad seca máxima y humedad óptima, la del Proctor modificado y un solo porcentaje de cal viva; para este estudio se realizaron 18 ensayos de Corte directo I.N.V. E-154 (INVIAS, 2022) para la condición

saturada con la caja inundada. Las muestras de suelo con cal viva se compactaron igual que como se prepararon las del ensayo de compresión no confinada, teniendo en cuenta que el molde para compactar las pastillas para el ensayo de corte directo son de un volumen de 60 cm^3 y conociendo la densidad, se calcula la masa húmeda (humedad del Proctor) necesaria para ocupar el volumen y compactar cada una de ellas por presión mediante un gato hidráulico, se realizaron 18 especímenes según el ensayo corte directo I.N.V. E-154 (INVIAS, 2022) para obtener los parámetros de resistencia cohesión y ángulo de fricción en cada una de las pruebas realizadas en condiciones saturadas con la caja inundada; teniendo variable el porcentaje de humedad (3 ensayos), temperatura (3 ensayos) y tiempo de curado (3 ensayos); y se realizaron seis ensayos de corte directo en condiciones no saturadas con la caja sin inundar, todas con la densidad seca máxima y humedad óptima del Proctor modificado, dos muestras se curaron en un tiempo de 7 días, una a temperatura de 22°C y la otra 40°C ; dos con tiempo de curado de 14 días y dos 28 días, cada una de ellas compactadas mediante presión conociendo el volumen y la densidad, y midiendo la altura de cada espécimen después de aplicado el esfuerzo normal durante el ensayo de corte directo no saturado sin la caja sin inundar, con el dato de la altura de cada espécimen se procedió a calcular la humedad volumétrica.

- Para las curvas características, los ensayos de succión se realizaron siguiendo los lineamientos de (INVIAS, 2022) E-159, que consiste en dos pastillas compactas con la energía de compactación del Proctor modificado y la humedad óptima, estas se compactaron mediante presión utilizando el mismo procedimiento para la compactación de las muestras cilíndricas para compresión confinada; las pastillas de suelo se secan a una temperatura de 60°C o ambiente hasta que se verifique que se puedan manipular sin desintegrarse y hallar la humedad de suelo; secar hasta peso constante el papel filtro Whatman No. 42, dejar reposar en recipiente desecador para que no adquiera humedad higroscópica y pesar el papel filtro en balanza analítica, después se procede a colocar el filtro con pinzas en la parte transversal de una de las pastillas cilíndricas y se coloca la otra pastilla sobre el papel filtro, y se sella con cinta la unión de las dos pastillas diametralmente, después se ingresan en recipiente hermético y sellado durante siete días, para luego proceder a retirar el papel filtro e inmediatamente pesarlo en la balanza analítica, y proceder a realizar los cálculos de la succión del suelo; este procedimiento se repitió para ocho incrementos de humedad, y se realizaron las curvas de retención de agua para el suelo del batolito antioqueño estabilizado con cal viva al 2% con temperatura

de curado de 22°C y 40°C y tiempo de curado de 7 días, al igual que la curva de retención de agua de suelo en estado natural.

5.2 Fase II: Análisis de resultados

En esta segunda fase se tomó como referencia los resultados de los ensayos de la fase I, con base en estos el objetivo de la fase establecer es establecer la incidencia de la cal viva en la resistencia a la compresión no confinada que permita determinar qué porcentaje de cal aumenta en más del 50% el que comparado con su resistencia en estado natural, sin tener en cuenta la saturación y no saturación. Seguidamente se evaluaron los parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción) de acuerdo con el procedimiento de Bai and Liu, en condiciones saturadas con la caja de corte inundada y no saturadas con la caja de corte sin inundar; con el propósito de verificar las variaciones porcentuales del comportamiento de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción en condiciones no saturadas; ambas características fundamentales en el diseño y construcción de terraplenes. Con los datos que se obtuvieron de los parámetros de resistencia al corte de cohesión y ángulo de fricción en estado no saturado con la caja sin inundar, y con las curvas de retención de agua y humedad volumétrica, se determinó la succión matricial en la trayectoria de humedecimiento, para seguidamente calcular los ángulos que definen el aumento de resistencia al cortante con el aumento de la succión ϕ^b .

Para determinar el efecto de la cal viva en el suelo del batolito antioqueño en el diseño de experimentos con los ensayos de resistencia a compresión no confinada, y para el análisis de los parámetros de resistencia al corte se utilizó las pruebas Anova, T student, F student., determinando estadísticamente la significancia en cada variable estudiada.

5.3 Fase III: Aplicación

En esta última fase, se tomaron los resultados de parámetros de resistencia al corte obtenidos del suelo en estado natural y tratado con cal viva en condición saturado con la caja inundada y no saturado con la caja sin inundar, y se procede a modelar un terraplén típico variando las pendientes y dimensiones de este, para verificar como incide en los factores de estabilidad y con estos resultados establecer la reducción del volumen del suelo necesario para la construcción de un terraplén, con los parámetros de referencia se determinará la utilidad para el sector de construcción de vías; específicamente de estructuras de terraplenes con este tipos de suelos estabilizados con cal viva.

Se tomó de referencia un esquema de terraplén como se muestra en Figura 16, con el objetivo de esquematizar un terraplén para la aplicación de los parámetros de resistencia al corte del suelo en estado natural y estabilizado con cal en condición saturado y no saturado, y revisar su estabilidad por el método de equilibrio límite.

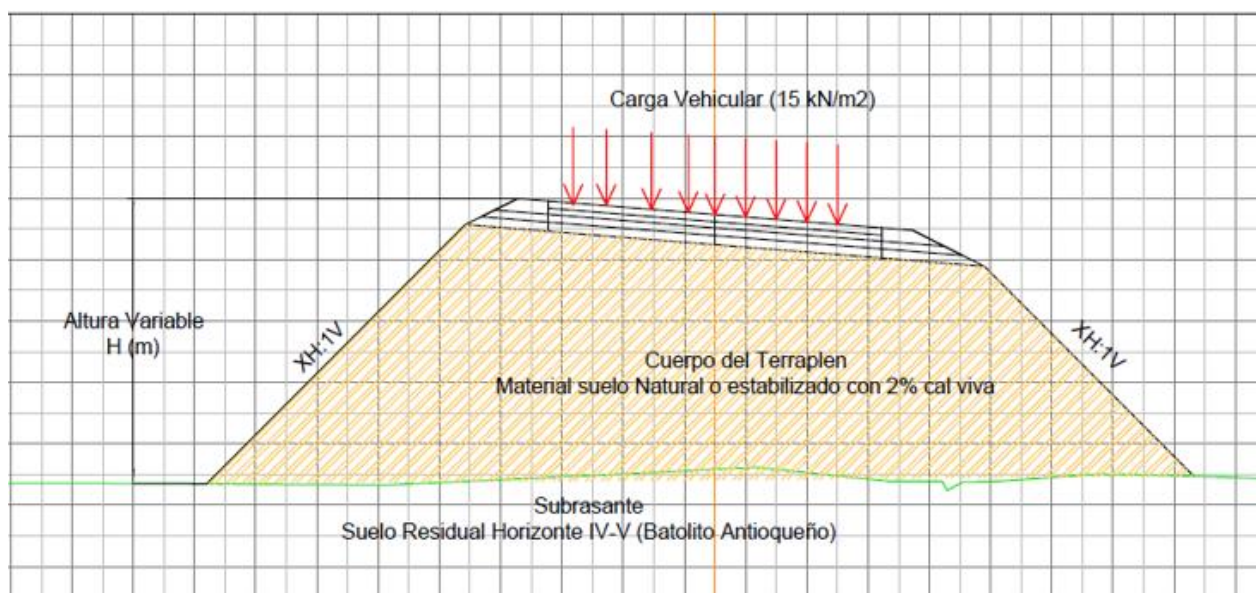


Figura 14 Esquema de terraplén

Nota. Fuente propia

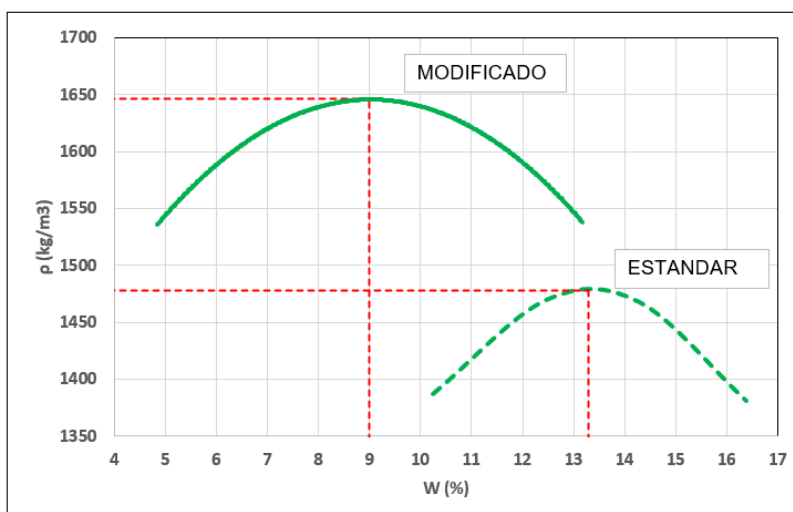
6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la caracterización del suelo del batolito antioqueño realizada en estado natural clasifica como un limo de baja plasticidad (MH) (ASTM, 2004, D422-63, D.4318), como se puede observar en la Tabla 2. En la Figura 13 se presenta los resultados de las densidades seca máxima y humedad óptima del Proctor modificado y estándar, con los cuales se realizan los ensayos de compresión no confinada, y en la Figura 14 se presenta el resultado de pH (12,4) con el cual el suelo reacciona químicamente que es de 2.4% de cal viva.

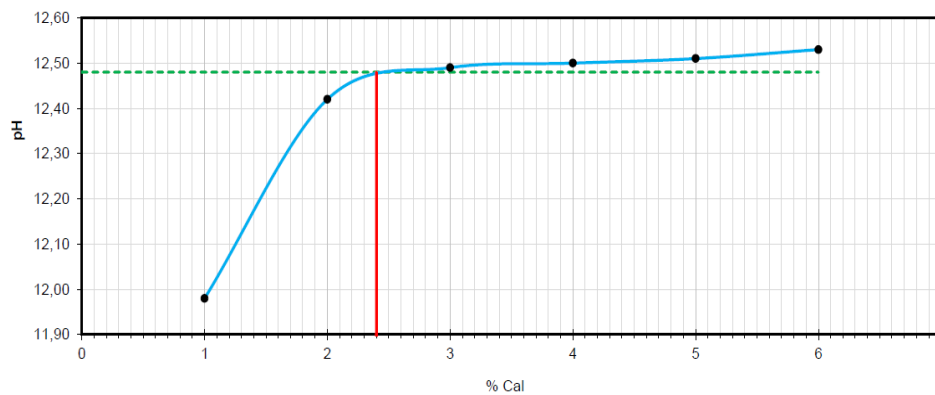
Tabla 3 Resultados Clasificación Suelo Batolito Antioqueño

Suelo	Granulometría			Límites Atterberg			Clasificación SUSC
	GRAVA %	ARENA %	FINO %	LL %	LP %	IP %	
Limo (Batolito Antioqueño)	0	44,3	55,7	41,4	32,8	8,6	MH

Nota. Fuente propia

**Figura 15** Proctor modificado y estándar del suelo de Batolito Antioqueño.

Nota. Fuente propia

**Figura 16** Determinación del porcentaje de cal viva para el suelo del batolito antioqueño, ASTM D-6276

Nota. Fuente propia

En la *Tabla 4* se presentan los resultados de resistencia a la compresión no confinada del suelo en estado natural compactado con la densidad del Proctor modificado, estándar y el valor promedio, con las humedades óptimas de cada uno. Los resultados obtenidos son las características iniciales de resistencia q_u en estado natural del suelo del batolito antioqueño.

Tabla 4 Resistencia a la compresión del suelo en estado natural compactado a diferentes densidades.

ρ (kg/m ³)	q_u (kPa)
1478	56.17
1478	54.78
1478	57.76
1562	135.47
1562	134.72
1562	136.56
1646	149.82
1646	151.58
1646	150.68

Nota. Fuente propia

6.1 Resistencia a la compresión no confinada

En la *Figura 17*, se puede observar la incidencia de la cal viva en la resistencia a la compresión no confinada con tres densidades, una con la energía de compactación del proctor modificado (INVIAS, 2022) E-142 (1646 kg/m³), otra con la energía de compactación del proctor estándar (INVIAS, 2022) E-141 (1478 kg/m³) y la última con el promedio de las dos (1562 kg/m³); las densidades se alcanzaron con la aplicación de presión en el volumen conocido del molde cilíndrico hasta que la totalidad de la masa con la humedad calculada ocupe el volumen definido; el tiempo de curado de 7 días a una temperatura de 22 °C, tomando como referencia la resistencia a la compresión no confinada del suelo del batolito antioqueño natural en las líneas con marcadores horizontales para cada densidad, los resultados obtenidos se presentan en el Anexo1 al igual que las curvas de esfuerzo deformación para cada ensayo.

En la Tabla 5 se presentan los datos para el diseño de experimentos con los diferentes factores, niveles y variables, con los cuales se realizaron los ensayos de compresión no confinada.

Tabla 5 *Diseño de experimentos variables fijas e independientes*

Factores fijos		Niveles	
Temperatura (°C)	22		40
Tiempo de curado (días)		7	
Factores independientes		Niveles	
Densidad seca máxima (kg/m ³)	1478	1562	1646
% Cal viva	1	2	3

Nota. Fuente propia

En la Figura 18, se puede observar la incidencia de la cal viva en la resistencia a la compresión no confinada con tres densidades, una con la energía de compactación del proctor modificado (INVIAS, 2022) E-142 (1646 kg/m³), otra con la energía de compactación del proctor estándar (INVIAS, 2022) E-141 (1478 kg/m³) y otra con el promedio de las dos (1562 kg/m³), las densidades se alcanzaron con la aplicación de presión en el volumen conocido del molde cilíndrico hasta que la totalidad de la masa con la humedad calculada ocupe el volumen definido; el tiempo de curado de 7 días a una temperatura de 40 °C; tomando como referencia la resistencia a la compresión no confinada del suelo del batolito antioqueño natural en las líneas con marcadores horizontales para cada densidad, notándose un incremento significativo con respecto a las muestras curadas a 22°C en la resistencia a la compresión no confinada. Se observa que la resistencia a la compresión no confinada es mayor en las muestras con la densidad del Proctor modificado; porcentaje de cal del 3% y temperatura de curado de 40°C, tomando la totalidad de los resultados que incluyen tiempos de curado de 7 días, porcentajes de cal viva de 1%, 2% y 3%, y temperatura de curado de 22°C y 40°C.

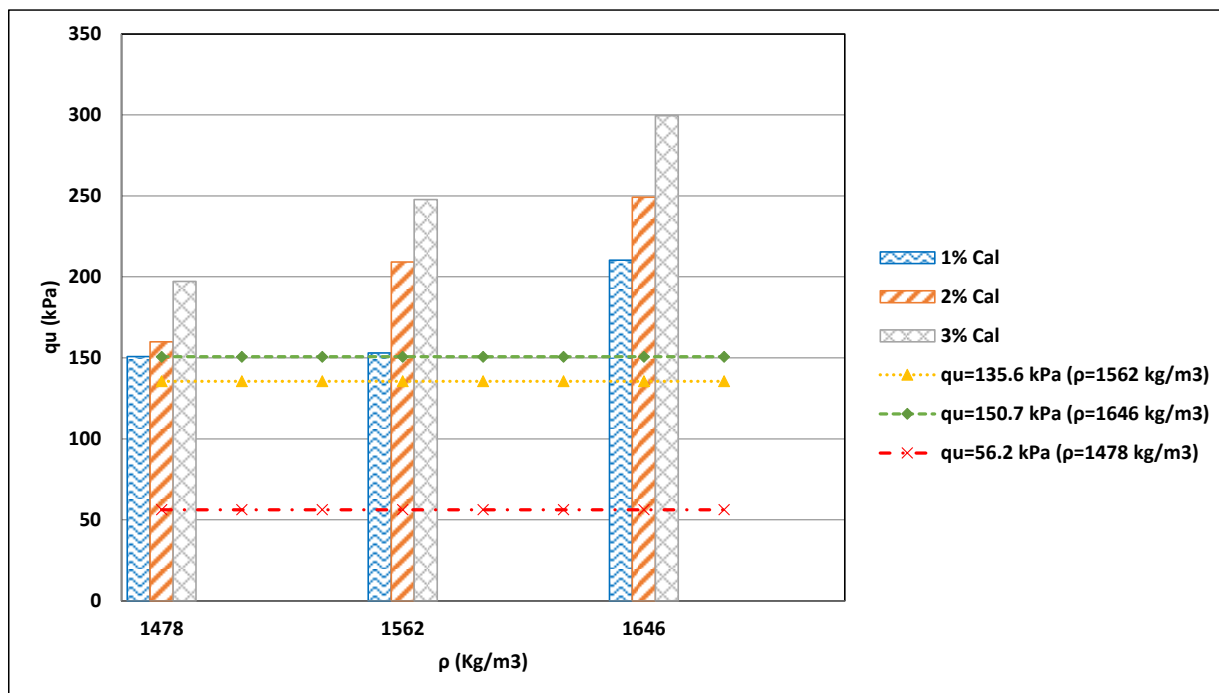


Figura 17 Comportamiento a la resistencia a compresión no confinada Limo Batolito antioqueño a 22°C de curado y 7 días de curado.

