

Estabilización de un Suelo Arcilloso Mediante la Adición de Ceniza Volante (Fly-Ash)

Freider Nicolas Tellez Duran, Paula Andrea Rivas Ariza

Trabajo de Grado para Optar el Título de ingenieros civiles

Director

José Alberto Rondón

Magíster en geotecnia

Codirector

Luis Alberto Capacho Silva

Magíster en informática y ciencias de la computación

Universidad Industrial De Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios por todas las bendiciones que me brinda a diario, por darme la fortaleza y sabiduría para superar todos los obstáculos de la mejor manera y por brindarme una familia que, aunque pequeña en cantidad, inmensa en calidad

A mi madre querida, Xiomara Duran Salazar, porque por ella es que todo esto es posible, por todo su apoyo, su amor y dedicación y por siempre estar junto a mi impulsándome a superar mis metas y alcanzar todos los objetivos que me propongo
Te amo inmensamente

A mi tía Jeannette Duran Salazar, mi tío Hernán García Sarmiento, mi Prima, que es más como mi hermana, Karoll Marcela Álvarez Duran y mi nonita linda, Rosita Salazar de Duran, que nos cuida desde el cielo, por todas las palabras de ánimo y consejos y por ser mis pilares, incondicionales siempre

A mi padrino, Jesús Alfonso Ordoñez, por ser ese guía espiritual que me acompaña siempre y a José David Manrique Rueda, que ha sido un apoyo constante para mi mamá y para mí en las situaciones más críticas y especiales

Y a mis tres mejores amigos, a los que considero mis hermanos, Juan Sebastián Mayorga Quintero, Julián Ricardo Prada Gutiérrez y Andrés Felipe Leal Mora, quienes me acompañan siempre en las buenas y en las malas
Gracias por acompañarme en todas mis locuras

Freider Nicolas Tellez Duran

A Dios por sus bendiciones y guiarme por el mejor camino.

A mis padres, Jairo Rivas y Petrona Ariza por ser los promotores para alcanzar mis sueños.

A mis hermanos John Rivas y Erick Rivas por su protección en todo momento.

A mi amiga Yesenia Macias, por su amistad sincera e incondicional.

A mi amigo y compañero de proyecto, Nicolás Téllez por ser único y especial.

Paula Andrea Rivas Ariza

Agradecimientos

A mi hogar, la Universidad Industrial de Santander, el alma mater que me ha permitido vivir miles de experiencias increíbles, conocer gente fantástica y crecer hasta convertirme en la persona que soy hoy en día.

Al director de este proyecto, el ingeniero José Alberto Rondón, por todos los consejos, la guía y la ayuda que nos brindó para poder concluir esta investigación de la mejor forma posible.

A mi compañera y gran amiga, Paula Andrea, por todas las vivencias y lecciones aprendidas en todo este proceso, por sus consejos, su cariño y su incondicionalidad siempre.

A la Asociación Centro de Estudios de Ingeniería Civil, donde pude aprender y reforzar habilidades útiles para mi vida diaria y conocí personas increíbles y una de las mejores compañeras de vida que podría desear, Karol Liliana Sanabria Valdivieso, quien ha sido un apoyo constante y ha contribuido a la excelente culminación de esta gran etapa de mi vida que ha sido la universidad.

Y a todas aquellas personas que aportaron su granito de arena de diversas maneras para hacer de esta una de las etapas más placenteras y memorables de mi vida. Realmente muchas gracias.

Freider Nicolas Tellez Duran

A Dios por estar conmigo siempre, por darme sabiduría para entender que cada cosa que pasa tiene razón de ser, me enseña y me hace más fuerte.

A mis padres, Jairo Rivas y Petrona Ariza por ser luz en la oscuridad, por darme herramientas para superar cada obstáculo y fortalecer mis debilidades, por su dedicación y amor incondicional. A mis hermanos John Rivas y Erick Rivas por su forma diferente de expresar amor, por su protección y siempre hacerme sonreír. Los amo con todo mi corazón.

A mis chiquitos Juan Sebastián y Juan Diego por crecer conmigo y darme un amor sin condición.

A los Profesores José Alberto Rondón y Luis Alberto Capacho por ampliar mis conocimientos, por su acompañamiento y motivación en el desarrollo de la investigación.

A mis amigos de la vida por su fidelidad a lo largo de los años.

A Nicolás por ser soporte en momentos de dificultad, por su paciencia, por creer en mí y por sus palabras llenas de cariño.

A cada una de las personas que hicieron parte de esta trayectoria para bien o para mal, porque dejaron un camino de enseñanzas y de fuerza para cualquier situación que se presente de aquí en adelante.

Paula Andrea Rivas Ariza

Contenido

Introducción	13
1. Objetivos	14
1.1. Objetivo General.....	14
1.2. Objetivos Específicos	14
2. Marco teórico	15
2.1. Conceptos Básicos	15
2.1.1. Ceniza Volante (Fly-Ash).....	15
2.1.2. Suelos Expansivos	15
2.1.3. Estabilización del Suelo	15
2.2. Casos de Estudio y Aplicaciones	16
2.2.1. Estabilización de Suelos Blandos de Grano Fino con Ceniza Volante (2006).....	17
2.2.1.1. Objetivo.	17
2.2.1.2. Metodología.....	17
2.2.1.3. Resultados.....	18
2.2.2. Influencia de la Ceniza Volante, el Limo y las Fibras de Poliéster en las Propiedades de Compactación y Esfuerzo de un Suelo Expansivo (2007).....	20
2.2.2.1. Objetivo.	20
2.2.2.2. Metodología.....	20
2.2.2.3. Resultados.....	22
3. Caracterización y ensayos base en las muestras vírgenes	23
3.1. Granulometría	23
3.1.1. Suelo virgen.....	23
3.1.2. Ceniza	26
3.2. Límites de Atterberg	27
3.2.1. Límite plástico	27
3.2.2. Límite líquido	29
3.3. Gravedad específica de las partículas sólidas del suelo.....	33
3.4. Densidad de la ceniza volante.....	36
4. Mezcla suelo-ceniza volante	38
5. Ensayos de expansividad para el suelo y la mezcla óptima	43
5.1. Proctor modificado	43
5.1.1. Suelo virgen.....	43
5.1.2. Mezcla óptima	47
5.2. Ensayo de potencial de cambio volumétrico utilizando el aparato de Lambe.....	48
5.3. Ensayo de consolidación unidimensional	53

5.3.1. Suelo virgen.....	53
5.3.2. Mezcla óptima	62
5.4. Ensayo de corte directo.....	67
5.4.1. Suelo virgen.....	67
5.4.2. Mezcla óptima	70
6. Análisis de resultados.....	73
7. Conclusiones	81
8. Recomendaciones.....	82
Bibliografía	83