Nota. Fuente propia

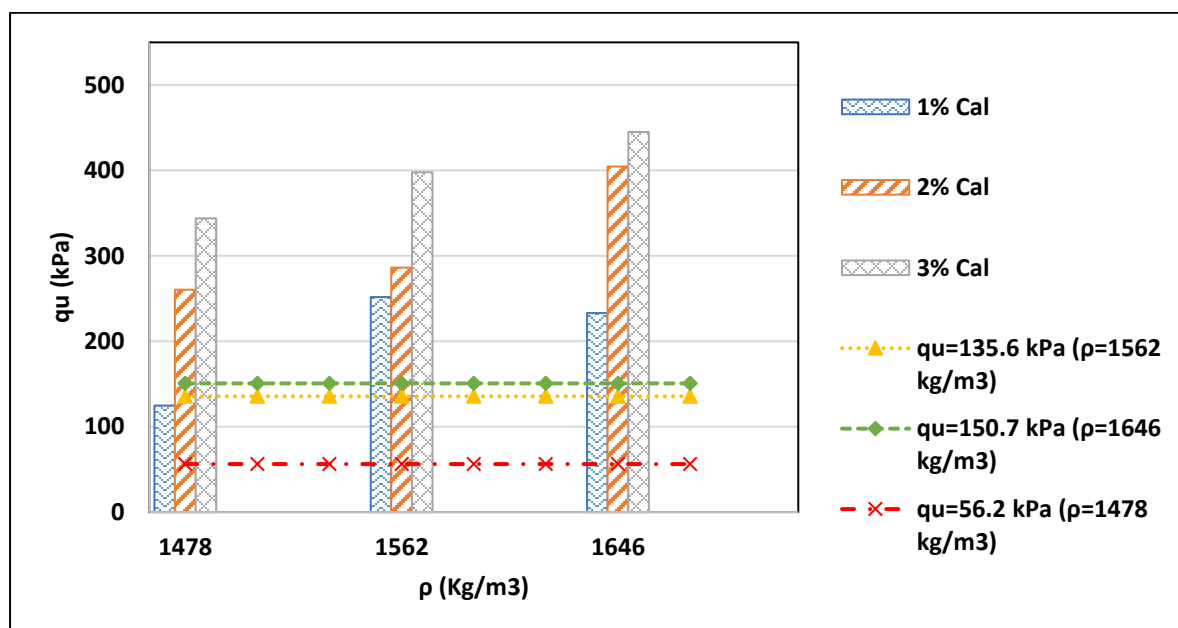


Figura 18 Resistencia a compresión no confinada Limo Batolito antioqueño a 40°C de curado y 7 días de curado

Nota. Fuente propia

En la Figura 19 diagrama de caja y bigotes se observó que para densidades mayores a la del Proctor estándar, los porcentajes de cal que mejor resistencia a la compresión no confinada presentaron, fueron las del 2% y 3%, teniendo en cuenta las temperatura de curado de 22°C y 40°C, evidenciándose una asimetría positiva en la densidad del Proctor modificado (1646 kg/m³) lo que indica que la mayoría de los resultados estuvieron por encima de la media y para las densidades del Proctor estándar (1562 kg/m³) y la densidad promedio (1562 kg/m³) se observa que los resultados obtenidos fueron muy cercanos a la media considerándose simetría en los datos, por lo cual a mayor densidad aumenta la resistencia a la compresión no confinada. En la Figura 20, se observan el incremento de la resistencia a la compresión no confinada, en los porcentajes de cal de 2% y 3%, para una densidad de compactación del Proctor modificado, tiempo de curado de 7 días y temperatura de curado de 22°C y 40°C. En la Figura 22 de todos los resultados de resistencia a la compresión no confinada obtenidos a temperaturas de 22°C y 40°C se observó que con temperatura de curado mayor mejora la resistencia, y en Figura 23 y Figura 23, se evidenció en las gráficas de interacción un comportamiento atípico de los resultados en la densidad que se tomó como promedio (1562 kg/m³) posiblemente en la mezcla del suelo con la cal viva y su homogenización quedando cal viva sin reaccionar químicamente lo que hace que la resistencia a la compresión no confinada sea menor.

Con el fin de determinar la incidencia de la cal viva en la resistencia a la compresión no confinada del suelo del batolito antioqueño, se utilizó el análisis de varianzas ANOVA, para aprobar el diseño de experimentos, en el cual se realizaron 54 ensayos de compresión no confinada en total, con tres réplicas para cada porcentaje de cal y para las tres densidades definidas anteriormente y tomando fijos los factores de temperatura de curado y tiempo de curado. El análisis se realizó con el nivel de significancia (p) el valor fijo de $p=0.05$ con un nivel de confianza de $\beta=95\%$ de acuerdo con el nivel de significancia mencionado, determinándose que las variables densidad, % de cal viva y Temperatura de curado tienen incidencia estadística en la variable respuesta, debido a que el p -value es menor a 0,05, ver Anexo 2.

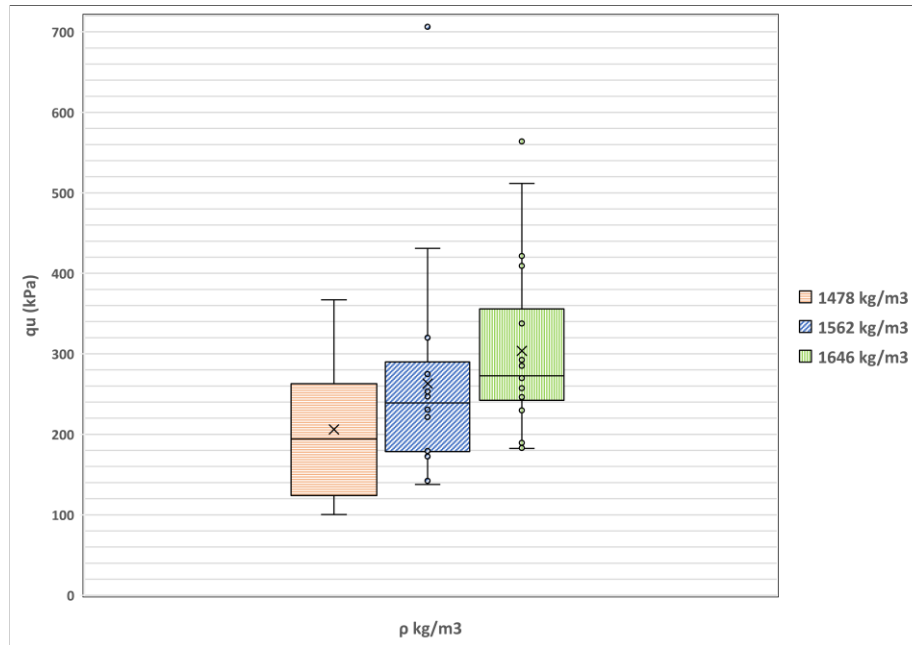


Figura 19 Diagrama de caja y bigotes de incidencia de la densidad en la Resistencia a compresión no confinada (q_u).

Nota. Fuente propia

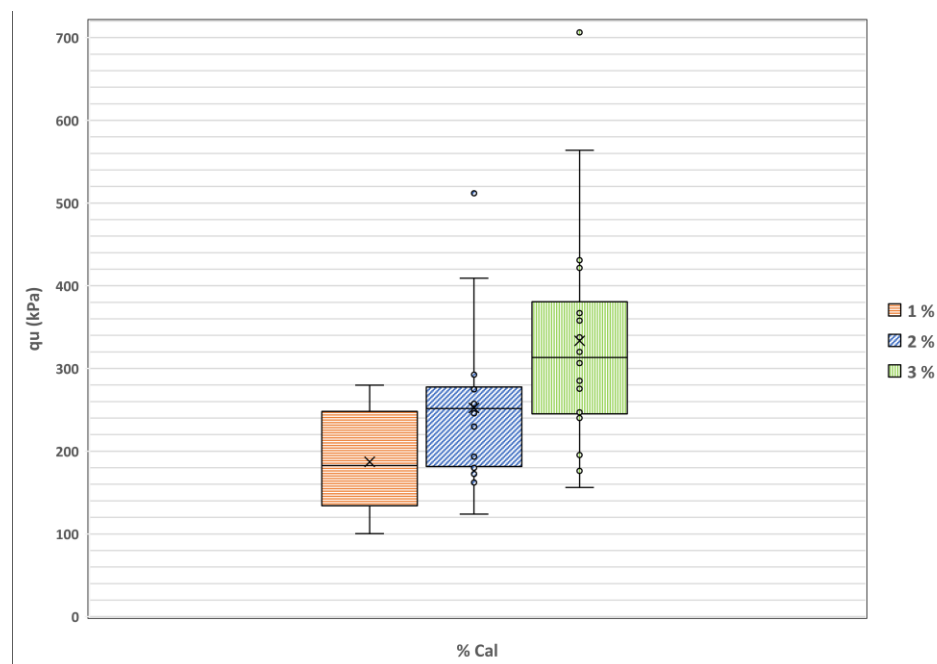


Figura 20 Diagrama de caja y bigotes de incidencia de % de Cal viva en la Resistencia a compresión no confinada (q_u).

Nota. Fuente Propia

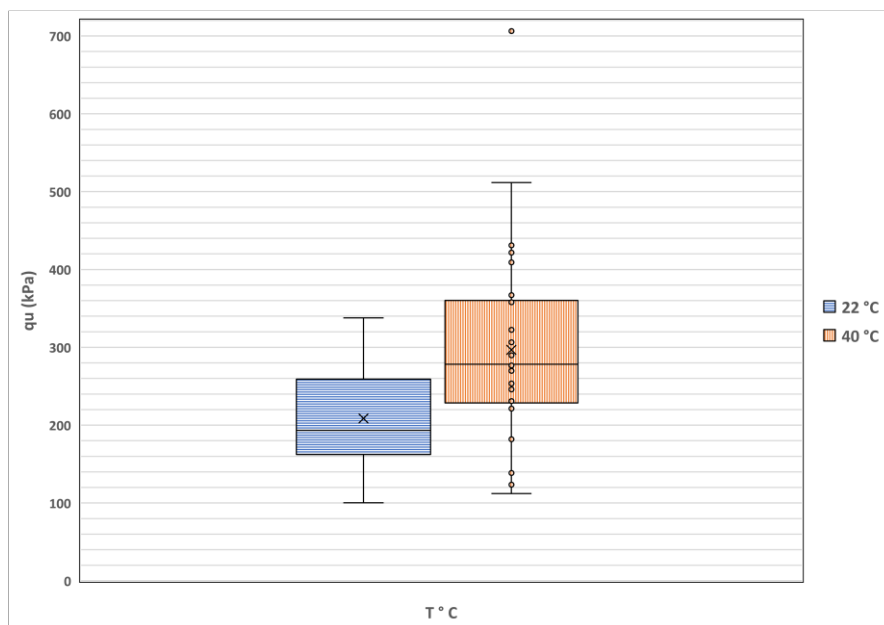


Figura 21 Diagrama de caja y bigotes de incidencia de la temperatura de curado en la Resistencia a compresión no confinada (q_u).

Nota. Fuente propia

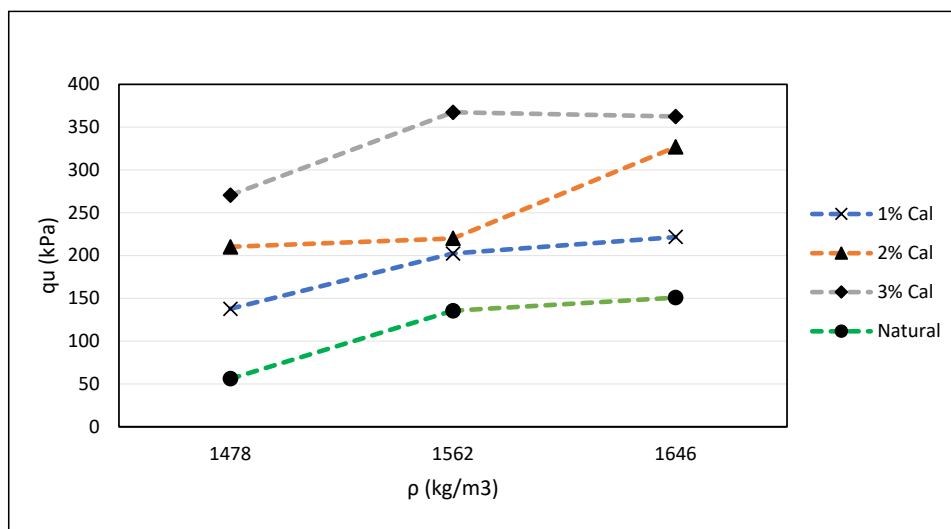


Figura 22 Gráfico de interacción resistencia a la compresión no confinada (q_u), densidad seca (ρ) y porcentaje de cal adicionado al suelo del batolito antioqueño.

Nota. Fuente propia

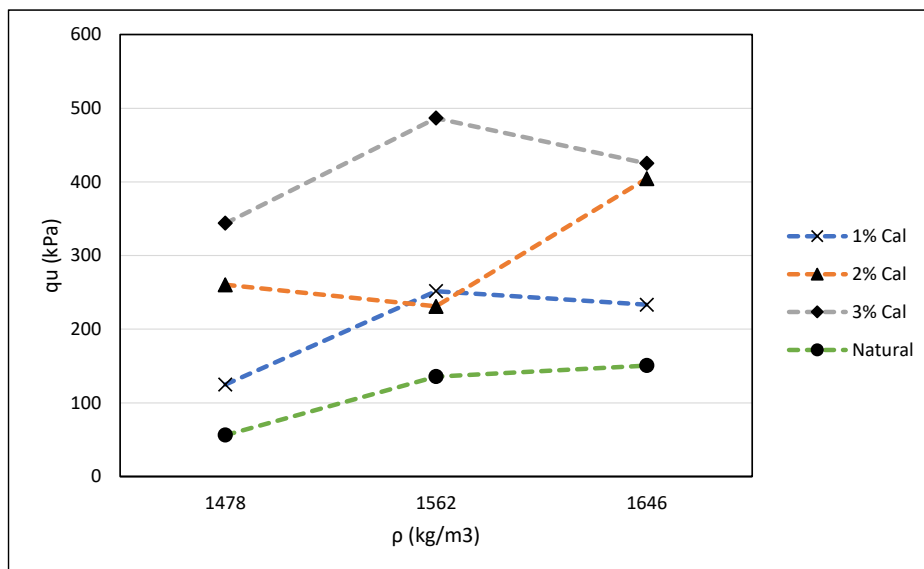


Figura 23 Gráfico de interacción q_u , (ρ) y % de Cal para temperatura de 40°C.

Nota. Fuente propia

En la Figura 24 gráfico de contorno en el cual en el eje x se tiene el porcentaje de cal viva en el rango de 1% a 3%, en el eje y el rango de densidades secas máximas del Proctor estándar y Proctor modificado y la líneas inclinadas representan las resistencias a la compresión no confinada obtenidas para una temperatura de curado de 40°C y tiempo de curado de 7 días, teniendo como utilidad que con una densidad o un porcentaje de cal como objetivo puedo proyectar que resistencia a la compresión no confinada se obtiene, por ejemplo para la densidad del Proctor modificado del suelo (1646 kg/m³) y un porcentaje de cal de 2% un q_u de 350 kPa.

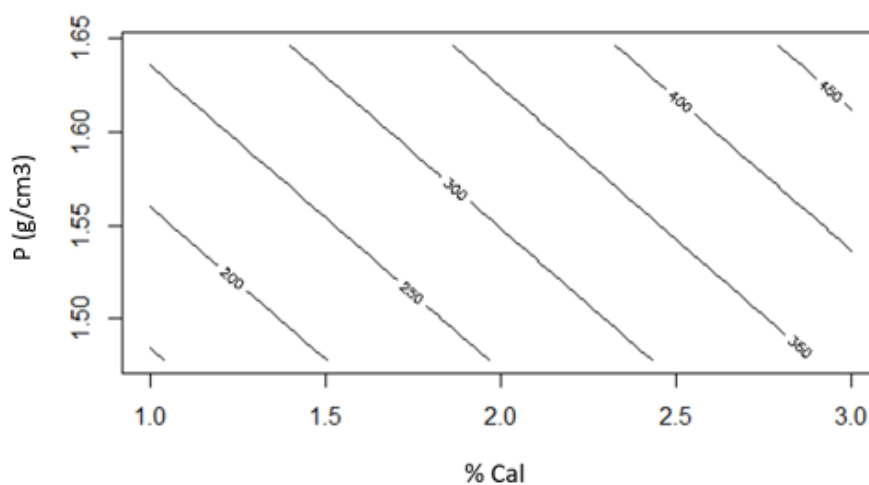


Figura 24 Gráfico de contorno de evaluación ρ , % cal, T° 40°C, T_c 7 días y respuesta de q_u .

Nota. Fuente propia

Para aprobar el modelo, se realizó la validación de los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia de los residuales, tomado de (Gutiérrez, y otros, 2008). Los resultados son presentados en la tabla 6, cumpliendo todos los supuestos con las pruebas mencionadas (Montgomery, 2004).

Con los datos obtenidos y los análisis realizados, se seleccionó como porcentaje de cal óptimo para el suelo del batolito antioqueño el 2%, porque éste presenta un aumento a la resistencia a la compresión no confinada mayor al 50% del suelo estabilizado con cal viva con respecto a la del suelo del batolito antioqueño natural, y la densidad en la cual presentó este incremento es la del Proctor modificado 1646 kg/m^3 . En la densidad intermedia se presenta una caída en la resistencia a la compresión no confinada debido posiblemente a que la cal no reaccionó en su totalidad por falta de homogenización con el suelo antes de realizar el proceso de compactación por presión.

Tabla 6 Resultados de la Validación del Modelo

<i>SUPUESTO</i>	<i>P-VALUE</i>	<i>¿CUMPLE?</i>	<i>Prueba</i>
<i>Normalidad</i>	<i>0,070</i>	<i>Si</i>	<i>Lilliefors normality test</i>
<i>Homocedasticidad</i>	<i>0,259</i>	<i>Si</i>	<i>Goldfeld-Quandt test</i>
<i>Independencias Residuales</i>	<i>0,221</i>	<i>Si</i>	<i>Durbin-Watson test</i>

Nota. Fuente propia.

En la Tabla 7 se presenta el comparativo de la resistencia a la compresión medida en el suelo del batolito antioqueño en estado natural a temperatura de curado de 22°C y 40°C con los resultados de resistencia a la compresión del suelo estabilizado con cal viva al 2% a las mismas temperaturas, y teniendo solo la densidad del Proctor modificado para el análisis, se encontró que para las dos temperaturas el incremento es mayor al 50%, pero en un porcentaje mayor al 150% de incremento en la temperatura de curado de 40°C como se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 7 Resultados comparativos q_u naturales y tratados con cal al 2%.

ρ (kg/m ³)	$q_u N$ (kPa)	T (°C)	% Cal	$q_u T$ (kPa)	$q_u P$ (kPa)	$\Delta q_u T$ (kPa)	$\Delta q_u T$ %
1646	150,69	22°	2%	260,41	249,21	98,51	65%
				257,29			
				229,92			
		40°		292,53	404,50	253,80	168%
				409,21			
				511,75			

Nota. Fuente propia

Donde:

- ρ (kg/m³) = Densidad seca máxima Proctor Modificado.
- $q_u N$ (kPa) = Resistencia a la compresión no confinada del suelo Natural.
- $q_u T$ (kPa) = Resistencia a la compresión no confinada del suelo Tratado con el 2% de cal viva.
- $q_u P$ (kPa) = Promedio resistencia a la compresión no confinada del suelo tratado con el 2% de cal viva.
- T (°C) = Temperatura de curado.

6.2 Ensayo de corte directo condición CD

Con el suelo tratado con cal viva al 2% y densidad del Proctor modificado, definidas en el diseño de experimentos de la compresión no confinada; se procedió a realizar los ensayos de corte directo saturado con la caja inundada del suelo del batolito antioqueño en estado natural, Figura 25; tomando como variable la humedad de compactación y la densidad del Proctor modificado; para comparar las variaciones que se presentan con el suelo tratado con cal viva; los resultados se presentan en el Anexo 3.

En este caso se varió la humedad de compactación en tres niveles; siendo el punto medio 9%, que corresponde a la humedad óptima de compactación del ensayo de proctor modificado y tomando +-4% de la humedad, para garantizar el rango en el cual estuviera la humedad optima del Proctor modificado. En cuanto a las demás variables, para la temperatura se definieron dos niveles; y para el tiempo de curado tres niveles. En la **Tabla 8**, se presentan los valores utilizados para las variables mencionadas, teniendo como factores fijos el porcentaje de cal viva del 2% y la densidad de compactación del proctor modificado.



Figura 25 Imagen de corte directo del suelo natural.

Nota. Fuente propia

Tabla 8 Variables definidas para el ensayo de corte directo CD

<i>TEMPERATURA (°C)</i>	<i>TIEMPO CURADO (días)</i>	<i>HUMEDAD (%)</i>
22°	7	5
40°	14	9
	28	13

Nota. Fuente propia

En la Tabla 9, se presentan los resultados de los ensayos de corte directo en estado saturado con la caja inundada, tanto para el suelo del batolito antioqueño como para el mismo suelo estabilizado con cal viva al 2%, los datos se discriminan respecto a los niveles de la humedad de compactación, temperatura de curado y tiempo de curado.

La humedad no presentó incidencia significativa en los parámetros de resistencia, por el contrario, con la temperatura y el tiempo de curado, el parámetro de resistencia cohesión presenta un incremento significativo, mientras que el ángulo de fricción no sufre cambios significativos.

Tabla 9 Resultados de ensayo de corte directo saturado, temperatura de 22°C y 40°C.

Temperatura 22°C								
Tc (días)			7		14		28	
%W	Cn (kPa)	ϕ_n (°)	Ct (kPa)	ϕ_t (°)	Ct (kPa)	ϕ_t (°)	Ct (kPa)	ϕ_t (°)
5	0.33	34.83	0.19	36.20	0.38	36.30	3.51	33.00
9	0.64	28.20	2.29	32.40	3.20	34.20	7.11	34.00
13	0.86	30.97	1.51	32.60	0.50	36.30	4.00	33.20

Temperatura 40°C								
Tc (días)			7		14		28	
%W	Cn (kPa)	ϕ_n (°)	Ct (kPa)	ϕ_t (°)	Ct (kPa)	ϕ_t (°)	Ct (kPa)	ϕ_t (°)
5	0.86	30.97	0.64	34.80	2.41	35.10	14.39	24.40
9	0.33	34.83	3.17	33.80	10.72	32.40	18.20	32.80
13	0.64	28.20	7.10	30.20	6.01	27.80	9.06	32.90

Nota. Fuente propia

Donde:

- W (%)= Porcentaje Humedad
- C_n (kPa)= Cohesión del suelo natural.
- C_t (kPa)= Cohesión del suelo tratado con cal 2%.
- ϕ_n (°) = Ángulo de fricción del suelo natural.
- ϕ_t (°) = Ángulo de fricción del suelo tratado con cal 2%.
- T_c (días)= Tiempo curado en días.

Con los datos obtenidos, se realizó la verificación para comprobar que se ajusten a una distribución normal, mediante pruebas estadísticas de bondad y ajuste de la herramienta del software R, utilizando el test de Shapiro (*Gutiérrez, y otros, 2008*), realizado de manera independiente para los parámetros de resistencia cohesión y ángulo de fricción obtenidos en los ensayos de corte directo en condición saturado con la caja inundada. Con los datos obtenidos se comprobó que se ajustan a una distribución normal, aplicando pruebas paramétricas como t student o f student; y determinar si las medias y/o varianzas de los grupos de datos presentan variaciones, indicando que la cal viva incide en los parámetros de resistencia del suelo del batolito antioqueño, demostrándose que hay significancia estadística como se muestra en la *Tabla 10*.

Tabla 10 Resultados de pruebas de Bondad y ajuste (Test Shapiro).

	Cn	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct
		22°C - 7 días	22°C - 14 días	22°C - 28 días	40°C - 7 días	40°C - 14 días	40°C - 28 días
<i>p-value</i>	0,804	0,7151	0,7869	0,2383	0,761	0,719	0,816
	ϕn	ϕt	ϕt	ϕt	ϕt	ϕt	ϕt
		22°C - 7 días	22°C - 14 días	22°C - 28 días	40°C - 7 días	40°C - 14 días	40°C - 28 días
<i>p-value</i>	0,817	0,599	0,08063	0,6878	0,40	0,96	0,07

Nota. Fuente propia.

Para la validación de manera estadística de la incidencia de la cal viva en el suelo del batolito antioqueño en los parámetros de resistencia al corte, se aplicó la prueba F de análisis de varianza de dos grupos; utilizada para determinar si la varianza de dos muestras es igual. Esta prueba considera como hipótesis nula (H_0) que las varianzas de los grupos son iguales, y como hipótesis alternativa (H_1) que son diferentes. Este estudio se realizó con la herramienta de análisis de datos de Excel, y de forma independiente para cada parámetro de cohesión y ángulo de fricción; es decir que, se analizó la incidencia de la cal viva al 2% en las muestras de suelo, siendo la muestra 1 el suelo en estado natural y la muestra 2 el suelo tratado con cal viva al 2%.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el parámetro de resistencia al corte Cohesión, se obtuvo un valor *p-value* menor al nivel de significancia (*p-value* <0,005), por lo que se rechaza la hipótesis nula y se considera que las varianzas de los grupos son diferentes, lo que nos indica que la cal viva tiene una incidencia significativa desde el punto estadístico en dicha variable. Ver Tabla 11.

Con respecto al ángulo de fricción, el valor *p-value* obtenido es mayor que el nivel de significancia (*p-value* >0,005), por lo que se aprueba la hipótesis nula y se considera que no hay variación de la varianza de los grupos. Lo que implica, que aunque hubo un pequeño aumento en el valor de ángulo de fricción en el suelo tratado con cal viva al 2%, éste no se considera significativo estadísticamente con tres cifras decimales. Ver Tabla 12.

Los análisis de resultados se presentó gráficamente utilizando gráficas de columnas agrupadas en la Figura 26; el esquema comparativo del parámetro de resistencia al corte en condición saturada con la caja inundada de cohesión del suelo del batolito antioqueño en estado natural (línea horizontal verde) con los resultados de la cohesión tratada con cal viva al 2% en las columnas agrupadas, con los suelos curados a dos temperaturas (22°C y 40°C) y tiempos de curado de 7, 14 y 28 días, en donde se evidenció un aumento significativo de la cohesión. Según datos del Anexo 4.

Tabla 11 Resultado de prueba F , comparación de las variables cohesión natural (C_n) y cohesión tratada con Cal Viva al 2% (C_t)

	C_n (kPa)	C_t (kPa)
Media	0,610	5,243
Varianza	0,070	25,897
Observaciones	3,000	18,000
Grados de libertad	2,000	17,000
F	0,003	
$P(F \leq f)$ una cola	0,003	Se rechaza H_0
Valor crítico para F (una cola)	0,051	

Nota. Fuente propia

Tabla 12 Resultado de Prueba F , Comparación de las Variables ángulo de fricción natural (F_n) y ángulo de fricción con cal viva al 2% (F_t)

	F_n (°)	F_t (°)
Media	31,333	32,900
Varianza	11,101	8,981
Observaciones	3,000	18,000
Grados de libertad	2,000	17,000
F	1,236	
$P(F \leq f)$ una cola	0,315	Se acepta H_0
Valor crítico para F (una cola)	3,592	

Nota. Fuente propia

Se observó en la Figura 26, que el parámetro de resistencia al corte en condición saturada con la caja inundada de la cohesión es mayor con el suelo tratado con cal viva al 2%, cuando se tiene tiempos de curado mayores (28 días) y temperaturas de curado de 40°C, teniendo coherencia con el análisis estadístico donde se demostró que las varianzas de la muestras son diferentes.

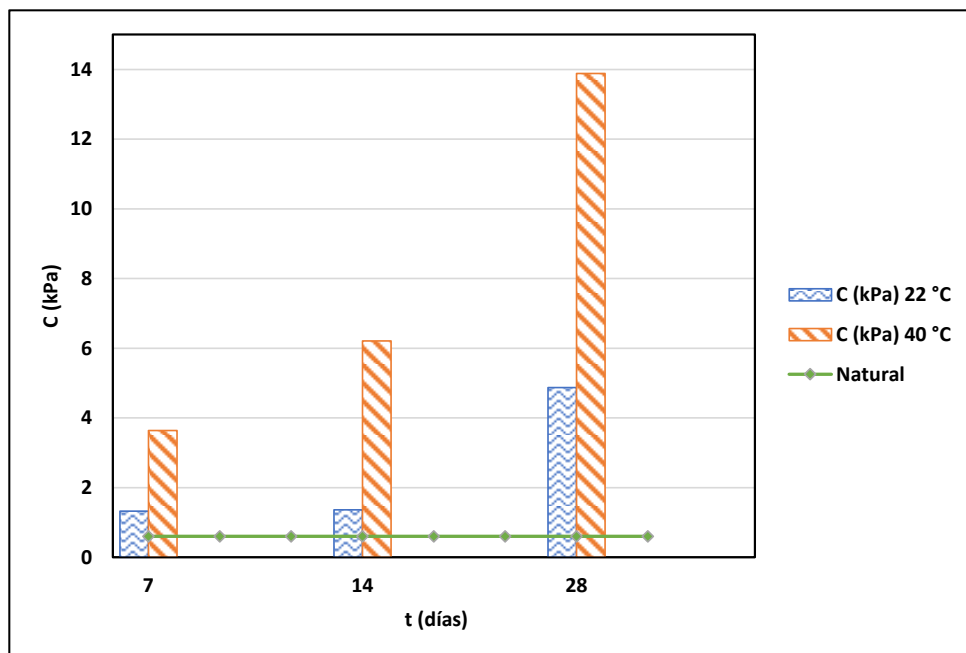


Figura 26 Comparativo cohesión (kPa) del suelo natural y suelo tratado con cal viva al 2%.

Nota. Fuente propia

En la Figura 27, se presenta el comparativo del parámetro de resistencia al corte en condición saturada con la caja inundada de ángulo de fricción, en donde éste presentó un leve aumento en el suelo tratado con val viva; lo cual no es significativo como se demostró en la prueba de Varianzas F, en el cual se evidenció que las varianzas no son diferentes, lo que indica que la cal viva no tiene incidencia en el ángulo de fricción.

Para verificar como varían los parámetros de resistencia al corte en condición saturada con la caja inundada con respecto a la humedad de compactación del suelo tratado con cal viva, en la Figura 28 se presenta la humedad óptima del Proctor modificado cómo variable que presentó un aumento significativo en el parámetro de resistencia al corte saturado en la cohesión, mientras que en el ángulo de fricción no presenta una variación significativa, manteniéndose muy cercano al valor del suelo en estado natural; en condiciones de curado a 40°C y tiempo de curado de 28 días.

En la Tabla 13, se presenta el resumen de los resultados de los parámetros de resistencia al corte saturado con la caja inundada de cohesión y ángulo de fricción en estado natural y tratado con cal viva al 2%, teniendo en cuenta solo los valores correspondientes a la humedad óptima del Proctor modificado del 9%.

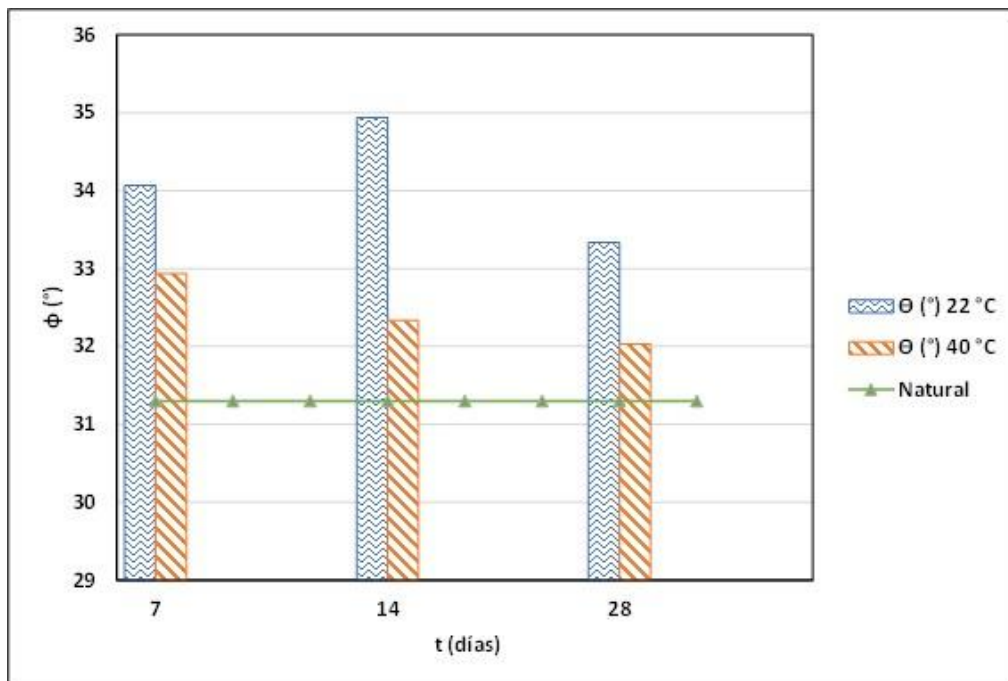


Figura 27 Comparativo ángulo de fricción (°) del suelo natural y suelo tratado con cal viva al 2%.