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Peso de muestra lavada y secada al aire, incluyendo el peso de la tara</i>	24
Figura 2. <i>Tamices</i>	24
Figura 3. <i>Desmonte de cada tamiz</i>	24
Figura 4. <i>Masa retenida del en el tamiz No. 40</i>	25
Figura 5. <i>Masa retenida en el tamiz No. 200</i>	26
Figura 6. <i>Tamizado de las fracciones finas que pasan el tamiz No. 40</i>	28
Figura 7. <i>Muestra que pasa por el tamiz No. 40</i>	28
Figura 8. <i>Masa elipsoidal y rollo formado de acuerdo al método manual de la INV-126</i>	29
Figura 9. <i>Masa final de las muestras para el límite plástico, incluyendo el peso de la tara</i> .	29
Figura 10. <i>Muestra de suelo virgen humedecida</i>	30
Figura 11. <i>Cierre de la ranura para el primer intervalo de golpes objetivo</i>	30
Figura 12. <i>Taras puestas en el horno para el secado de las muestras</i>	31
Figura 13. <i>Gráfica correspondiente al límite líquido</i>	32
Figura 14. <i>Gráfica USCS para clasificación de suelos</i>	33
Figura 15. <i>Densidad y factor de corrección del agua para diferentes temperaturas</i>	34
Figura 16. <i>Frasco de Le Chatelier lleno de kerosene entre las marcas</i>	37
Figura 17. <i>Frasco de Le Chatelier con muestra ya estabilizada</i>	37
Figura 18. <i>Correspondiente a la mezcla de 10% de ceniza</i>	39
Figura 19. <i>Materiales utilizados en la mezcla de 10% de ceniza</i>	40
Figura 20. <i>Proceso de mezclado a un 10% de ceniza en peso</i>	40
Figura 21. <i>Mezclas iniciales para los ensayos de límites</i>	41
Figura 22. <i>Comportamiento plástico de las mezclas suelo-ceniza</i>	42
Figura 23. <i>Material cuarteado y tamizado por el tamiz No. 4</i>	44
Figura 24. <i>Peso del molde de compactación</i>	44
Figura 25. <i>Desmolde del material</i>	45
Figura 26. <i>Gráfica de resultados del ensayo de proctor modificado para el suelo</i>	46
Figura 27. <i>Gráfica de resultados del ensayo de proctor modificado para la mezcla</i>	48
Figura 28. <i>Masa del anillo porta muestras</i>	49
Figura 29. <i>Martillo calibrado para compactación de muestras</i>	49
Figura 30. <i>Masa de la muestra compactada junto al anillo, para una humedad igual al límite plástico</i>	50
Figura 31. <i>Montaje del anillo en el aparato de Lambe</i>	50

Figura 32. Montaje final del aparato de Lambe y calibración del lector en cero	51
Figura 33. Gráfica de cambio volumétrico vs índice de hinchamiento	52
Figura 34. Carga de 2 kg para el ensayo de consolidación unidimensional.....	53
Figura 35. Deformación vs Logaritmo del tiempo para una carga de 16 kg sobre el suelo virgen.....	57
Figura 36. Deformación vs Raíz del tiempo para una carga de 16 kg sobre el suelo virgen.	57
Figura 37. Procedimiento de Casagrande para el cálculo del t_{50} para una carga de 16 kg sobre el suelo virgen	58
Figura 38. Procedimiento de Taylor para el cálculo del t_{90} para una carga de 16 kg sobre el suelo virgen.....	58
Figura 39. Gráfica de relación de vacíos vs logaritmo del esfuerzo para el suelo virgen	59
Figura 40. Método de Casagrande para determinar el esfuerzo efectivo de preconsolidación para el suelo virgen	60
Figura 41. Método de Casagrande para determinar el esfuerzo vertical efectivo (0.4 veces e_o) para el suelo virgen	61
Figura 42. Deformación vs Logaritmo del tiempo para una carga de 16 kg sobre la mezcla óptima.....	64
Figura 43. Deformación vs Raíz del tiempo para una carga de 16 kg sobre la mezcla óptima.	64
Figura 44. Procedimiento de Casagrande para el cálculo del t_{50} para una carga de 16 kg sobre la mezcla óptima	64
Figura 45. Procedimiento de Taylor para el cálculo del t_{90} para una carga de 16 kg sobre la mezcla óptima.....	65
Figura 46. Gráfica de relación de vacíos vs logaritmo del esfuerzo para la mezcla óptima .	65
Figura 47. Método de Casagrande para determinar el esfuerzo efectivo de preconsolidación para la mezcla óptima.....	65
Figura 48. Método de Casagrande para determinar el esfuerzo vertical efectivo (0.4 veces e_o) para la mezcla óptima.....	66
Figura 49. Esfuerzo cortante vs deformación de la carga de 8 Kg para el suelo virgen	69
Figura 50. Esfuerzo cortante vs esfuerzo normal de cada anillo para el suelo virgen.....	70
Figura 51. Esfuerzo cortante vs deformación de la carga de 8 Kg para la mezcla óptima....	72
Figura 52. Esfuerzo cortante vs esfuerzo normal de cada anillo para la mezcla óptima.....	72
Figura 53. Comparativa de mejora de C_v	77
Figura 54. Comparativa de mejora de la cohesión y el ángulo de fricción.....	80

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Humedad natural del suelo virgen</i>	23
Tabla 2. <i>Granulometría del suelo virgen</i>	25
Tabla 3. <i>Humedad natural de la ceniza volante</i>	26
Tabla 4. <i>Granulometría de la ceniza volante</i>	27
Tabla 5. <i>Límites de Atterberg del suelo virgen</i>	31
Tabla 6. <i>Resultados para la gravedad específica de las partículas sólidas del suelo</i>	35
Tabla 7. <i>Resultados para la gravedad específica de las partículas sólidas del suelo en la mezcla óptima</i>	36
Tabla 8. <i>Volumen de kerosene</i>	38
Tabla 9. <i>Volumen de kerosene más muestra</i>	38
Tabla 10. <i>Densidad de la ceniza volante</i>	38
Tabla 11. <i>Resultados de plasticidad obtenidos para las mezclas iniciales</i>	41
Tabla 12. <i>Resultados de plasticidad obtenidos para las mezclas adicionales</i>	42
Tabla 13. <i>Dimensiones del molde para compactación</i>	45
Tabla 14. <i>Contenido de humedad para las diferentes muestras ensayadas</i>	46
Tabla 15. <i>Densidad seca para las diferentes muestras ensayadas</i>	46
Tabla 16. <i>Resultados del ensayo de proctor modificado para el suelo virgen</i>	47
Tabla 17. <i>Datos iniciales para la compactación</i>	47
Tabla 18. <i>Contenido de humedad para las diferentes muestras de mezcla ensayadas</i>	47
Tabla 19. <i>Densidad seca para las diferentes muestras de mezcla ensayadas</i>	48
Tabla 20. <i>Resultados del ensayo de proctor modificado para la mezcla óptima</i>	48
Tabla 21. <i>Alternativas de compactación de la muestra</i>	50
Tabla 22. <i>Resultados obtenidos a una humedad inicial igual al límite plástico</i>	52
Tabla 23. <i>Resultados obtenidos a una humedad inicial igual a la humedad óptima</i>	52
Tabla 24. <i>Resultados obtenidos para la muestra de suelo sometida a consolidación unidimensional</i>	55
Tabla 25. <i>Resultados obtenidos para la carga de 16 kg sobre el suelo virgen</i>	56
Tabla 26. <i>Resultados finales del ensayo de consolidación para el suelo virgen</i>	61
Tabla 27. <i>Resultados obtenidos para la muestra de la mezcla óptima sometida a consolidación unidimensional</i>	62
Tabla 28. <i>Resultados obtenidos para la carga de 16 kg sobre muestra de la mezcla óptima</i> .63	

Tabla 29. Resultados finales del ensayo de consolidación para la mezcla óptima	66
Tabla 30. Resultados del ensayo de corte directo para una carga de 8 kg para el suelo virgen	67
Tabla 31. Datos iniciales y finales del ensayo de corte directo para el suelo virgen	69
Tabla 32. Esfuerzo y densidad máxima de cada anillo para el suelo virgen.....	70
Tabla 33. Ángulo de fricción y cohesión del suelo virgen	70
Tabla 34. Resultados del ensayo de corte directo para una carga de 8 kg para la mezcla óptima.....	71
Tabla 35. Datos iniciales y finales del ensayo de corte directo para la mezcla óptima.....	71
Tabla 36. Esfuerzo y densidad máxima de cada anillo para la mezcla óptima.....	72
Tabla 37. Ángulo de fricción y cohesión de la mezcla óptima.....	73
Tabla 38. Resumen de los principales resultados	73
Tabla 39. Valores de referencia para la gravedad específica de los sólidos	74
Tabla 40. Valores de referencia para la relación de vacíos	75
Tabla 41. Valores de referencia para los índices de compresión e hinchamiento	76
Tabla 42. Valores de referencia para el coeficiente de compresibilidad volumétrica, m_v	76
Tabla 43. Valores de referencia para el coeficiente de consolidación, c_v	77
Tabla 44. Valores de referencia para la cohesión y el ángulo de fricción en suelos cohesivos en kPa.....	79
Tabla 45. Valores de referencia para la cohesión y el ángulo de fricción en suelos cohesivos en kg/cm^2	79

Resumen

Título: Estabilización de un Suelo Arcilloso Mediante la Adición de Ceniza Volante (Fly-Ash)*.