Nota. Fuente propia

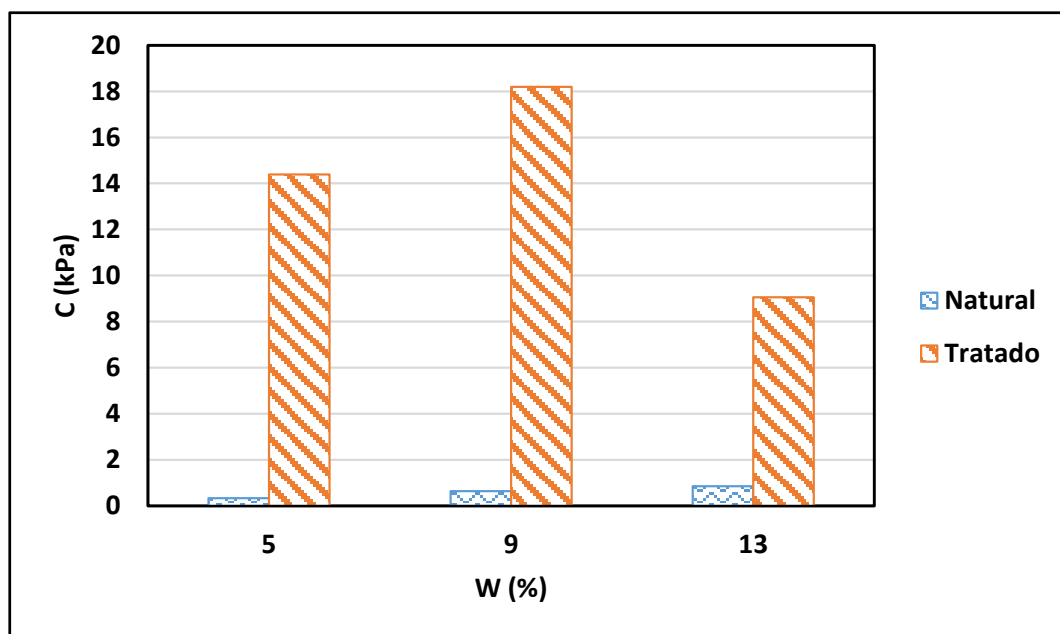


Figura 28 Variación de la cohesión del suelo tratado con cal viva y natural vs % de humedad de compactación.

Nota. Fuente propia.

Tabla 13 Variación de los parámetros de resistencia naturales y tratados con cal viva.

T(°)	Tc (días)	Cn kPa	Ct kPa	ϕ_n (°)	ϕ_t (°)	$\Delta Ct=$ W=9%	$\Delta \phi_t$ W=9%	% ΔCt	% $\Delta \phi_t$
22	7		2,29		32,40	1,64	4,20	256%	15%
	14		3,20		34,20	2,56	6,00	399%	21%
	28	0,64	7,11	28,20	34,10	6,47	5,90	1008%	21%
40	7		3,17		33,80	2,52	5,60	394%	20%
	14		10,72		32,40	10,08	4,20	1572%	15%
	28		18,20		32,80	17,55	4,60	2737%	16%

Nota. Fuente propia.

Tal como se observa, el parámetro de resistencia al corte cohesión del suelo del batolito antioqueño estabilizado con cal viva al 2% es significativamente alto con respecto a la cohesión del suelo en estado natural, superando el 100%; evidenciándose en los resultados del análisis estadístico que se presentó con la prueba F del análisis de varianzas para dos muestras.

Con respecto al parámetro de resistencia al corte saturado con la caja inundada de ángulo de fricción, se observó que presenta un mínimo aumento, pero no es significativo estadísticamente como se demostró en la prueba F, por lo cual la incidencia de la cal viva en el suelo del batolito antioqueño en la fricción no es relevante en condición saturada.

6.3 Ensayos de succión

Se realizaron 9 ensayos de succión según la norma (INVIAS, 2022), para el suelo natural, nueve ensayos al suelo tratado con cal viva al 2% y temperatura de curado de 22°C; y nueve ensayos del suelo tratado con 2% de cal viva y curado a una temperatura de 40°C. Con los resultados obtenidos se hallaron las curvas características de retención de agua para cada estado mencionado, como se muestra en la Figura 29 y los datos en el Anexo 5.

Se evidenció que al ser un suelo limo con plasticidad media, para las humedades gravimétricas más bajas de 7%, no fue posible realizar las pastillas para la ejecución del ensayo en la trayectoria de humedecimiento, estas no tenían la suficiente cohesión que garantizara el remoldeo para seguir con el procedimiento de ensayo según norma succión, las humedades volumétricas para realizar la curva de retención de agua se calcularon dividiendo el volumen de las pastillas de suelo sobre el volumen de agua que presentaron cada una de ellas y multiplicado por cien. La curvas características de retención de humedad se les realizó el ajuste según el modelo empírico de (Van Genuchten, 1980) según lo recomendado (Arango, y otros, 2019).

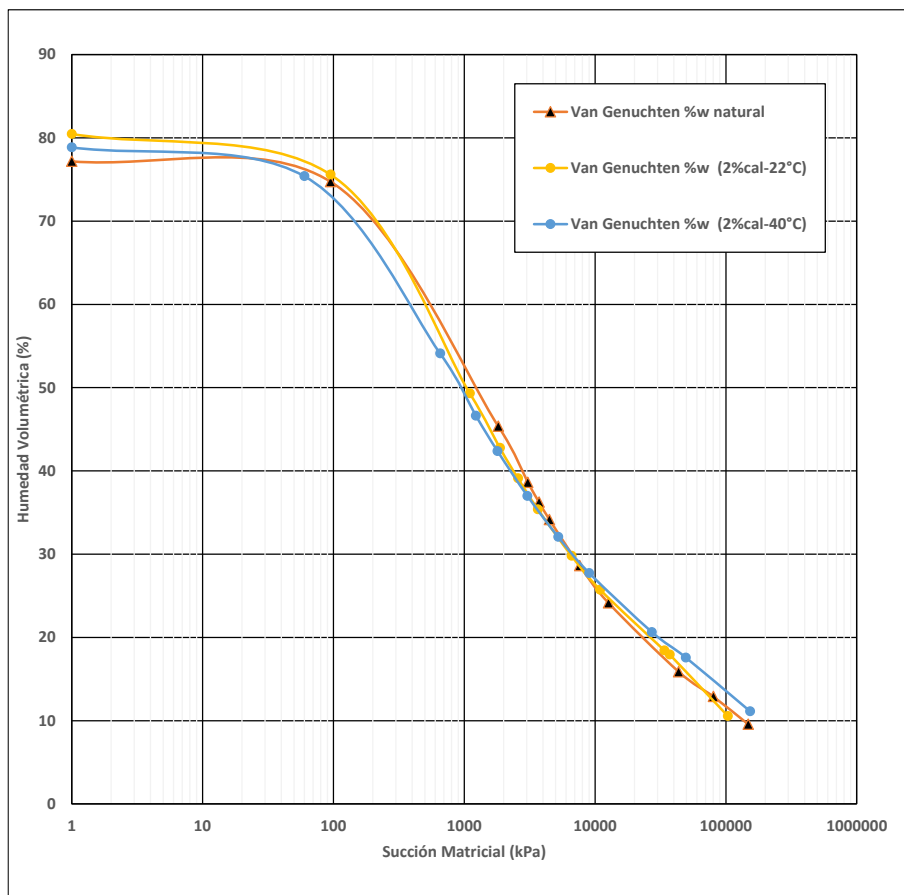


Figura 29 Curvas de retención de agua para suelo natural y tratado con cal viva.

Nota. Fuente propia

6.4 Ensayos de corte directo no saturados

Para los ensayos de corte directo en condición no saturados con la caja sin inundar se tomó de referencia el procedimiento de la norma (INVIAS, 2022) con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días a una temperatura de 22°C y 40°C, y se realizó el corte después de aplicar la fuerza normal y medir la altura en la cual se comenzaba el ensayo de corte directo para después calcular la humedad volumétrica de la muestra, obteniéndose los siguientes resultados como se pueden observar en la Tabla 14, y en Figura 30 de la cohesión en estado saturado con la caja inundada y no saturado con la caja sin inundar se presentó una variación significativa mayor a 20%, y en la Figura 31 se evidenció como el ángulo de fricción presenta una un aumento mayor al 15% en la condición no saturada con respecto a la condición saturado, debido a la cementación que produce la cal en tiempo.

Tabla 14 Parámetros de resistencia no saturados

T °C	Tiempo de curado (días)	Humedad (%)	ρ (kg/m ³)	C (kPa)	ϕ °	Humedad final (%)	Humedad volumétrica (%)	Succión matricial Ψ (kPa)
22	7	9	1646	3.23	36.6	7.4	12.6	75000
22	14	9	1646	3.50	36.8	7.4	12.7	75000
22	28	9	1646	3.43	30	7.3	12.4	78000
40	7	9	1646	11.97	42.8	7.8	13.4	110000
40	14	9	1646	15.50	50.3	7.5	12.7	120000
40	28	9	1646	12.35	43.1	7.3	12.4	130000

Nota. Fuente propia

En la Tabla 15 se presenta los datos obtenidos de los ángulos de fricción que define el aumento de la resistencia al cortante con el aumento de la succión ϕ^b , calculados a partir de las succiones del suelo estabilizado con cal viva y los parámetros de resistencia al corte cohesión, para temperaturas de curado de 22°C y 40°C, y tiempos de curado de 7, 14 y 28 días.

Tabla 15 Ángulos de fricción con el aumento de la succión

Temperatura		22 °C			40 °C		
Días (curado)	Ψ (kPa)	C (kPa)	ϕ^b	Ψ (kPa)	C (kPa)	ϕ^b	
7	0	2.2	0.05	0	3.17	0.0031	
	75000	3.23		110000	11.97		
14	0	3.2	0.05	0	10.72	0.0029	
	75000	3.5		120000	15.5		
28	0	7.11	0.03	0	18.2	0.0018	
	78000	3.43		130000	12.35		

Nota. Fuente propia

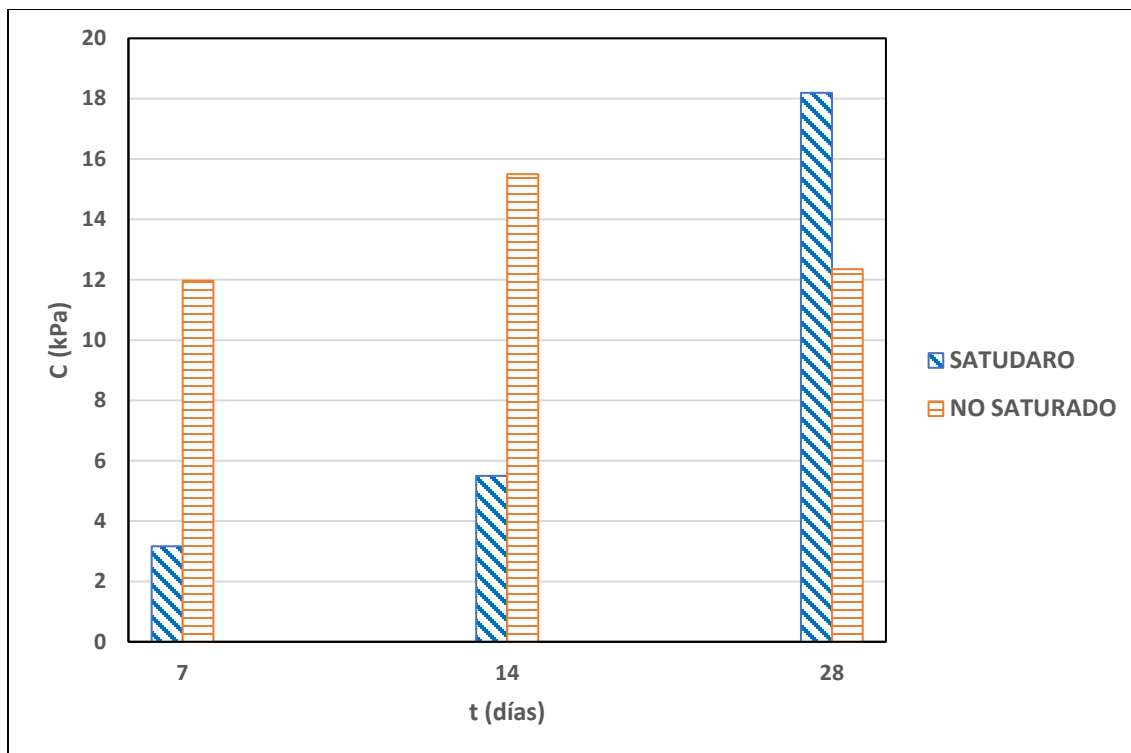


Figura 30 Cohesión en condición saturado y no saturado

Nota. Fuente propia.

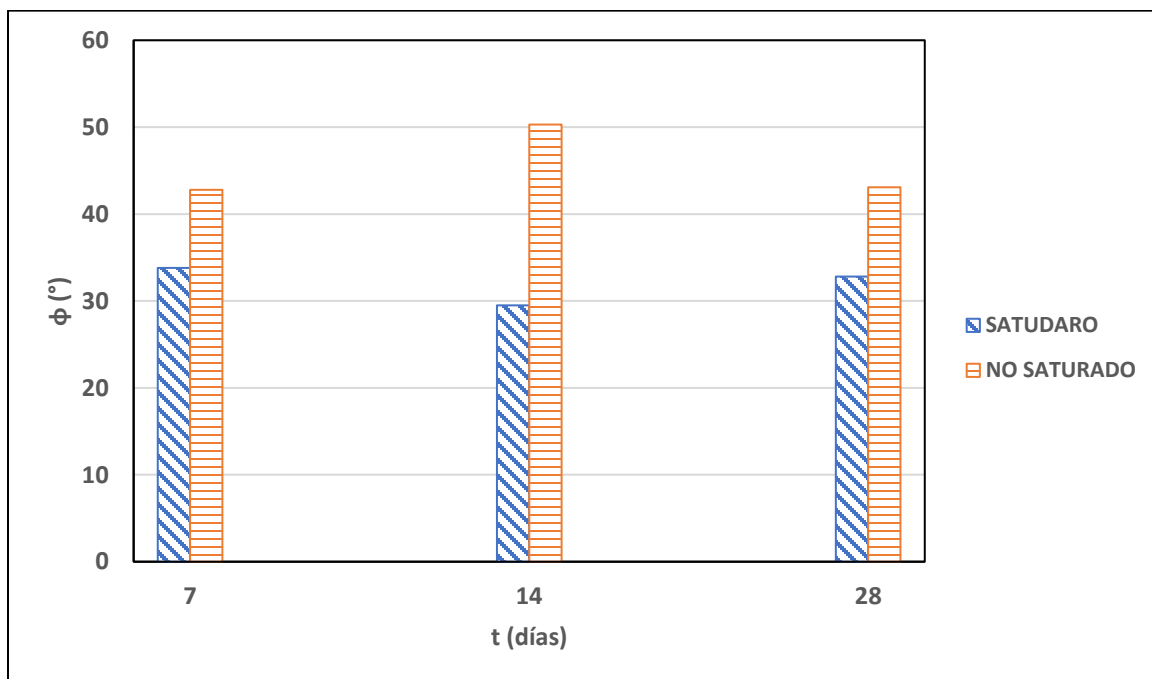


Figura 31 Ángulo de fricción en condición saturado y no saturado.

Nota. Fuente propia.

A partir de los resultados de corte directo mostrados anteriormente se determinó el ángulo ϕ^b . Los resultados obtenidos de ϕ^b fueron menores a 1° , debido a que las succiones matriciales fueron muy altas, además las cohesiones del suelo tratado con cal viva en condición saturado y no saturado tuvieron un aumento de aproximadamente 20%, y se presentó un aumento mayor al 15% en los ángulos de fricción interno, debido a la cementación del suelo con la cal presentados anteriormente en la Tabla 14, a diferencia de la literatura en la cual se dice que los ángulos de fricción tienden a permanecer aproximadamente iguales (Arango, y otros, 2019). En el Anexo 6 se presentan los resultados de corte directo en condición no saturado con la caja sin inundar.

6.5 Aplicación caso real de terraplén

Con el fin de aplicar los resultados obtenidos en esta investigación, se utilizó el diseño de un terraplén de un proyecto vial ubicado en el Departamento de Antioquia, cuya litología se desarrolla en Rocas del Batolito Antioqueño. Los parámetros de resistencia utilizados corresponden fueron promedio de los valores de cohesión y ángulo de fricción resultantes de los ensayos de corte directo en condición saturada con la caja inundada, tanto para el suelo en condición natural como estabilizado con cal viva al 2% y con los parámetros de resistencia en condición no saturados con temperaturas de curado de 40°C teniendo en cuenta para este caso la succión matricial que se midió en la trayectoria de humedecimiento durante la ejecución de los ensayos, para así realizar tres modelaciones diferentes y compararlas. Para la modelación del terraplén se definió como Factor de seguridad fijo de 1.5 para cuatro alturas fijas de 5m, 10m, 15m y 20m, variando la pendiente del terraplén y así obtener los volúmenes de suelo tanto natural como tratado y poder realizar el comparativo.

En la Tabla 15, se presentan los parámetros de resistencia utilizados para los tres análisis de estabilidad del terraplén, estos corresponden a los valores promedio de los resultados de los ensayos de corte directo a 22°C en estado natural y a 40°C para el suelo estabilizado con cal viva al 2% en condición saturado y no saturado, donde, C =cohesión del suelo, ϕ =ángulo de fricción del suelo, ϕ^b = ángulo que define el aumento de la resistencia al cortante con el aumento de la succión (Díaz-Coral, y otros, 2020) y Y =Peso Específico del suelo, utilizando el software SLIDE. En la Figura 31 se observa la modelación del terraplén con el suelo en estado natural en condición saturado, en la Figura 32 para el suelo tratado con cal al 2% en condición saturado con

temperatura de curado 40 °C y en la Figura 33 para suelo tratado con cal al 2% en condición no saturado y temperatura de curado de 40°C.

Tabla 16 Parámetros de resistencia al corte utilizados en el modelo terraplén.

Condición saturado	Temperatura de curado (°)	C (kPa)	ϕ (°)	Y (kN/m ³)	
Suelo Natural	22	0.61	31	16	
Suelo 2% cal viva	40	7.91	32	19	
Condición no saturado	Temperatura de curado (°)	C (kPa)	ϕ (°)	Y (kN/m ³)	ϕ^b
Suelo 2% cal viva	40	12.00	43	19	1

Nota. Fuente propia

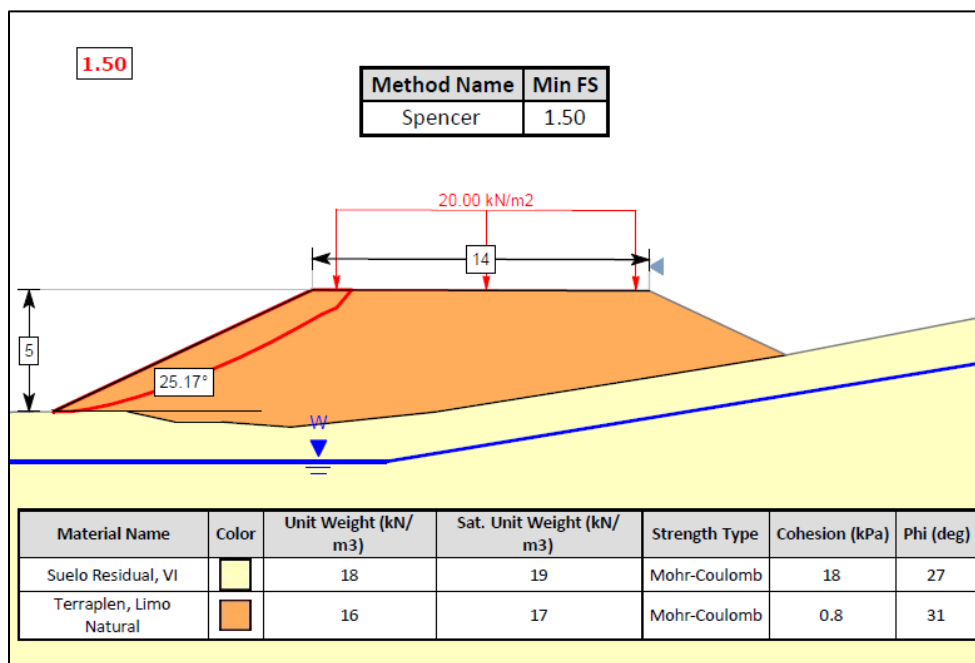


Figura 32 Modelo terraplén suelo natural

Nota. Fuente propia

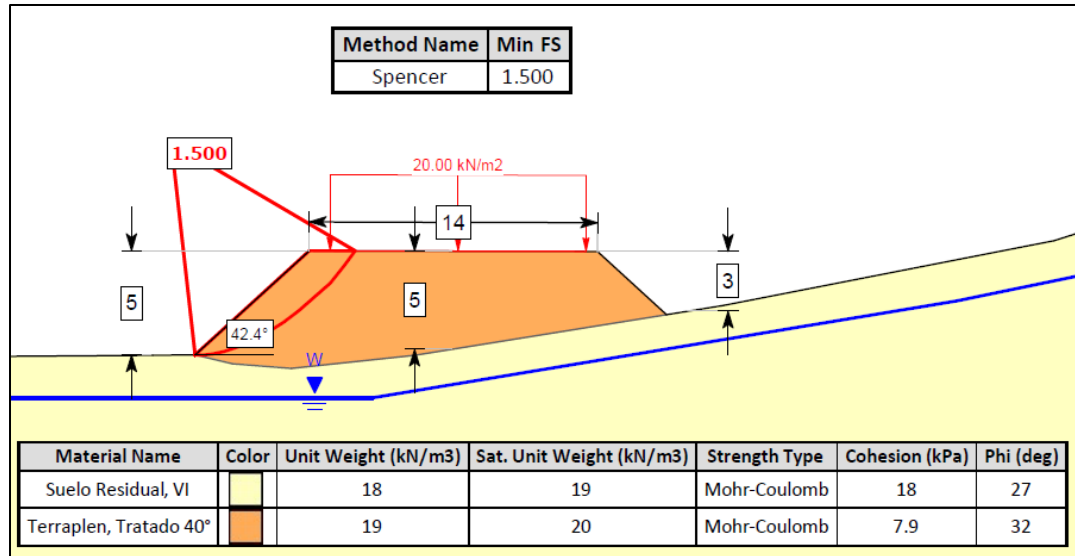


Figura 33 Modelo terraplén suelo tratado saturado

Nota. Fuente propia

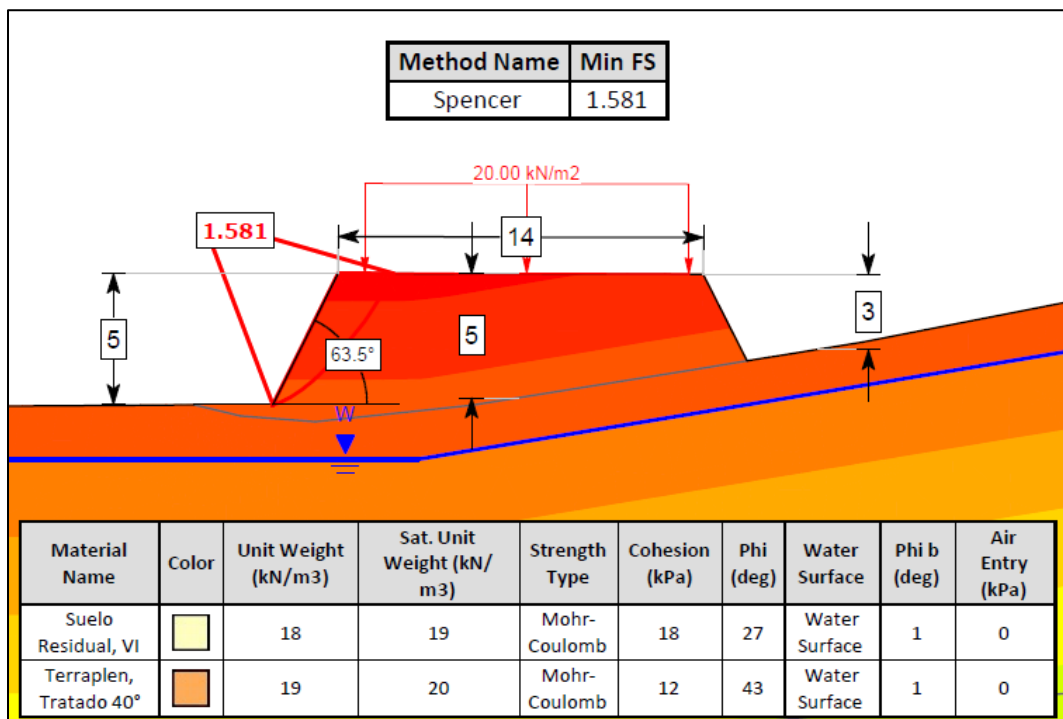


Figura 34 Modelo terraplén suelo no saturado

Nota. Fuente propia

Se realizó un análisis de sensibilidad variando la geometría del terraplén en cuanto a pendiente, utilizando los parámetros de resistencia del natural y, tratado con cal viva al 2% en condición saturado y no saturado, la variable respuesta en este caso es el factor de seguridad, debe ser igual o muy cercano 1.5 en condición estático, encontrando un aumento significativo de la pendiente cuando se modela con suelo estabilizado con cal viva en condición saturado y no saturado comparado con las pendientes del modelo del suelo en estado natural. A continuación se presentan en la Tabla 16 los resultados obtenidos para la modelación y obtención de los volúmenes necesarios para la construcción de 1 m de longitud de terraplén, variando las pendientes para las alturas definidas de 5m, 10m, 15m y 20m con el suelo de batolito antioqueño en estado natural (SN), tratado con cal viva en estado saturado (ST-S) tratado con cal viva en estado no saturado (ST-NS), en el Anexo 7 se presentan los datos para el cálculo de los volúmenes geoméricamente.

Tabla 17 Resultados de modelación con volúmenes de suelo.

Altura (m)	5	10	15	20
Volumen (m ³) SN	106	250	406	620
Volumen (m ³) ST-S	88	230	391	530
Volumen (m ³) ST-NS	76	177	286	449

Nota. Fuente propia.

Los volúmenes se calcularon teniendo en cuenta las alturas definidas, las pendientes calculadas y el ancho definido, encontrando que para construir 1 m de longitud de terraplén con suelo del batolito antioqueño en estado natural (SN), tratado con cal viva en condición drenado (ST-S) y tratado con cal viva en condición no saturado (ST-NS), se presentan en la Figura 34, evidenciándose que los suelos estabilizados con cal viva presentan una disminución significativa en los volúmenes, con mayor incidencia en los suelos estabilizados no saturados, debido en gran medida por la cementación que la cal produce al suelo e incrementa el ángulo de fricción interno.

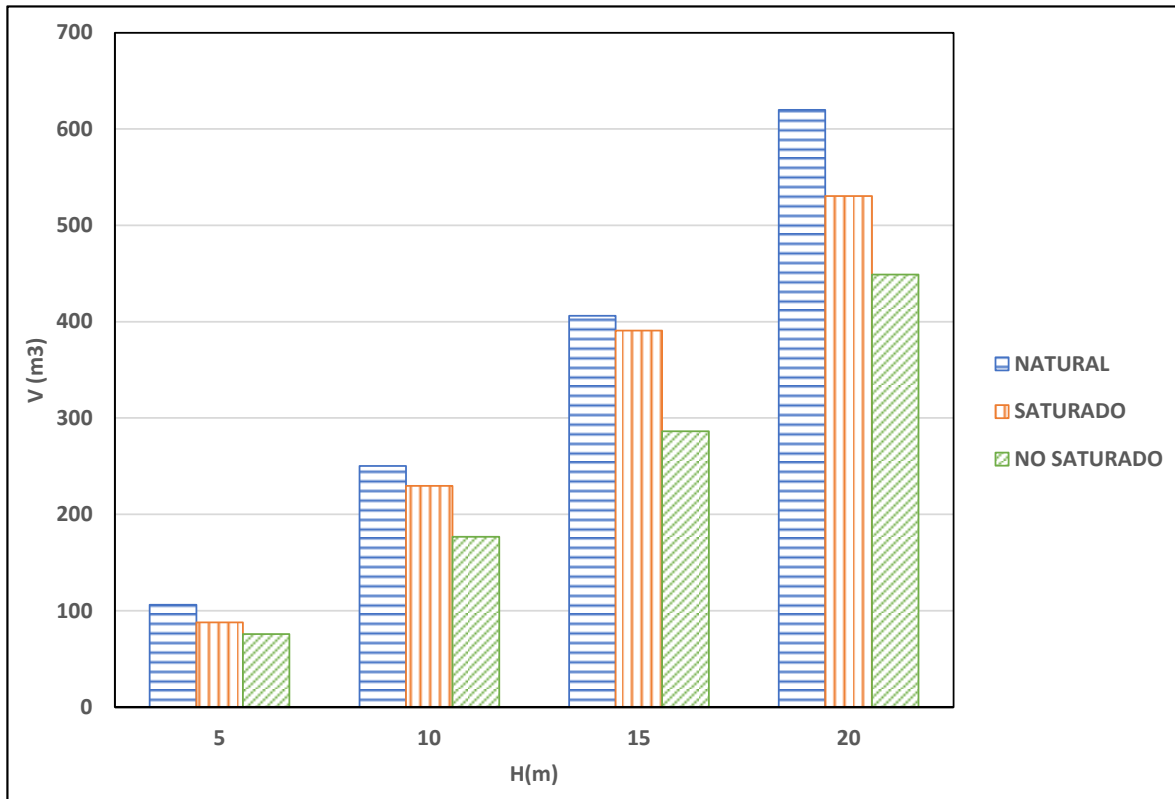


Figura 35 Variación de volúmenes según suelo, condición y altura de terraplén

Nota. Fuente propia.

7. CONCLUSIONES

Con el uso de suelos estabilizados con cal se puede obtener una reducción de volumen de material a utilizar de un 15% por cada metro de longitud de construcción, lo que indica que la estabilización de suelos con cal viva impacta positivamente en los aspectos ambientales, técnicos y económicos en el desarrollo de la infraestructura vial.

Por el gran impacto que puede generarse al utilizar materiales no renovables en la construcción de vías y especialmente terraplenes, cuando no se pueda dar uso a los materiales que la obra va generando, tales como suelos de cortes por dónde va el trazado de una vía, se deba recurrir a nuevas fuentes, genera un impacto ambiental y económico. Es por esto por lo que es recomendable mejorar los suelos tratándolos con adiciones que hacen que cumplan los parámetros de calidad y resistencia, tal como la estabilización con cal viva para suelos residuales del batolito antioqueño.

Los métodos experimentales utilizados para la investigación fueron los ensayos de laboratorio compresión confinada para determinar la resistencia a la compresión del suelo en estado natural y tratado con cal viva, y se definió el porcentaje de cal óptimo de 2% y la densidad de compactación del Proctor modificado 1646 kg/m^3 en la cual el suelo tratado aumentaba su resistencia en más del 50% de la obtenida en estado natural, determinado estadísticamente con análisis ANOVA. Seguidamente se realizaron ensayos de corte directo tomando el porcentaje de cal viva óptimo con la densidad de compactación del Proctor modificado que fue la que mejor comportamiento de resistencia a la compresión tuvo.

Los resultados obtenidos de los parámetros de resistencia al corte cohesión y ángulo de fricción del suelo del batolito antioqueño estabilizado con cal viva al 2% en condición saturado con la caja inundada, a diferentes humedades de compactación, tiempos de curado y temperaturas de curado; se evidencia que la cohesión aumenta en más del 100% comparada con la del suelo en estado natural, mientras que el parámetro de ángulo de fricción no sufre un cambio significativo; demostrado mediante método estadístico de análisis de varianzas F. Para los parámetros de resistencia al corte de cohesión y ángulo de fricción en condición no saturado con la caja sin inundar el suelo estabilizado con cal viva al 2% se evidencia que la cohesión se incrementa en más del 100% igual que el suelo en condiciones saturadas, y en el ángulo de fricción se presenta un aumento mayor al 30% con respecto al suelo en estado natural y estabilizado con cal viva en condiciones saturadas.

En la evaluación de la estabilidad de un terraplén típico usando el suelo del batolito antioqueño sin tratar y tratado con cal viva al 2%, en condición saturada y no saturada se

evidenció que los volúmenes necesarios para la construcción de la estructura de terraplén, con diferentes alturas y de 1 m de longitud presentan una disminución de aproximadamente 15% de volumen de material, si se utiliza suelo tratado con cal viva en condición saturado, comparado con el suelo en estado natural; y cuando se utiliza el suelo tratado en condición no saturado se obtiene una reducción de volumen de material aproximadamente de 20%, variando las pendientes para garantizar el cumplimiento del factor de seguridad igual o muy cercano a 1.5, teniendo alturas definidas para todos los casos de modelación. En la modelación del terraplén en estado no saturado se concluye que al presentar unas succiones altas los ángulos ϕ^b son menores a 1 incidiendo positivamente en la estabilidad del terraplén.

Con la investigación presentada se trata de hacer una contribución a la utilización de los suelos con características iguales o similares al del batolito antioqueño estabilizados con cal viva, con lo cual se mejoran las propiedades geomecánicas necesarias para la construcción de vías utilizando materiales que se van generando por cortes o movimiento de tierras en las obras y se disminuye la utilización de nuevas fuentes no renovables, teniendo un impacto medioambiental positivo para el planeta.

8. REFERENCIAS

Alvarez Pizco Brian David, Rojas Ochoa Luis Fernando y Diaz Cruz Luis Fernando Comparación de la salternativas de estabilización con cal, cemento, silicato de sodio y aceite sulfonado para vías terciarias con presencia de arcilla en la región de la Orinoquía [Arte]. - Villavicencio : Universidad Santo tomás.

Ankit Singh Negi [y otros] Soil Stabilization Using Lime [Journal] // International Journal of Innovative Reserarch in Science, Engineering and Technology. - 2013. - págs. 448-453.

Arango Melissa, Parra Melissa y Hidalgo César Mechanical and Hydraulic Behaviour of Unsaturated of Unsaturated Residual Soils [Journal] // iopscience. - Medellín : [s.n.], 2019. - Vol. 221. - págs. 1-11.

ASTM International ASTM Standard Test [Libro]. - West Conshohocken, PA : ASTM Internatinal, 2004.

Bai F y Sihong Liu Measurement of the Shear Strength of an Expansive Soil by Combining a Filter Paper Method and Direct Shear Tests [Journal]. - Nanjing : Geotechnical Testing Journal, 2012. - 1 : Vol. 35.