Autores: Freider Nicolas Tellez Duran y Paula Andrea Rivas Ariza**

Palabras Claves: Arcilla expansiva, ceniza volante, estabilización, consolidación, suelos.

Descripción:

El presente trabajo de grado muestra el estudio del efecto que genera la adición de un residuo sólido proveniente de procesos de combustión del carbón llamado ceniza volante, sobre las propiedades de expansividad de una muestra de suelo arcilloso inestable proveniente de las antiguas ladrilleras de la ciudad de Bucaramanga, con el fin de estabilizarla, reduciendo los grandes asentamientos generados sobre este tipo de suelos. Para esto, el trabajo se divide en cuatro partes fundamentales, la primera es el estudio y consulta del estado del arte referente a la estabilización de suelos, que involucra los conceptos principales que deben ser tenidos en cuenta, así como las aplicaciones y casos de estudio, especialmente de proyectos donde se haya utilizado ceniza volante como estabilizador, que puedan servir como guía para la ejecución de este proyecto. La segunda parte consiste en la caracterización de las muestras de suelo y ceniza que serán utilizadas en el desarrollo del trabajo para posteriormente, en la tercera parte, realizar los ensayos de límites de Atterberg sobre las diferentes mezclas de prueba, determinando los criterios para la definición y elección de la mezcla óptima, para finalmente presentar los ensayos de expansividad correspondientes para el suelo virgen y la mezcla óptima, previamente preparada, junto con el análisis correspondiente de los resultados obtenidos, concluyendo que la hipótesis planteada para el proyecto se cumple.

*Trabajo de grado

**Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: José Alberto Rondón, magíster en geotecnia.

Abstract

Title: Stabilization of a Clay Soil Through the Addition of Fly-Ash*.

Author: Freider Nicolas Tellez Duran and Paula Andrea Rivas Ariza**

Keywords: Expansive clay, fly ash, stabilization, consolidation, soils.

Description:

The present thesis shows the study of the effect generated by the addition of solid residue from coal combustion processes called fly ash, on the expansive properties of an unstable clay soil sample from the old brickyards of the city of Bucaramanga, in order to stabilize it, reducing the large settlements generated on this type of soil. For this, the work is divided into four fundamental parts, the first is the study and consultation of the state of the art with respect to soil stabilization, which involves the main concepts that must be taken into account, as well as the applications and cases of study, especially of projects where fly ash has been used as a stabilizer, which can serve as a guide for the execution of this project. The second part consists of the characterization of the soil and ash samples that will be used in the development of the work, to subsequently perform, in the third part, the Atterberg limits tests on the different test mixtures, determining the criteria for definition and choice of the optimal mixture, to finally present the corresponding expansive tests for the virgin soil and the optimal mixture, previously prepared, together with the corresponding analysis of the results obtained, concluding that the hypothesis proposed for the project is fulfilled.

*Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: José Alberto Rondón, magíster en geotecnia.

Introducción

En el diseño y construcción de obras civiles tales como edificios, vías, canales, muros, entre otros, intervienen diversos factores que deben ser estudiados para llevar estos proyectos a resultados óptimos, tanto en medidas de seguridad como de funcionalidad dentro del periodo de vida útil para los que son diseñados, uno de estos factores se centra en las propiedades de los suelos sobre los que se realizan estas estructuras.

Así, uno de los principales problemas que presentan los suelos se da a la hora de trabajar sobre arcillas expansivas, ya que estos cambian de volumen ante la presencia de agua y vuelven a reducir su volumen ante la ausencia de la misma, lo que conlleva, de no realizarse un control adecuado, a la generación de grietas y daños en las estructuras que sobre estos suelos se ubican, debido a los desplazamientos y esfuerzos que estos continuos cambios de volumen generan sobre ellas.

Con base en lo anterior, el fin de este proyecto radica en el estudio del efecto que produce la dosificación de ceniza volante en un suelo arcilloso, sobre sus propiedades de expansividad, buscando obtener el porcentaje de mezcla óptimo que permita tratar y reducir el efecto de esta propiedad, estabilizando estos tipos de suelos y disminuyendo así los grandes asentamientos que provocan daños sobre las estructuras, de igual forma, lograr un mejor desempeño de las obras, una reducción en los procesos de mantenimiento que deban realizarse en ellas y en los costos que estos generan a largo plazo.

De esta manera, la hipótesis central a ser comprobada es que la ceniza volante puede funcionar como un material adecuado para el tratamiento de los problemas de expansividad asociados a suelos arcillosos expansivos, para lo cual se realizan los ensayos de proctor modificado, consolidación y corte directo en el laboratorio, aplicados sobre una mezcla de suelo-ceniza volante, definida en el proyecto mediante los ensayos de límites de Atterberg.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Estabilizar un suelo arcilloso mediante la adición de ceniza volante proveniente de la combustión del carbón para el mejoramiento de sus propiedades de consolidación y expansividad.

1.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el estado del arte actual de la aplicación del fly-ash en el mejoramiento y estabilización de un suelo arcilloso.
- Determinar la proporción que permita la obtención de un rendimiento óptimo en la mezcla de suelo/fly-ash mediante el ensayo de límites de Atterberg.
- Establecer las propiedades mecánicas del suelo que pueden ser mejoradas mediante la aplicación de fly-ash tales como consolidación, expansividad y resistencia al corte.

2. Marco teórico

Para poder realizar un estudio adecuado del mejoramiento y la estabilización del suelo mediante la aplicación de ceniza volante o fly-ash, es necesario revisar ciertos conceptos fundamentales.

2.1. Conceptos Básicos

2.1.1. *Ceniza Volante (Fly-Ash)*

Son residuos sólidos provenientes de la combustión en las centrales termoeléctricas, cuya composición y porcentaje de carbón depende del proceso que se realice en cada una de las plantas de la central. Las cenizas son granos finos compuestos básicamente por silicatos, aluminios, cal libre y algunos óxidos que permiten una reacción puzolánica con el suelo arcilloso que al igual que otras sustancias reduce el índice de expansión (Pérez Collantes, 2012).

2.1.2. *Suelos Expansivos*

Son suelos arcillosos inestables en presencia de humedad, ya que su característica principal es experimentar cambios de volumen cuando varía su contenido de líquido, lo que resulta problemático en obras civiles, debido a que el suelo, al estar compuesto de materiales muy susceptibles a desmoronarse con la presencia de agua, provocaría la tendencia a la fractura o el colapso de las edificaciones que se encuentren sobre él (Celis y Martínez, 2015).