Bao Weixing [y otros] Experimental study on strength characteristics and internal mineral changes of Lime-stabilized loess under High-Temperature [Journal] // Construction and Building Materials. - 2022. - Vol. 351.

Bicalho Kátia V., Boussafir Yasmina y Cui Yu-Jun Performance of an instrumented embankment constructed with lime-treated silty clay during four-years in the Northeast of France [Journal] // Transportation Geotechnics. - Francia : [s.n.], 2018. - Vols. 17-parte B. - págs. 100-116.

Board Transportation Research Lime Stabilization Reactions, Properties, Desing and Construction. [Journal]. - Washington D.C. : National Research Council, 1987.

Botero Arango Gerardo Servicio Geológico Colombia - SGC [En línea]. - 2023. - <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=10607>.

Calcinor Calcinor.com [En línea]. - Calcinor, 2020. - 04 de 2023. - <https://www.calcinor.com/es/actualidad/reviews-producto/cal-estabilizacion-de-suelos..>

Calidra S.A. ESTABILICAL OX = Estabilical OX. - Ciudad de México : [s.n.], 27 de marzo de 2020. - Vol. 4. - págs. 1,11.

CCP14 Norma Colombiana de Diseño de Puentes [Libro]. - Bogotá D.C : INVIAS, 2014.

Chauvert Pablo y Baptiste Albertone Transporte de carretera en América Latina: evolución de la infraestructura y de sus impactos entre 2007 y 2015 [En línea] // Cepal. - 08 de febrero de 2019. - <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/44440>.

Chowdhury Rashedul H. y Azam Shahid Unsaturated shear strength properties of a compacted expansive soil from Regina, Canada [Journal]. - Regina : Innovative Infrastructure Solutions, 2016. - 1 : Vol. 47.

Consoli Nilo Cesar [y otros] Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil [Journal] // Transportation Geotechnics. - Rio Grande, Brasil : [s.n.], 2014. - Vol. 1. - págs. 129-136.

CORNARE CORNARE [En línea] = POMCA Rio Nare . - 2022. - https://www.cornare.gov.co/POMCAS/planes-de-ordenacion/DocumentosFasesNare/Diagnostico/Capitulo4.Caracterizacion-fisico-biotica/4.2_Geol_4.3.Hidrogeol.pdf.

Das Braja M. Fundamentos de ingeniería de cimentaciones [Libro] / ed. Cervantes González Sergio R. y Ramírez Rosas Omar A.. - México D.F : Cengage, 2012. - 7 : Vol. 7 : págs. 1, 794.

Das Geetanjali [y otros] Compressive strength and microstructure evolution of lime-treated silty soil [Journal] // ELSEVIER. - 2021. - pág. 13.

Di Sante Marta [y otros] Influence of delayed compaction on the compressibility and hydraulic conductivity of soil–lime mixtures [Journal] // Engineering Geology. - 2015. - Vol. 185. - págs. 131-138.

Díaz Coral José Miguel Envolvente de ruptura al corte de suelos no saturados a partir de ensayos simples [Arte]. - Medellín : Universidad Nacional de Colombia.

Díaz-Coral José Miguel, Valencia-González Yamile y De Carvalho Jose Camapum Validación de una metodología para obtener la envolvente de ruptura al esfuerzo cortante en suelos no saturados compactados [Journal] // CIENCIA Y TECNOLOGÍA. - 2020. - págs. 290-301.

Ederson Jorge [y otros] Spectrofluorimetric analyzes of thiamine and riboflavin in monofloral honey varieties of africanized bees (*Apis mellifera*) [Journal] // Elsevier. - Crato : [s.n.], 2021.

Fan Yakun, Zheng Mingxin y Wu Junhua A study on the shear strength characteristics and microscopic mechanism of coal-bearing soil under dry-wet cycles [Journal]. - Nanchang : Frontiers in Earth Science, 2023. - 1 : Vol. 10.

Fredlund D. G., Morgenstern N. R. y Widger R. A. The shear strength of unsaturated soils. [Libro]. - [s.l.] : Canadian Geotechnical Journal, 1978.

Gutiérrez Humberto y De la Vara Román Análisis y diseños de experimentos [Libro]. - México DF : McWraw - Hill, 2008. - Vol. 2 : págs. 6,564.

INVIAS Especificaciones generales de construcción de carreteras. - [s.l.] : Instituto Nacional de Vías - INVÍAS, 17 de 12 de 2022. - págs. 1-1345.

Le Rugino B. [y otros] Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions [Journal] // Engineering Geology. - Francia : [s.n.], 2010. - 20-28 : Vol. 118. - pág. 9.

Llano Eliana, Ríos Diana y Restrepo Gloria Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado. Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad [Journal] // TecnoL. - septiembre de 2020. - 49 : Vol. 23. - págs. 185 -199.

Lugo Alvarez Diego Emel Combinación de los métodos Janbú-Spencer en el análisis de estabilidad de taludes para el empleo de sistemas flexibles de alta resistencia en la construcción de carreteras. [Arte]. - Lima : Universidad nacional Federico Villa Real.

Makki-Szymkiewicz Lamis [y otros] Evolution of the properties of lime-treated silty soil in a small [Journal] // Engineering Geology. - 20 de March de 2015. - pág. 15.

McDowell Chester Stabilization of Soils with Lime, Lime-Flyash, and Other Lime Reactive Materials [Journal] // Highway Research Board Bulletin. - 1959. - págs. 231: 60-66.

Mesa Lavista Milena y Tejada Piusseaut Eduardo Análisis de la estabilidad de taludes en terraplenes mediante los métodos de equilibrio límite y el método de elementos finitos [Journal] // RCI. - 2018. - pág. 8.

Meza Victoria Elena Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria [Journal] // Boletín de ciencias de la tierra. - 2012. - pág. 16.

Montgomery Douglas C. DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS [Libro]. - MEXICO D.F. : LIMUSA S.A, 2004.

Narasimhan T. Central Ideas of Buckingham (1907) [Journal] // Vadose Zone Journal. - 2007.

Parra Gómez Manuel Gerardo ESTABILIZACION DE UN SUELO CON CAL Y CENIZA VOLANTE [Arte]. - Bogotá : Universidad Católica de Colombia.

Parra Obando Melissa Modelo para el estudio de la amenaza de movimientos en masa detonados por lluvias en el barrio Llanaditas de la ciudad de Medellín [Arte]. - Medellín : Univesidad Nacional de Colombia.

Patil Ujwalkumar D. [y otros] Modeling critical-state shear strength behavior of compacted silty sand via suction-controlled triaxial testing [Journal] // Engineering Geology. - 2017.

Patiño Restrepo Juliana EFECTO DE LOS CICLOS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO EN LA SUCCIÓN, DE UN SUELO RESIDUAL DE ANFIBOLITA PROVENIENTE DEL OCCIDENTE DE MEDELLIN EN ESTADO NATURAL Y COMPACTADO [Arte]. - Medellín : Universidad Nacional de Colombia.

Połomski Maksymilian y Wiatkowski Mirosław The Use of Lime for Drainage of Cohesive Soils Built into Hydraulic Engineering Embankments [Journal] // MDPI. - 16 de November de 2022. - pág. 17.

Rivera Jhonathan F. [y otros] Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión) [Journal] // Informador Técnico. - 2020. - pág. 25.

Rubio María José y Berlanga Vanesa Cómo aplicar las pruebas paramétricas bivariadas t de Student y ANOVA en SPSS. Caso práctico. [Journal] // REIRE. - 2011. - pág. 18.

Shen Yuan-shun [y otros] An experimental investigation on strength characteristics of fiber-reinforced clayey soil treated with lime or cement [Journal] // Construction and Building Materials. - Zhenjiang : [s.n.], 2021. - Vol. 294.

Skempton A.W. Long-Term Stability of Clay Slopes [Libro]. - 1964.

Songa Young-Suk y Hongb Seongwon Effect of clay minerals on the suction stress of unsaturated soils [Journal] // Engineering Geology. - 2020.

Suárez Jaime Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales [Libro]. - Bucaramanga : Ingeniería de Suelos Ltda, 1998.

Thomé Jucá José Fernando Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada [Libro]. - Madrid : Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1990. - Vol. 1.

Thompson M.R Shear Strength and Elastic Properties of Lime-Soil Mixtures [Arte]. - Washington, D.C. : National Research Council.

Tulloch Walter, Hudson W. Ronald y Kennedy Thomas Evaluation and prediction of the tensile properties of lime-treated materials [Arte]. - Texas : The Texas Highway Department.

UMV Unidad administrativa especial de rehabilitación y mantenimiento vial. [En línea]. - 03 de 2020. - <https://www.umv.gov.co/portal/wp-content/uploads/2020/06/Estabilizacion-MGR-con-adicion-de-cal-1.pdf>.

Van Genuchten M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [Journal] // Soil Science Society of America Journal. - 1980. - pág. 7.

Van Genuchten M.T A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. [Libro]. - 1980. - 5 : Vol. 44 : págs. 892-898.

W. Bishop A. The principle of effective stress. [Journal] // Teknisk Ukeblad. - 1959.

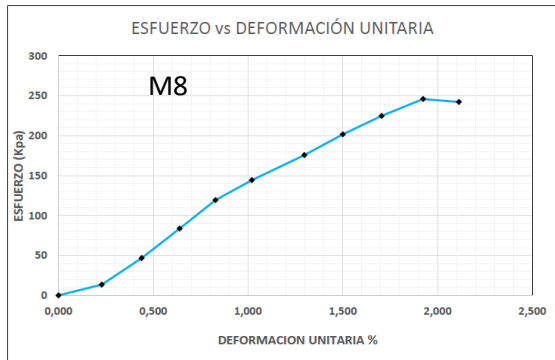
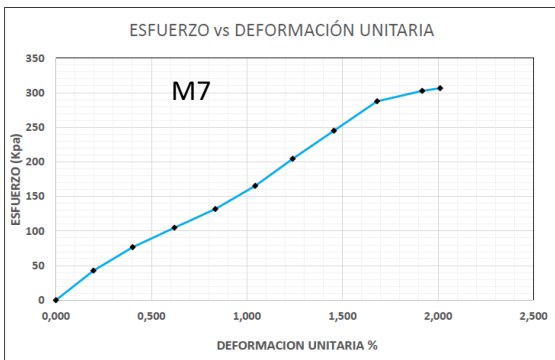
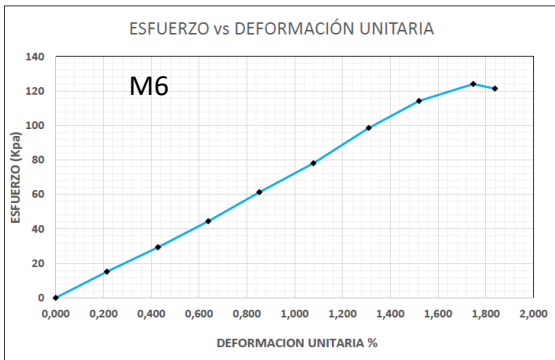
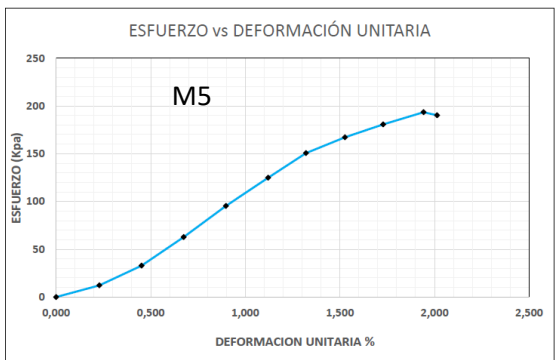
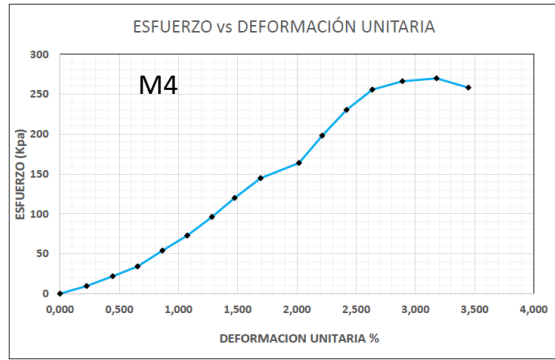
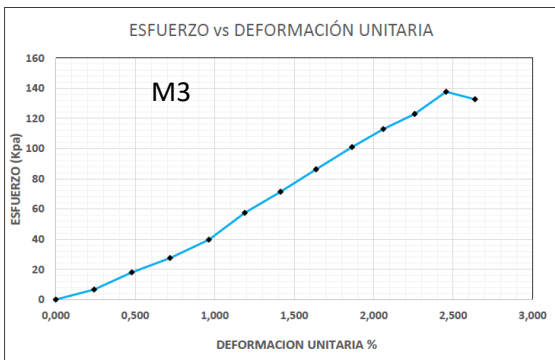
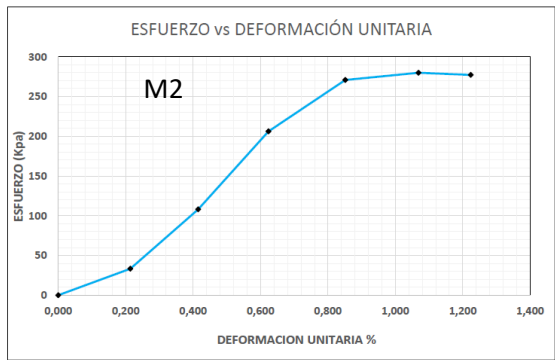
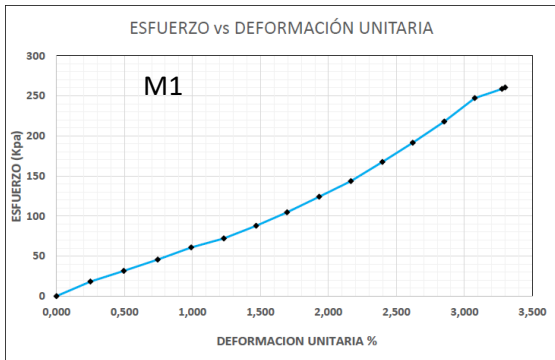
Yepes Piqueras Víctor Materiales que se pueden emplear en un terraplén [En línea] // Universidad Politecnica de Valencia. - 7 de abril de 2021. - <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/terraplenes/>.

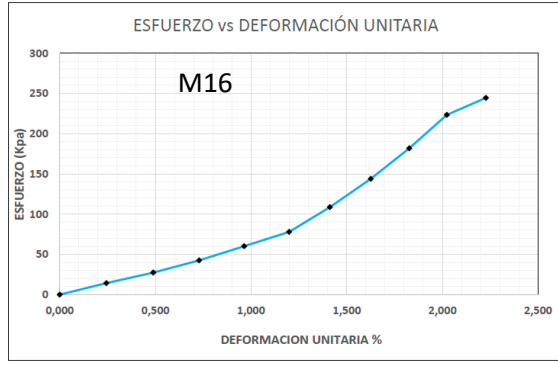
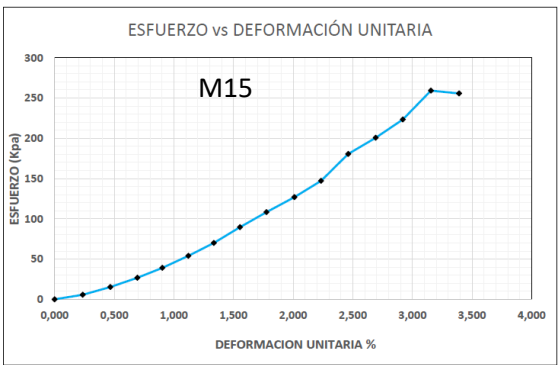
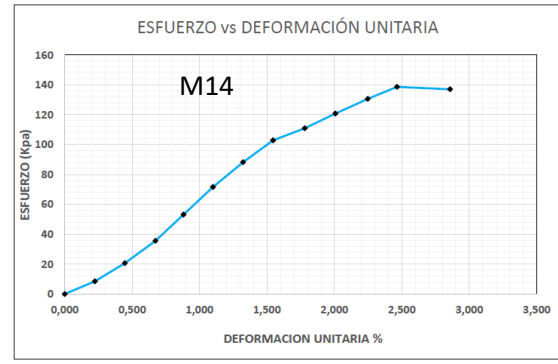
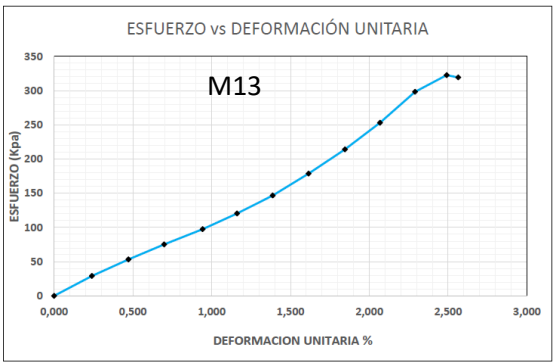
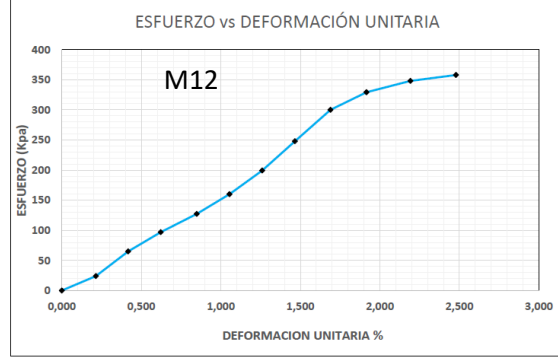
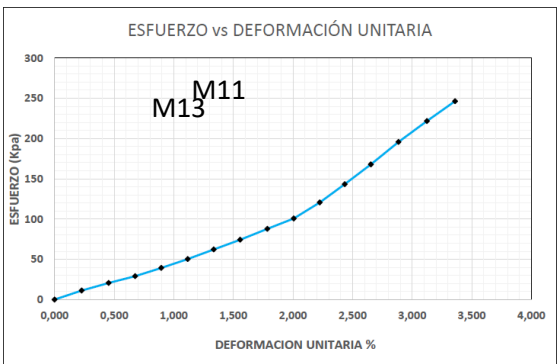
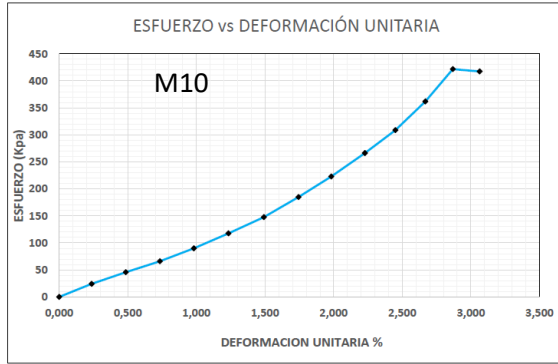
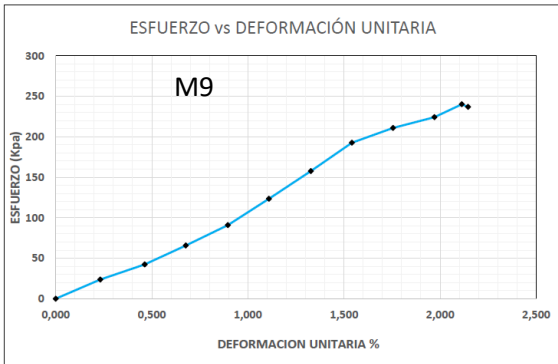
ANEXOS