2.1.3. *Estabilización del Suelo*

La estabilización de suelo se define como el cambio o alteración de sus propiedades, con el fin de obtener un material de mejor calidad que pueda soportar las cargas a las que va a ser sometido. Los principales factores que generan inestabilidad en un suelo tienen que ver con la resistencia mecánica, el tamaño y forma de las partículas, estabilidad volumétrica,

compresibilidad, durabilidad y permeabilidad, entre otros. La estabilización es generalmente un proceso mecánico, físico, fisicoquímico o químico que permite modificar las características de un suelo respecto a su comportamiento de resistencia y deformación. Para disminuir los cambios volumétricos de los suelos, se suelen incorporar aditivos, como es el caso de la cal o la ceniza volante, proceso de carácter fisicoquímico (Celis y Martínez, 2015).

De esta forma, para esta investigación, el eje central será la estabilización química y fisicoquímica, la cual, según Solminac (1989), consiste en alterar las propiedades del suelo usando cierto aditivo, que, al ser mezclado con el suelo, generalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos, que en ciertos casos involucra la sustitución de iones metálicos y cambio en la constitución y resistencia del suelo. Si el aditivo es inorgánico y tiene propiedades cementantes, se espera que a nivel microscópico aumente la actividad puzolánica (Celis y Martínez, 2015).

Por otro lado, la puzolana es una materia, esencialmente silícea, que finamente dividida no posee ninguna propiedad hidráulica, pero que contiene constituyentes que, al combinarse con materiales como la cal o la ceniza volante, junto con agua, dan lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos (Celis y Martínez, 2015).

2.2. Casos de Estudio y Aplicaciones

Durante varios años, el uso de la ceniza volante como material estabilizante para elementos como mezclas de concreto o mortero, o como material de mezcla en el mismo suelo, ha sido estudiado, con base en esto se presentan algunos casos de estudio, con el fin de tener una base clara para la investigación, estos son:

2.2.1. Estabilización de Suelos Blandos de Grano Fino con Ceniza Volante (2006)

2.2.1.1. Objetivo. Se realizó un estudio de laboratorio para evaluar la mejora en las propiedades mecánicas relevantes para el diseño y la construcción de carreteras que se pueden obtener cuando los suelos de grano fino blando utilizados para la subrasante, se estabilizan con cenizas volantes. El programa experimental incluyó pruebas de CBR para evaluar la resistencia de los suelos estabilizados utilizados como plataformas de trabajo durante la construcción de carreteras y pruebas de módulo de resiliencia (M_r) para evaluar el módulo de subrasante que es importante para soportar las cargas de tráfico vehicular a largo plazo (Edil, Acosta y Benson, 2006).

2.2.1.2. Metodología. Para esto se utilizaron cuatro tipos de cenizas volantes derivadas de la combustión de carbón subbituminoso y se recolectaron utilizando precipitadores electrostáticos. Dos de ellas proceden de calderas pulverizadas y son de Clase C según la ASTM C618, mientras que las otras dos son de calderas de ciclones y se denominan cenizas volantes "fuera de especificación" porque no cumplen con los criterios de Clase C o Clase F de la norma anteriormente nombrada (Edil, Acosta y Benson, 2006).

Se utilizaron siete suelos de subrasante y se recolectaron muestras de cada suelo a una profundidad de 0.6 a 0.9 m. Todos los suelos son de grano fino y se clasifican como CL, CH u OH según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos [Los nombres de los suelos son de estudios de suelo del USDA] (Edil, Acosta y Benson, 2006).

- **CBR:** Para el estudio, las pruebas de CBR sin remojo se realizaron en los suelos y las mezclas de cenizas volantes del suelo siguiendo los métodos descritos en ASTM D-1883. Las muestras se prepararon con un contenido de agua del 7% del contenido óptimo de agua usando el esfuerzo de Proctor estándar para simular la condición húmeda y blanda que se observa típicamente en el campo. Las muestras también se prepararon cerca del contenido óptimo de

agua como condición estandarizada. Se usó el procedimiento de compactación Proctor Estándar para compactar las muestras. Las pruebas de CBR se realizaron inmediatamente después del período de curado de 7 días. Se adoptó un período de curado de 7 días para simular el período relativamente corto entre la preparación de subrasante para proporcionar una plataforma de trabajo y actividades de construcción de pavimento en la práctica (Edil, Acosta y Benson, 2006).

- **Prueba del módulo de resiliencia:** Las muestras para las pruebas de módulo de resiliencia se prepararon utilizando el mismo esfuerzo de compactación que las muestras preparadas utilizando el procedimiento de Proctor Estándar. Al igual que con las pruebas de CBR, las mezclas de cenizas volantes del suelo se mezclaron y se humedecieron, y luego se dejaron reposar durante 2 horas antes de la compactación para simular el retraso que generalmente ocurre en el campo. Las muestras se prepararon con un contenido de agua óptimo y un 7% de humedad del contenido de agua óptimo. Las muestras también se compactaron en condiciones muy húmedas [9 a 18% de humedad de contenido óptimo de agua] (Edil, Acosta y Benson, 2006).

Las muestras de suelo se sometieron a pruebas de módulo elástico poco después de la compactación. Las muestras preparadas con mezclas de cenizas volantes del suelo se extruyeron del molde después de la compactación, se sellaron con una envoltura de plástico y se curaron a 25 ° C y 100% de humedad. El procedimiento descrito en AASHTO T 292-91 se siguió para las pruebas de módulo elástico utilizando la secuencia de carga para suelos cohesivos (Edil, Acosta y Benson, 2006).

2.2.1.3. Resultados.

- **CBR:** En general, la ganancia de CBR aumenta con el incremento del contenido de cenizas volantes. La adición de 10% de cenizas volantes causó que el CBR aumentará en un

factor de 4, en promedio, mientras que el 18% de cenizas volantes causó que el CBR aumentará en un factor de 8. La ganancia de CBR también se ve afectada por el tipo de suelo, la mayor ganancia se obtuvo, generalmente, con la arcilla roja lacustre altamente plástica y la más pequeña con la arcilla limosa roja (Edil, Acosta y Benson, 2006).

- **Módulo de resiliencia:** Las curvas del módulo de resiliencia [Mr] para los suelos compactados con un contenido óptimo de humedad tenían la forma característica de los suelos cohesivos, es decir, una disminución monotónica en el Mr con el aumento del esfuerzo desviador. Por el contrario, las curvas de Mr para las mezclas de suelo y cenizas volantes mostraron una dependencia mucho menor del esfuerzo desviador para el rango de esfuerzos empleado. En algunos casos, la estabilización de las cenizas volantes provoca una inversión en la pendiente de la curva de Mr (Edil, Acosta y Benson, 2006).

Para los suelos sin cenizas volantes compactadas con un contenido óptimo de agua, el Mr varía entre 13 y 80 MPa. Todos los módulos corresponden a un esfuerzo de desviación de 21 kPa. Las mezclas de cenizas volantes y suelo preparadas con un 10% de cenizas volantes generalmente caen por debajo de los módulos de los suelos compactados con un contenido óptimo de agua, sin embargo, al 18% del contenido de cenizas volantes el Mr de las mezclas de cenizas volantes y suelo oscilan entre 0.8 y 2.5 veces el Mr de los suelos compactados con un contenido óptimo de agua, es decir que la adición de 18% de cenizas volantes a un suelo de subrasante blando y húmedo da como resultado un valor de Mr comparable o superior al del mismo de la subrasante secada y compactada con un contenido de agua óptimo (Edil, Acosta y Benson, 2006).

2.2.2. Influencia de la Ceniza Volante, el Limo y las Fibras de Poliéster en las Propiedades de Compactación y Esfuerzo de un Suelo Expansivo (2007)

2.2.2.1. Objetivo. El término suelo expansivo se aplica a los suelos que tienen tendencia a hincharse cuando aumenta su contenido de humedad. El objetivo general del estudio fue la investigación de las características geotécnicas de especímenes de suelo-ceniza volante, suelo-limo y suelo-limo-ceniza volante mezclados con diferentes proporciones de fibras orientadas aleatoriamente (Kumar y Bajaj, 2007).

2.2.2.2. Metodología. El suelo utilizado fue algodón negro recolectado de Kota, India, nombre dado por las plantaciones de algodón de la zona con una gravedad específica de 2.7, límite líquido de 68%, límite plástico de 49.65%, contenido óptimo de humedad 29.4% y una densidad seca máxima de 1.32 g/cm³. Las cenizas volantes se clasifican como cenizas volantes clase F, con una gravedad específica de 2.14, contenido óptimo de humedad de 34%, densidad seca máxima de 1.1 g/cm³, superficie específica de 4260 cm²/g, reactividad con el limo de 55 kg/cm² y pérdida por ignición de 3.1% (Kumar y Bajaj, 2007).

Se utilizó cal calcita alta en calcio durante toda la investigación con una gravedad específica de 2.05 y consistencia normal de 43.5, junto con fibras de poliéster de 3, 6 y 12 mm liso y 6 mm corrugado, de sección transversal triangular de 30-40 mm y gravedad específica entre 1.34 y 1.4. Se dejaron las mezclas en curado por 7, 14 y 28 días. Se aplicaron pruebas de compactación Proctor estándar, UCS y pruebas de resistencia a la tracción dividida (Kumar y Bajaj, 2007).

- **Prueba de compactación:** Las pruebas de compactación se realizaron para varias combinaciones de mezclas de cenizas volantes, suelo y fibra de cal. A partir de los resultados se observa que, con el aumento del contenido de cal, la densidad seca máxima de las mezclas de suelo-cal disminuyó y el contenido de humedad óptimo aumentó (Kumar y Bajaj, 2007).

Con la adición de cenizas volantes, hay una disminución adicional en la densidad seca máxima y un aumento en el contenido óptimo de humedad. La presencia de cenizas volantes con un peso específico relativamente bajo puede ser la causa de esta densidad seca reducida. El aumento en el contenido óptimo de humedad se puede atribuir a la cantidad creciente de finos que requieren un mayor contenido de agua debido a su mayor área de superficie (Kumar y Bajaj, 2007).

- **Prueba de compresión no confinada:** Se llevaron a cabo pruebas de compresión no confinadas. Las mezclas de ceniza volante-suelo-fibra se compactaron a un contenido óptimo de humedad y máxima densidad seca en moldes estándar. La resistencia a la compresión no confinada se determinó a una velocidad de carga de 1,00 mm/min. La resistencia a la compresión no confinada sin remojo se determinó para mezclas de suelo de algodón negro virgen y suelo de ceniza volante, ya que las muestras sin mezcla de cal se derrumbaron en agua durante el remojo. La resistencia a la compresión no confinada sin remojo de las mezclas de cenizas volantes-suelo disminuyó de 159 a 98 kN/m² a medida que la cantidad de cenizas volantes se incrementó de 0 a 20% (Kumar y Bajaj, 2007).

- **Prueba de resistencia a la tracción dividida:** Para realizar la prueba de tracción dividida, se prepararon muestras cilíndricas con un contenido de humedad óptimo y una densidad de secado máxima de la misma manera que en el caso de las pruebas de compresión no confinadas. La resistencia a la tracción dividida de las mezclas de cenizas volantes-suelo disminuyó de 1.9 a 0.9 kN / m² a medida que la cantidad de cenizas volantes se incrementó de 0 a 20% (Kumar y Bajaj, 2007).

Para diversas mezclas de cenizas volantes suelo-cal, los resultados muestran la misma tendencia que en las pruebas de resistencia a la compresión no confinada. La cal mejora la resistencia a la tracción dividida del suelo expansivo. La adición de cenizas volantes a la mezcla de suelo-cal es beneficiosa. A medida que aumenta la cantidad de cenizas volantes

manteniendo el porcentaje de cal constante, la resistencia a la tracción dividida aumenta hasta alcanzar un valor máximo en aproximadamente el 15-20% de las cenizas volantes. El valor óptimo de la cal y las cenizas volantes en la mezcla de cenizas volantes suelo-cal se puede tomar como 8 y 15%, respectivamente (Kumar y Bajaj, 2007).

Los resultados muestran que la adición de 1.5% de fibras planas de 6 mm o 1% de fibras onduladas de 6 mm aumenta la resistencia a la tracción dividida en aproximadamente un 100% en comparación con la de la misma mezcla sin fibras. Además, con la adición de 1.5% de fibras onduladas de 6 mm o 1% de fibras planas de 12 mm, la ganancia en la resistencia a la tracción dividida es aproximadamente 135% en comparación con la de la misma mezcla sin fibras (Kumar y Bajaj, 2007).

2.2.2.3. Resultados. Las fibras no presentan alteraciones significativas en la densidad seca máxima o el contenido óptimo de humedad de las mezclas, además, con la adición de ceniza volante se obtiene un aumento significativo en la resistencia de la mezcla de suelo (Kumar y Bajaj, 2007). El contenido óptimo de limo y ceniza volante fue de 8 y 15% respectivamente. La adición de fibras aumenta el UCS y la resistencia a tracción dividida entre 74-100% y 100-135%, respectivamente (Kumar y Bajaj, 2007). Esta prueba dio como resultado que la adición de 1.5% de las fibras planas de 6 mm o 1.0% de las fibras onduladas de 12 mm aumenta la resistencia a la compresión no confinada en aproximadamente un 74% en comparación con la de la misma mezcla sin fibras. Además, con la adición de 1.5% de fibras onduladas de 6 mm o 1% de fibras planas de 12 mm, la ganancia en resistencia a la compresión no confinada es de alrededor del 100% en comparación con la de la misma mezcla sin fibras (Kumar y Bajaj, 2007).

3. Caracterización y ensayos base en las muestras vírgenes

El suelo utilizado proviene de las antiguas ladrilleras de Bucaramanga y la ceniza volante se obtuvo de la empresa Prevesa S.A.S. ubicada en el anillo vial entre Floridablanca y Girón. Conociendo el origen de los materiales, se realizaron los siguientes ensayos para clasificarlos adecuadamente.

3.1. Granulometría

3.1.1. Suelo virgen

Se inició la caracterización de los materiales con la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas del suelo. Para esto, se realizó la preparación de muestras de acuerdo con el procedimiento descrito por la norma del Instituto Nacional de Vías (Invías) de 2013, INV-106 y se utilizó la guía de la norma INV-123 para el desarrollo del ensayo.

Se tomó inicialmente 900.7 g¹ de muestra del terreno, luego se secó al horno a una temperatura no mayor de 60 °C teniendo como resultado una masa de 847.9 g para, de esta forma, determinar la humedad natural del suelo. Los resultados referentes a la humedad natural del suelo están consignados en la tabla 1.

Tabla 1.
Humedad natural del suelo virgen

Recipiente No.	1
Peso Húmedo [g]	911.4
Peso Seco [g]	858.6
Peso Tara [g]	10.7
Peso lavado [g]	65.3
Contenido de humedad [%]	6.23

¹ Gramos: g

Posteriormente, se procedió a lavar la muestra para eliminar las partículas finas adheridas y seguidamente se dejó secar al aire.

Figura 1.