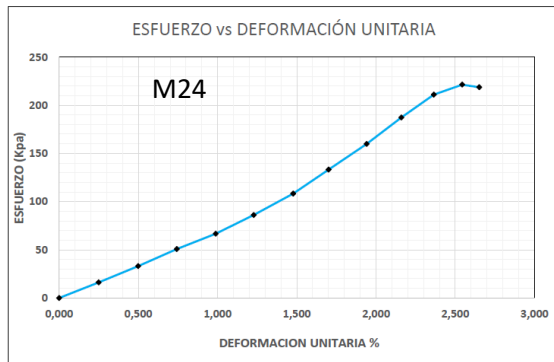
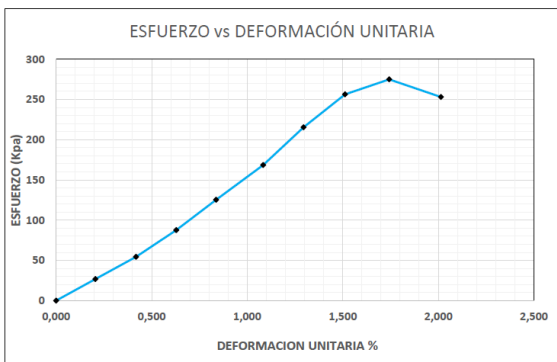
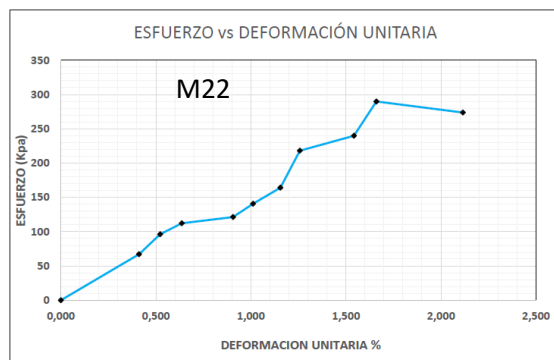
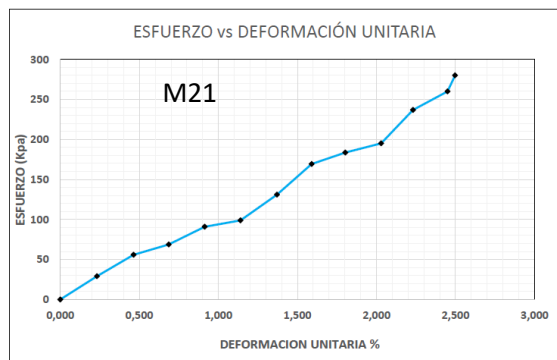
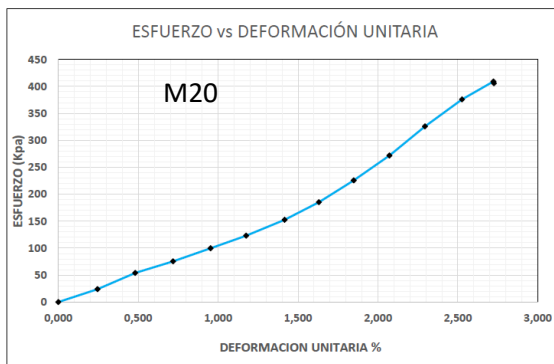
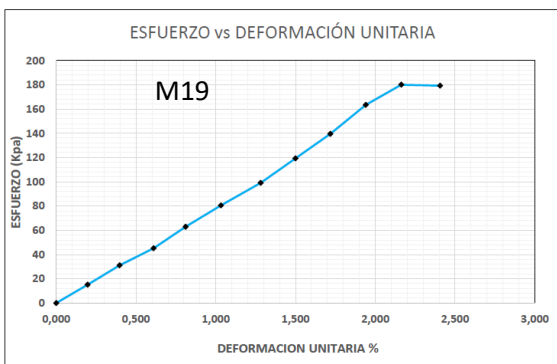
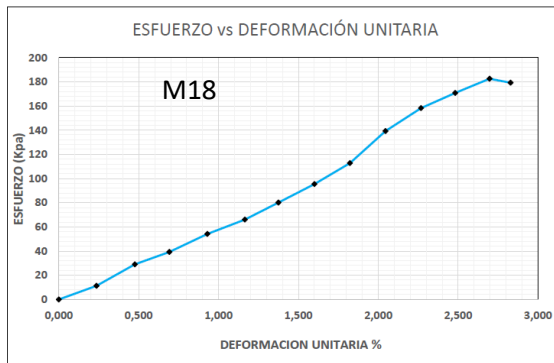
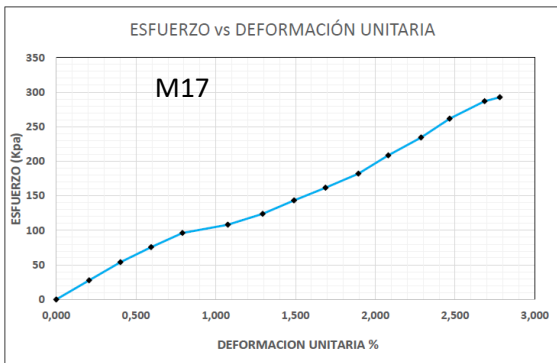
Anexo 1 Resultados de compresión no confinada de diseño de experimentos

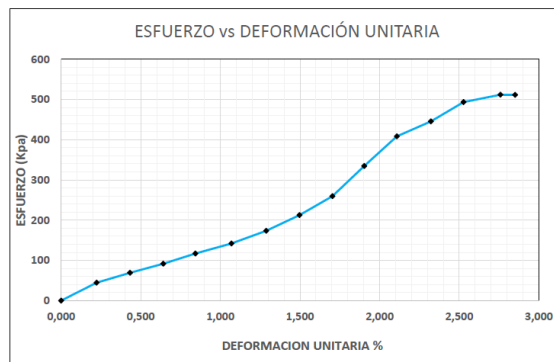
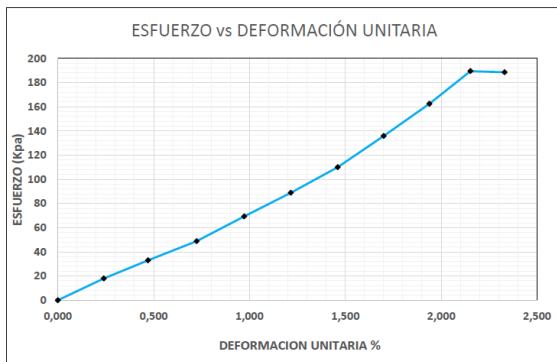
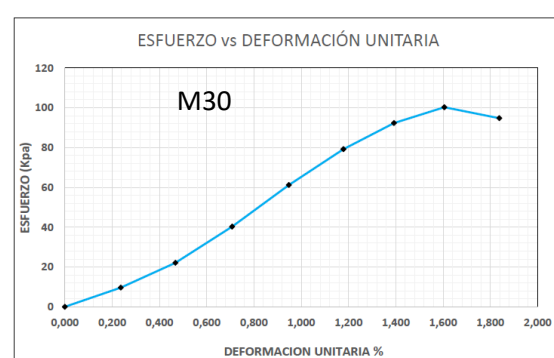
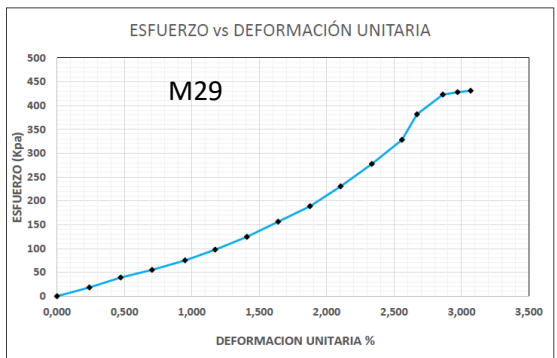
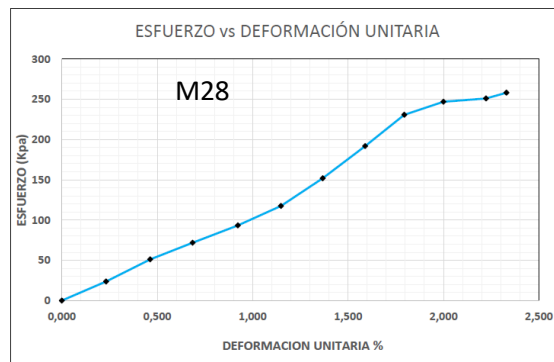
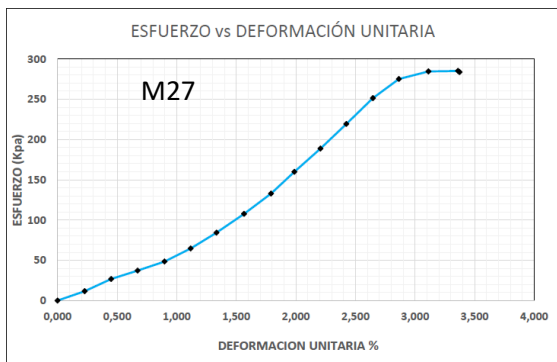
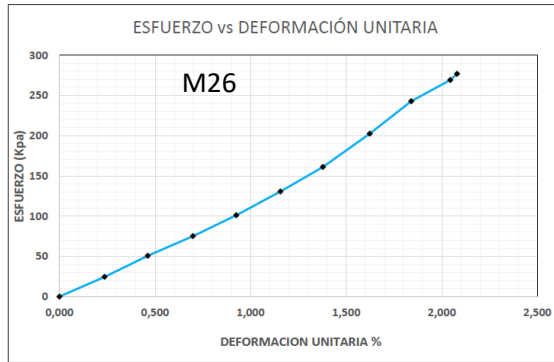
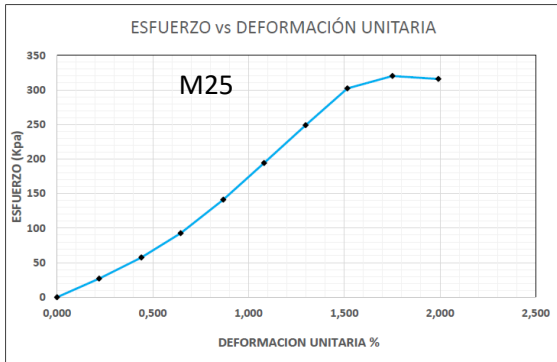
Orden de ensayo	ρ (kg/m ³)	% Cal viva	Temperatura °C	q_u (kPa)
1	1646	2	22	260.41
2	1562	1	40	279.94
3	1562	1	22	137.62
4	1646	1	40	269.86
5	1478	2	22	193.44
6	1478	2	22	124.01
7	1478	3	40	306.50
8	1478	2	40	245.89
9	1478	3	22	240.05
10	1646	3	40	421.69
11	1646	1	40	246.32
12	1478	3	40	357.89
13	1562	3	40	322.53
14	1478	1	40	138.65
15	1646	1	22	259.20
16	1478	1	22	244.53
17	1646	2	40	292.53
18	1646	1	22	182.50
19	1562	2	22	180.00
20	1646	2	40	409.21
21	1562	2	40	280.00
22	1646	3	40	289.84
23	1562	2	22	274.93
24	1562	1	40	221.37
25	1562	3	22	320.10
26	1478	2	40	276.80
27	1646	3	22	285.20
28	1478	2	40	258.15
29	1562	3	40	431.00
30	1478	1	22	100.26
31	1646	1	22	189.39
32	1646	2	40	511.75
33	1646	2	22	257.29
34	1478	1	40	112.10
35	1478	3	40	367.12
36	1646	3	22	337.88
37	1562	2	22	172.56
38	1562	1	40	253.52
39	1562	3	22	246.96
40	1478	2	22	162.31
41	1562	3	22	176.10
42	1562	1	22	179.35
43	1646	3	22	275.61
44	1562	3	40	706.21
45	1478	1	22	107.48
46	1478	3	22	195.30
47	1478	3	22	156.20
48	1478	1	40	123.68
49	1562	1	22	142.17
50	1562	2	40	230.89
51	1646	2	22	229.92
52	1646	1	40	183.14
53	1562	2	40	181.85
54	1646	3	40	563.90

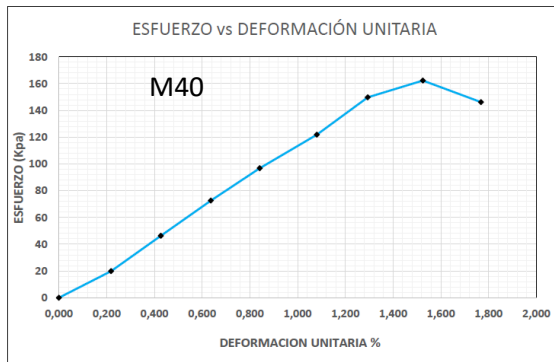
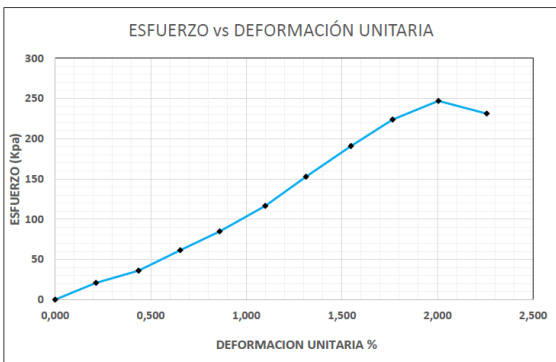
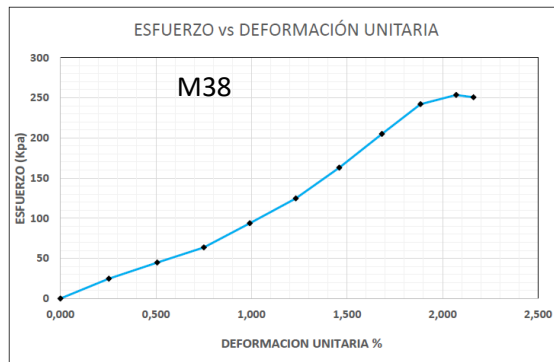
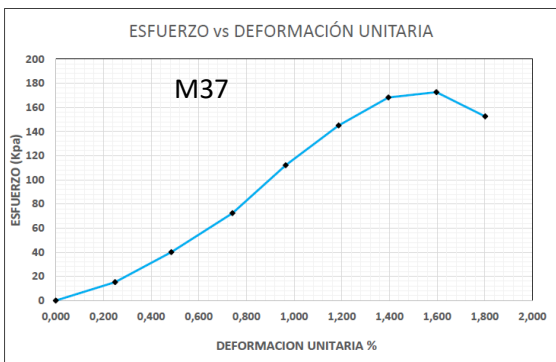
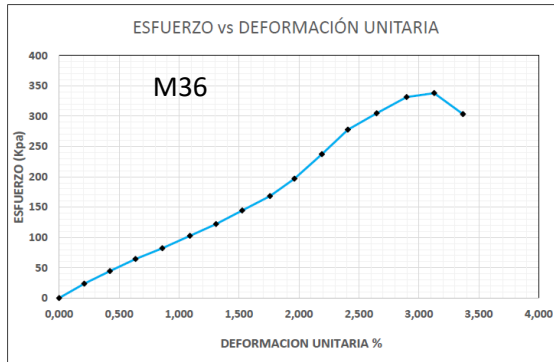
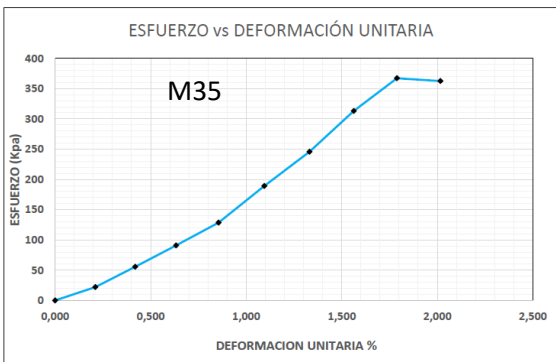
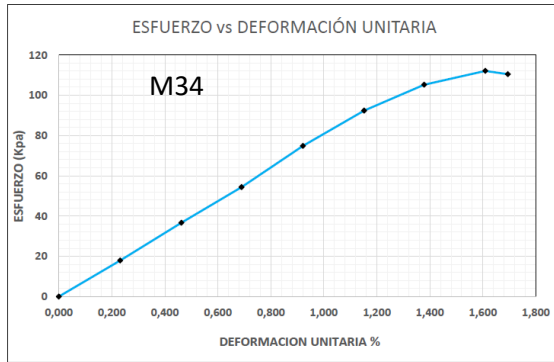
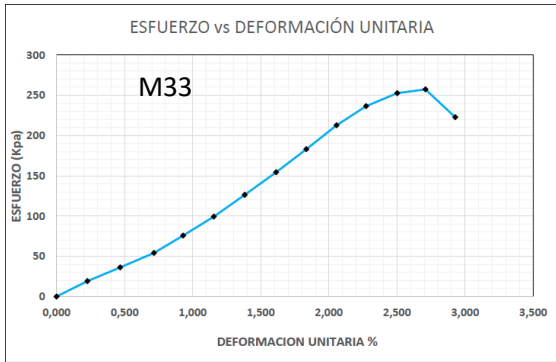
Nota. Fuente propia.