Peso de muestra lavada y secada al aire, incluyendo el peso de la tara



Tal y como se indica en la figura 1, se pudo observar que luego de lavado y secado, el peso final de la muestra fue de 65.3 g al quitar el peso de la tara, es decir, gran parte de la muestra se fue con el lavado, mostrando así que es un suelo mayormente fino.

Posterior a esto, se tamizó manualmente la muestra con movimientos laterales y verticales acompañado de vibración y recorriendo circunferencias de forma que se mantuviera un movimiento continuo sobre las mallas, como se presenta en la figura 2.

Figura 2.

Tamices



Figura 3.

Desmonte de cada tamiz



A continuación, se desmontó cada tamiz verificando que la operación haya sido completada, es decir, que no haya pasado más del 1% de la parte retenida al tamizar durante un minuto, operando cada tamiz individualmente como se observa en la figura 3.

Por último, se determinó la masa retenida de cada tamiz en una balanza como se muestra en la figura 4. El registro de los demás resultados está consignado en la tabla 2.

Figura 4.
Masa retenida del en el tamiz No. 40



Tabla 2.
Granulometría del suelo virgen

Tamiz	Abertura [mm]	Suelo retenido [g]	% Retenido parcial	% Pasa
4	4.5	0.5	0.1	99.9
10	2	1.9	0.2	99.7
20	1.7	6.7	0.8	98.9
40	0.4	12.1	1.4	97.5
60	0.3	10.5	1.2	96.3
100	0.2	11.6	1.4	94.9
200	0	21.7	2.6	92.3
Total		847.9	100.0	
Clasificación	Suelo fino			

3.1.2. Ceniza

Para la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas de la ceniza volante se realizó el mismo procedimiento del suelo virgen, a excepción de que, en este caso, la ceniza al ser un material volátil, no fue lavado.

Se tomó inicialmente 487.7 g de ceniza volante, luego se secó al horno a una temperatura no mayor de 60 °C teniendo como resultado una masa de 485.7 g, determinando, así, la humedad natural que pueda tener la ceniza volante, teniendo en cuenta que el material se conserva sellado. En la tabla 3, se muestran los datos iniciales y el contenido de humedad.

Tabla 3.
Humedad natural de la ceniza volante

Recipiente No.	2
Peso Húmedo [g]	487.7
Peso Seco [g]	485.7
Peso Tara [g]	10.8
Contenido de humedad [%]	0.42

Nota: Resultados obtenidos en laboratorio para el contenido de humedad natural.

Finalmente, se procedió a realizar el tamizado manualmente, chequeando que la operación se haya terminado y se registró el peso retenido en cada tamiz tal y como se muestra en la figura 5. los datos en su totalidad están registrados en la tabla 4.

Figura 5.
Masa retenida en el tamiz No. 200



Tabla 4.
Granulometría de la ceniza volante

Tamiz	Tamiz [mm]	Peso [g]	% Retenido parcial	% Pasa
4	4.5	0	0.0	100
10	2	0.3	0.1	99.9
20	1.7	1.2	0.3	99.7
40	0.4	5.5	1.2	98.5
60	0.3	70	14.7	83.8
100	0.2	173.1	36.4	47.3
200	0	221.9	46.7	0.6
Total		474.9	100.0	

3.2. Límites de Atterberg

El segundo ensayo que se le realizó a la muestra de suelo virgen, tras comprobar que era un suelo fino, mediante la granulometría mencionada anteriormente, fue la de sus límites líquido, plástico y con ellos su índice de plasticidad, para, con esto, poder caracterizar adecuadamente la muestra.

3.2.1. Límite plástico

Se empezó comprobando el límite plástico del suelo, ya que si este no se presenta se considerará que la muestra tiene carácter no plástico (NP), tal como se indica en la norma INV-126; para esto lo primero que se debe realizar es separar más de 20 g, de las partículas que pasan a través del tamiz de $425 \mu\text{m}^2$ (No. 40), lo cual se realizó mediante el método de preparación por vía seca especificado en la sección INV-125, tal como se muestra en la figura 6, hasta alcanzar un total de 377.7 gramos, incluyendo el peso de la tara, suficientes para

² Micrómetros: μm

realizar de manera adecuada los ensayos requeridos para ambos límites, lo cual se presenta en la figura 7.

Posteriormente, se procede a hidratar una porción de la muestra mayor a 30 g, hasta que se permita la formación de masas elipsoidales, de las cuales se extraen porciones suficientes para hacer rollos con la mano, de tal forma que se le vaya extrayendo humedad a la muestra hasta que los rollos se quiebren en tamaños de aproximadamente 3.2 mm de diámetro, sin permitir que se puedan volver a moldear en forma elipsoidal, hasta tener una masa mayor a 6 g, de acuerdo a lo solicitado en la norma INV-126, para este caso se tomaron dos muestras de más de 15 g, para poder comprobar que no se supere un error del 1.4% entre ellas, lo cual se consiguió. El procedimiento anterior se presenta en las figuras 8 y 9.

Figura 6.

Tamizado de las fracciones finas que pasan el tamiz No. 40



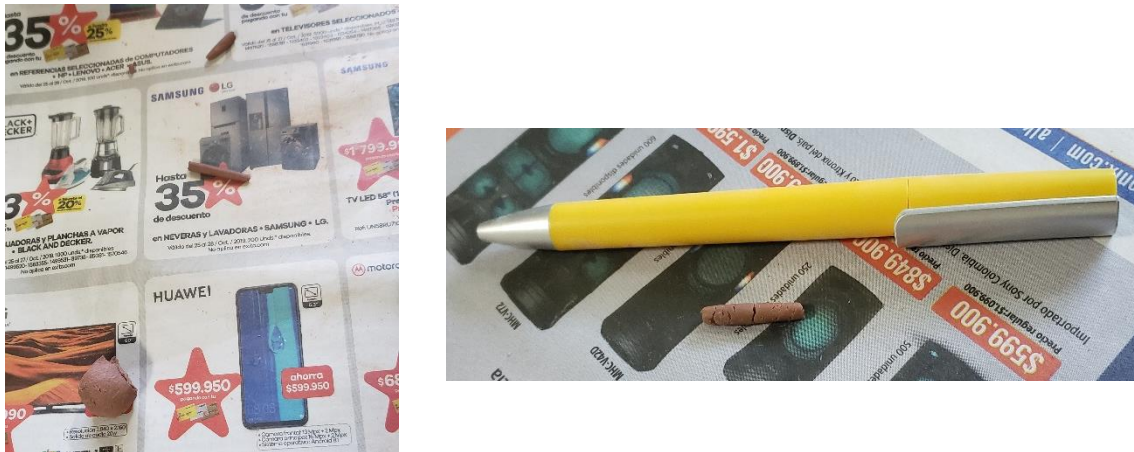
Figura 7.

Muestra que pasa por el tamiz No. 40



Figura 8.

Masa elipsoidal y rollo formado de acuerdo al método manual de la INV-126



La parte final del ensayo es el secado de las dos muestras, sin embargo, por disponibilidad de los equipos, este fue llevado a cabo junto con las muestras obtenidas para la determinación del límite líquido, por lo que los resultados serán presentados más adelante.

Figura 9.

Masa final de las muestras para el límite plástico, incluyendo el peso de la tara



3.2.2. Límite líquido

La siguiente característica del suelo que se buscó determinar fue su límite líquido, para lo que se utilizó la muestra tamizada restante, humedeciéndola y ensayándola en la cazuela de Casagrande, de tal forma que el límite líquido será correspondiente al contenido de agua

necesario para que la muestra ranurada se cierre a los 25 golpes, tal como se indica en la norma INV-125, sin embargo, debido a la dificultad de conseguir este resultado directamente, deben realizarse puntos que permitan hacer una gráfica semi-logarítmica del número de golpes versus el contenido de agua, con el fin de iterar el contenido de agua objetivo de esta. Así, para tener un buen rango de puntos para la gráfica, se buscaron contenidos de agua que permitieran obtener el cierre de la ranura entre los 40-50 golpes, 30-40 golpes, 20-30 golpes y 10-20 golpes, tomando una porción en la zona del cierre, del espesor de la espátula, en una tara, lo anterior se ilustra en las figuras 10 y 11.

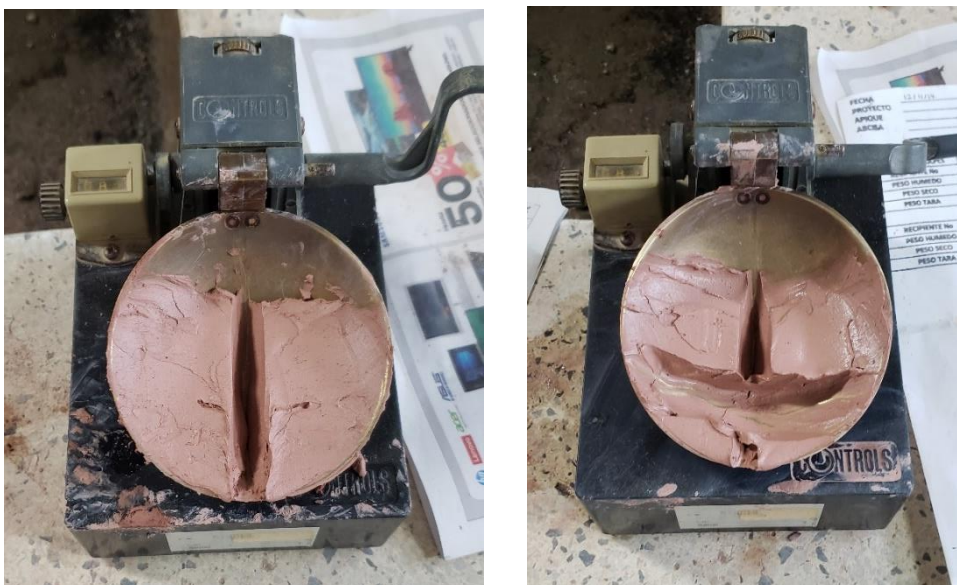
Figura 10.

Muestra de suelo virgen humedecida



Figura 11.

Cierre de la ranura para el primer intervalo de golpes objetivo



Tras tomar todas las muestras indicadas anteriormente, se procede a realizar el secado en el horno de los especímenes obtenidos tanto para determinar el límite líquido como el plástico, tal y como se muestra en la figura 12, con el objetivo de medir el contenido de humedad de las muestras con la ecuación 1.

Figura 12.

Taras puestas en el horno para el secado de las muestras



$$\text{Contenido de agua} = \frac{\text{masa suelo húmedo} - \text{masa suelo seco}}{\text{masa suelo seco}} * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

De tal manera que los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.

Tabla 5.

Límites de Atterberg del suelo virgen

Recipiente No.	3	11
Peso Húmedo [g]	23.5	23.4
Peso Seco [g]	20.3	20.1
Peso Tara [g]	5.6	5.5
Contenido de Humedad [%]	21.77	22.60

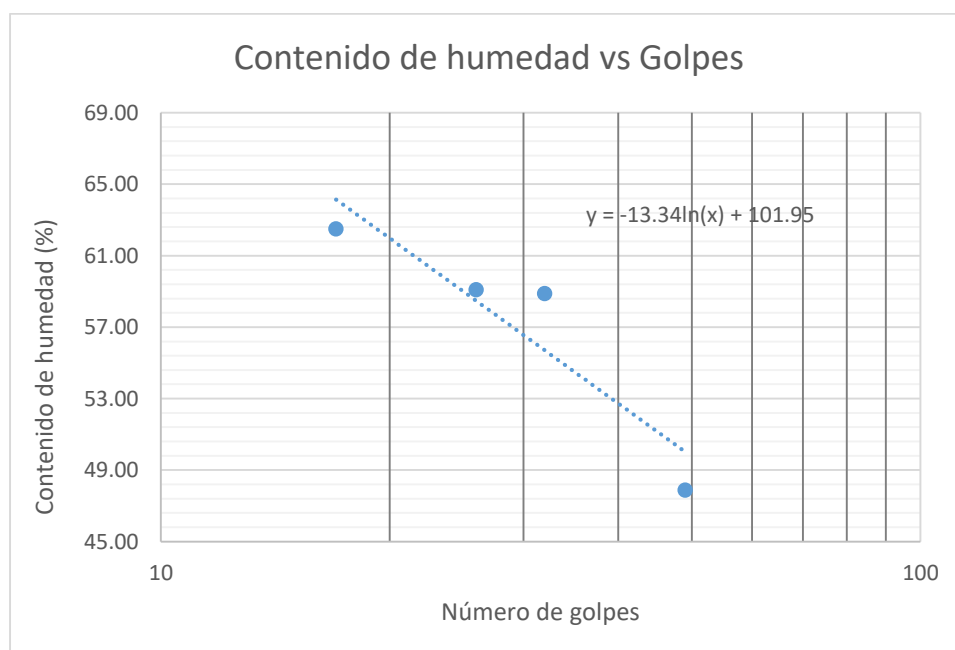
Límite Plástico		22			
Determinación	1	2	3	4	
Número de Golpes	49	32	26	17	
Recipiente No.	1	4	8	55	
Peso Húmedo [g]	29.8	22.5	23.2	22.5	
Peso Seco [g]	219	16.2	16.7	16	
Peso Tara [g]	5.4	5.5	5.7	5.6	
Contenido de Humedad [%]	47.88	58.88	59.09	62.5	
Límite Líquido		59			

Nota: Datos tomados en laboratorio y resultados obtenidos para los límites de Atterberg del suelo virgen.

Con base en los resultados de humedad mostrados, se prosiguió a calcular cada uno de los límites, para lo cual, en el caso del límite plástico se tomó el valor entero más cercano al promedio de ambas humedades, mientras que para el líquido se generó una recta para determinar la humedad a los 25 golpes, mediante una gráfica semi-logarítmica, tal como se muestra en la figura 13.

Figura 13.

Gráfica correspondiente al límite líquido

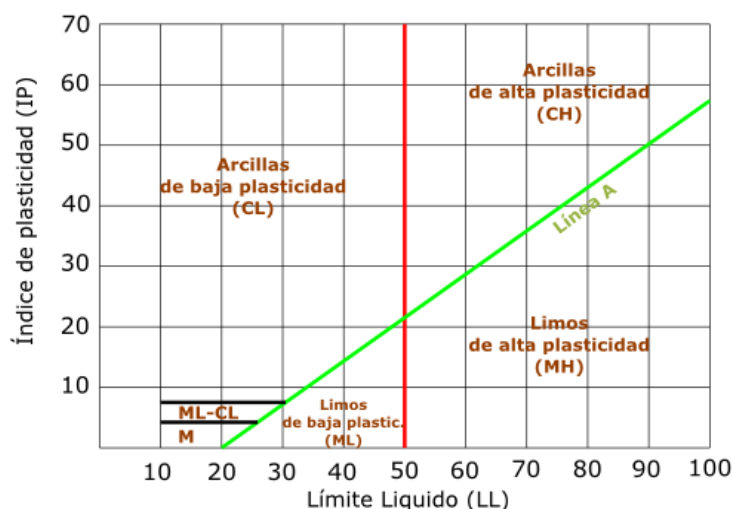


Nota: Gráfica utilizada para determinar el límite líquido.