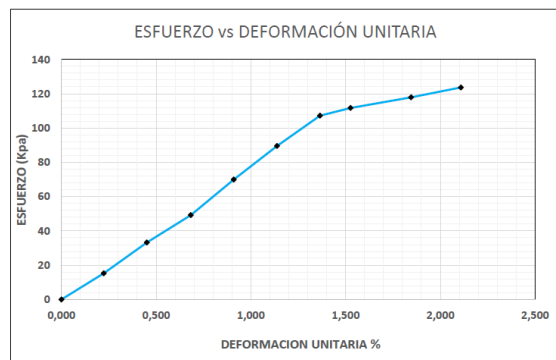
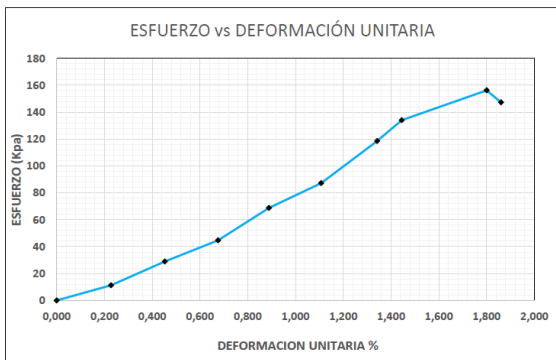
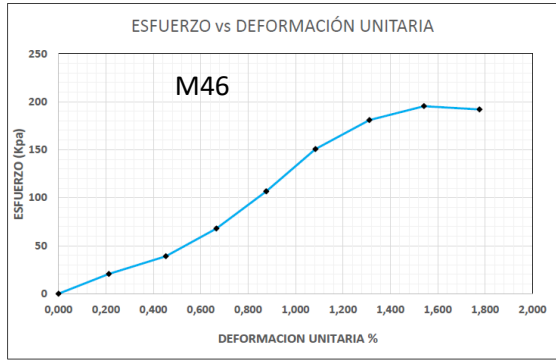
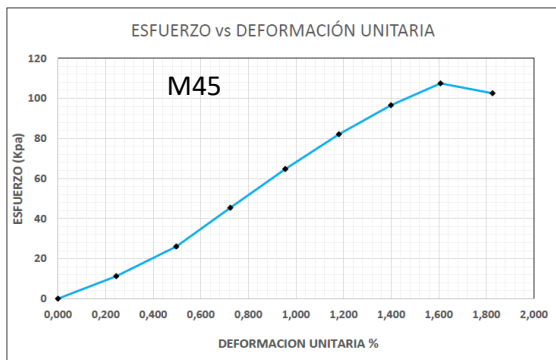
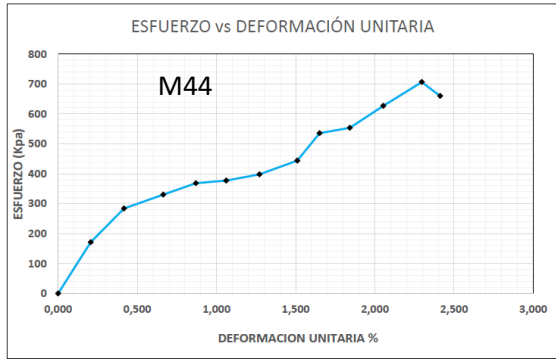
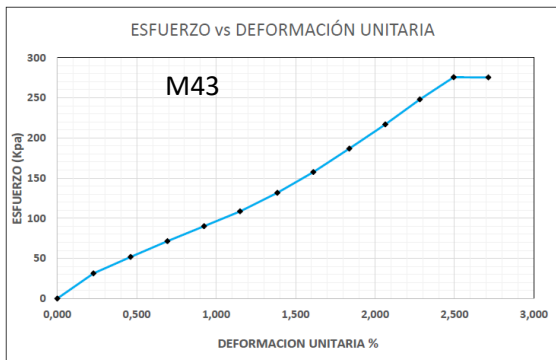
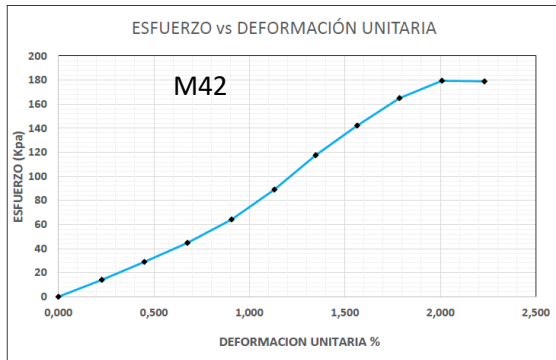
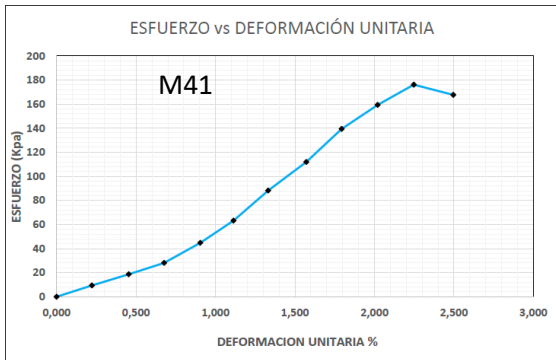


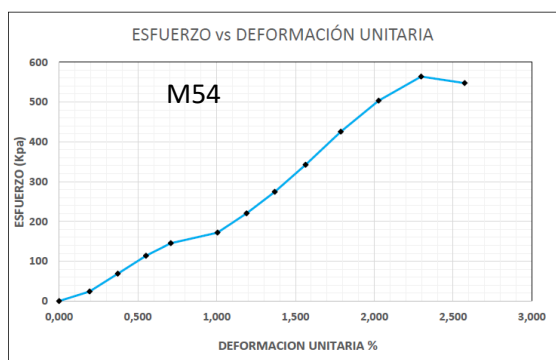
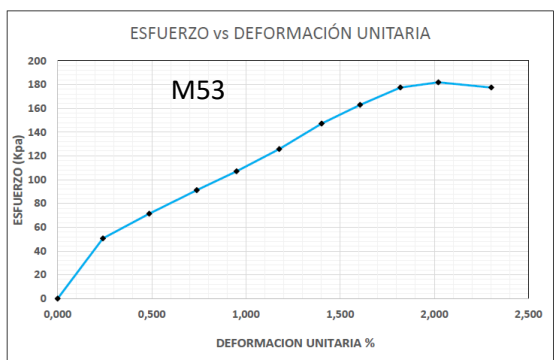
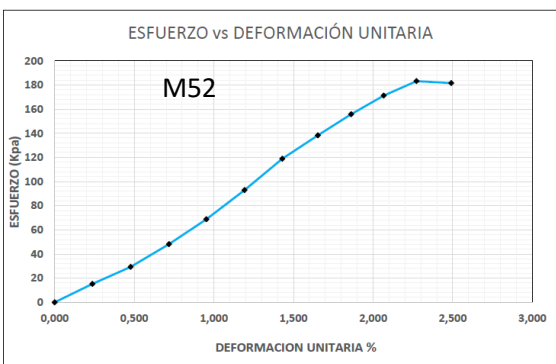
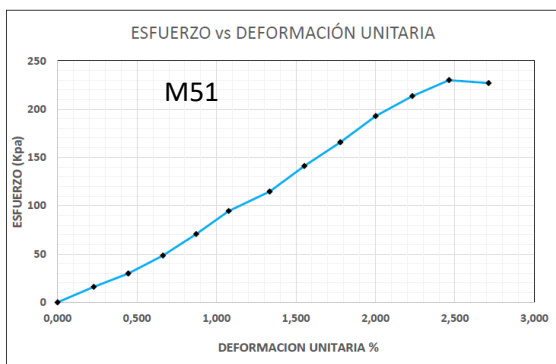
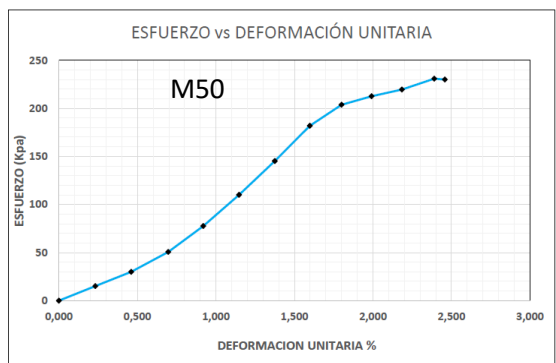
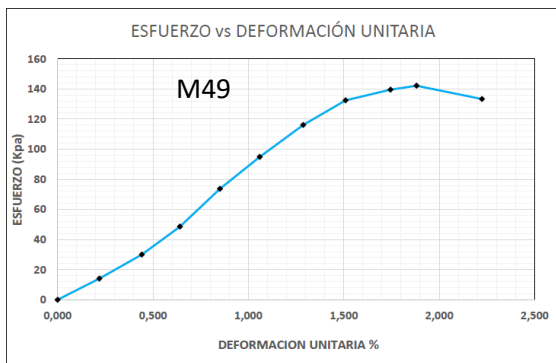












Anexo 2 Resultados estadísticos compresión no confinada.

	<i>Df</i>	<i>Sum Sq</i>	<i>Mean Sq</i>	<i>F value</i>	<i>Pr(>F)</i>	
<i>Densidad</i>	2	86407	43203	7.899	0.00143	**
<i>Cal</i>	2	192754	96377	17.62	4.62E-06	***
<i>Temperatura</i>	1	130199	130199	23.804	2.17E-05	***
<i>Densidad: Cal</i>	4	22647	5662	1.035	0.40255	
<i>Densidad: Temperatura</i>	2	4829	2415	0.441	0.64654	
<i>Cal: Temperatura</i>	2	43431	21715	3.97	0.02766	*
<i>Densidad: Cal: Temperatura</i>	4	31386	7847	1.435	0.24251	
<i>Residuals</i>	36	196906	5470			
<i>Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1</i>						

Nota. Fuente propia

Anexo 3 Resultados de Corte directo suelo del batolito antioqueño en estado natural.

Orden de ensayo	Humedad (%)	C (kPa)	ϕ°	ρ (kg/m ³)
2	5	0.313	33.7	1646
8	5	0.307	34.9	1646
4	5	0.371	35.9	1646
6	9	0.686	29.1	1646
1	9	0.605	28.8	1646
5	9	0.633	26.7	1646
3	13	0.809	34.4	1646
9	13	0.911	29.1	1646
7	13	0.853	29.4	1646

Nota. Fuente propia.

Anexo 4 Resultados de corte directo de suelo del batolito antioqueño tratado con cal viva.

Orden de Ensayo	T °C	Tiempo de curado (días)	Humedad (%)	C (kPa)	ϕ °	ρ (kg/m ³)
5	22	7	5	0.185	36.2	1646
8	22	7	9	2.286	32.4	1646
18	22	7	13	1.509	33.6	1646
9	22	14	13	0.501	34.3	1646
11	22	14	5	0.381	36.3	1646
15	22	14	9	3.2	34.2	1646
1	22	28	13	3.996	33.2	1646
10	22	28	5	3.510	32.7	1646
13	22	28	9	7.109	34.1	1646
3	40	7	5	0.640	34.8	1646
6	40	7	9	3.166	33.8	1646
14	40	7	13	7.102	30.2	1646
4	40	14	9	5.5	29.5	1646
7	40	14	13	10.72	35.1	1646
17	40	14	5	2.413	32.4	1646
2	40	28	9	18.196	32.8	1646
12	40	28	13	9.060	32.9	1646
16	40	28	5	14.393	30.4	1646

Nota. Fuente propia.

Anexo 5 Datos de succión para curvas de retención

%w natural	Succión (kPa)	
	%w (2%cal-22°C)	%w (2%cal-40°C)
148245.1254	103345.8754	152879.6588
80226.07848	37218.96053	49382.86922
43535.31574	33859.34647	27173.72611
12669.58387	10936.6865	9029.882093
7630.983735	6620.795836	5226.065153
4479.836147	3655.320574	3039.35329
3729.879564	2577.092045	1797.991145
3059.145216	1871.521549	1228.291068
1822.20323	1104.069437	653.9899932
95.15284108	95.15284108	59.93691697
1	1	1

%w natural	w volumétrica (%)	
	%w (2%cal-22°C)	%w (2%cal-40°C)
6.54	8.95486284	8.056945
8.93	15.98	13.38
14.54	16.85	18.87
25.87	27.22	28.98
30.52	31.82	33.99
35.41	37.27	38.97
37.09	40.48	43.79
38.91	43.42	47.28
43.66	48.26	53.07
70.75	70.75	77.34
80.63	78.66	80.63
0	0	0

Van Genuchten %w natural	θh calculado	
	Van Genuchten %w (2%cal-22°C)	Van Genuchten %w (2%cal-40°C)
9.5642531	10.5684972	11.1258421
12.89210458	17.94066417	17.57872127
15.87709697	18.44829325	20.63944505
24.13976688	25.72818716	27.72855205
28.62478676	29.79784681	32.07486747
34.14689766	35.39383636	36.99982263
36.24575229	39.10487502	42.37601264
38.62952902	42.77070958	46.62710873
45.35441005	49.31206892	54.11157909
74.73650447	75.59736495	75.40365202
77.17994922	80.47217603	78.85768373
0	0	0

Nota. Fuente propia.

Anexo 6 Resultados corte directo no saturado

LIMO BATOLITO ANTIOQUEÑO 2 % CAL					NO SATURADO						
					τ (kPa)			C (kPa)	ϕ °	Ψ (kPa)	ϕ^b
No. Ensayo	T °C	t (días)	W (%)	ρ (kg/m ³)	50 (kPa)	100 (kPa)	200 (kPa)				
6	40	7	9	1646	52.0	113.8	194.0	11.97	42.8	110000.0	0.00462
8	22	7	9	1646	39.1	79.2	151.0	3.23	36.6	75000.0	0.00078
15	22	14	9	1646	40.2	79.6	153.0	3.50	36.8	75000.0	0.00267
4	40	14	9	1646	70.0	144.2	253.3	15.45	50.3	120000.0	0.00229

Nota. Fuente propia.

Anexo 7 Datos de modelación de terraplén.

SUELO NATURAL				
FS	1.5	1.5	1.5	1.5
Angulo (°)	25.2	23.7	23.3	23
Altura (m)	5	10	15	20
Área (m ²)	106.1	250.1	406.2	620.0
Longitud (m)	1	1	1	1
Volumen (m ³)	106.1	250.1	406.2	620.0

SUELO TRATADO CON CAL VIVA SATURADO				
FS	1.5	1.5	1.5	1.5
Angulo (°)	42.4	33.2	30.5	31.9
Altura (m)	5	10	15	20
Área (m ²)	87.8	229.6	390.9	530.4
Longitud (m)	1	1	1	1
Volumen (m ³)	88	230	391	530

SUELO TRATDO CON CAL VIVA NO SATURADO				
FS	1.5	1.5	1.5	1.5
Angulo (°)	63.5	50	45	38
Altura (m)	5	10	15	20
Área (m ²)	75.6	176.7	286.4	449.1
Longitud (m)	1	1	1	1
Volumen (m ³)	76	177	286	449

Nota. Fuente propia.