Teniendo los valores de 59 y 22 para los límites líquido y plástico, respectivamente, se realizó el cálculo del índice plástico, restando ambos valores, con lo que se obtiene un resultado de 37, posteriormente se determinó el tipo de suelo con base en la gráfica de plasticidad del USCS, presentada en la figura 14, obteniendo, de esta manera, que se trata de una arcilla de alta plasticidad (CH).

Figura 14.

Gráfica USCS para clasificación de suelos



Nota: Tomado de: <<http://arquitectosbogota.blogspot.com/2016/04/sistema-unificado-de-clasificacion-de.html>>

Cabe destacar que, para el caso de la ceniza volante, el material no permitió que se realizarán rollos consistentes a la hora de realizar el ensayo de límite plástico, por lo cual se determinó que la ceniza volante utilizada es un material no plástico (NP).

3.3. Gravedad específica de las partículas sólidas del suelo

Para la realización de este ensayo se siguió el procedimiento señalado en la norma INV-128 para un picnómetro de 500 ml y mediante el método A, diseñado para el uso de muestras húmedas.

Lo primero que se realizó fue la calibración del picnómetro y la medición de su peso vacío y con agua hasta la marca de calibración, los cuales se nombran como M_p y $M_{pw,t}$

respectivamente; para el caso de estudio, el picnómetro había sido previamente calibrado por los responsables del laboratorio. Posteriormente, de acuerdo a lo señalado en la norma, se toma una muestra representativa de 50 ± 10 g, la cual fue de 59.1 g y con la que se preparó una lechada, mezclándola con un litro de agua, la lechada resultante fue vertida hasta que se encontró entre 1/3 y 1/2 de la profundidad del cuerpo principal del picnómetro y se terminó de llenar con agua hasta la marca de calibración, con cuidado de que no quedara aire atrapado y manteniendo la temperatura, previamente registrada, estable. A continuación, se tomaron los datos del peso del picnómetro con agua y suelo, $M_{pws,t}$ y se determinaron la densidad del agua y el coeficiente de corrección, K, de acuerdo con la temperatura y con base en la tabla 128-2 de la norma, mostrada en la figura 15.

Figura 15.

Densidad y factor de corrección del agua para diferentes temperaturas

Temperatura (° C)	Densidad (g/ cm ³)	Coefficiente (K)	Temperatura (° C)	Densidad (g/ cm ³)	Coefficiente (K)	Temperatura (° C)	Densidad (g/ cm ³)	Coefficiente (K)	Temperatura (° C)	Densidad (g/ cm ³)	Coefficiente (K)
15.0	0.99910	1.00090	16.0	0.99895	1.00074	17.0	0.99878	1.00057	18.0	0.99860	1.00039
.1	0.99909	1.00088	.1	0.99893	1.00072	.1	0.99876	1.00055	.1	0.99858	1.00037
.2	0.99907	1.00087	.2	0.99891	1.00071	.2	0.99874	1.00054	.2	0.99856	1.00035
.3	0.99906	1.00085	.3	0.99890	1.00069	.3	0.99872	1.00052	.3	0.99854	1.00034
.4	0.99904	1.00084	.4	0.99888	1.00067	.4	0.99871	1.00050	.4	0.99852	1.00032
.5	0.99902	1.00082	.5	0.99886	1.00066	.5	0.99869	1.00048	.5	0.99850	1.00030
.6	0.99901	1.00080	.6	0.99885	1.00064	.6	0.99867	1.00047	.6	0.99848	1.00028
.7	0.99899	1.00079	.7	0.99883	1.00062	.7	0.99865	1.00045	.7	0.99847	1.00026
.8	0.99898	1.00077	.8	0.99881	1.00061	.8	0.99863	1.00043	.8	0.99845	1.00024
.9	0.99896	1.00076	.9	0.99879	1.00059	.9	0.99862	1.00041	.9	0.99843	1.00022
19.0	0.99841	1.00020	20.0	0.99821	1.00000	21.0	0.99799	0.99979	22.0	0.99777	0.99957
.1	0.99839	1.00018	.1	0.99819	0.99998	.1	0.99797	0.99977	.1	0.99775	0.99954
.2	0.99837	1.00016	.2	0.99816	0.99996	.2	0.99795	0.99974	.2	0.99773	0.99952
.3	0.99835	1.00014	.3	0.99814	0.99994	.3	0.99793	0.99972	.3	0.99771	0.99950
.4	0.99833	1.00012	.4	0.99812	0.99992	.4	0.99791	0.99970	.4	0.99768	0.99947
.5	0.99831	1.00010	.5	0.99810	0.99990	.5	0.99789	0.99968	.5	0.99766	0.99945
.6	0.99829	1.00008	.6	0.99808	0.99987	.6	0.99786	0.99966	.6	0.99764	0.99943
.7	0.99827	1.00006	.7	0.99806	0.99985	.7	0.99784	0.99963	.7	0.99761	0.99940
.8	0.99825	1.00004	.8	0.99804	0.99983	.8	0.99782	0.99961	.8	0.99759	0.99938
.9	0.99823	1.00002	.9	0.99802	0.99981	.9	0.99780	0.99959	.9	0.99756	0.99936
23.0	0.99754	0.99933	24.0	0.99730	0.99909	25.0	0.99705	0.99884	26.0	0.99679	0.99858
.1	0.99752	0.99931	.1	0.99727	0.99907	.1	0.99702	0.99881	.1	0.99676	0.99855
.2	0.99749	0.99929	.2	0.99725	0.99904	.2	0.99700	0.99879	.2	0.99673	0.99852
.3	0.99747	0.99926	.3	0.99723	0.99902	.3	0.99697	0.99876	.3	0.99671	0.99850
.4	0.99745	0.99924	.4	0.99720	0.99899	.4	0.99694	0.99874	.4	0.99668	0.99847
.5	0.99742	0.99921	.5	0.99717	0.99897	.5	0.99692	0.99871	.5	0.99665	0.99844
.6	0.99740	0.99919	.6	0.99715	0.99894	.6	0.99689	0.99868	.6	0.99663	0.99842
.7	0.99737	0.99917	.7	0.99712	0.99892	.7	0.99687	0.99866	.7	0.99660	0.99839
.8	0.99735	0.99914	.8	0.99710	0.99889	.8	0.99684	0.99863	.8	0.99657	0.99836
.9	0.99732	0.99912	.9	0.99707	0.99887	.9	0.99681	0.99860	.9	0.99654	0.99833
27.0	0.99652	0.99831	28.0	0.99624	0.99803	29.0	0.99595	0.99774	30.0	0.99565	0.99744
.1	0.99649	0.99828	.1	0.99621	0.99800	.1	0.99592	0.99771	.1	0.99562	0.99741
.2	0.99646	0.99825	.2	0.99618	0.99797	.2	0.99589	0.99768	.2	0.99559	0.99738
.3	0.99643	0.99822	.3	0.99615	0.99794	.3	0.99586	0.99765	.3	0.99556	0.99735
.4	0.99641	0.99820	.4	0.99612	0.99791	.4	0.99583	0.99762	.4	0.99553	0.99732
.5	0.99638	0.99817	.5	0.99609	0.99788	.5	0.99580	0.99759	.5	0.99550	0.99729
.6	0.99635	0.99814	.6	0.99607	0.99785	.6	0.99577	0.99756	.6	0.99547	0.99726
.7	0.99632	0.99811	.7	0.99604	0.99783	.7	0.99574	0.99753	.7	0.99544	0.99723
.8	0.99629	0.99808	.8	0.99601	0.99780	.8	0.99571	0.99750	.8	0.99541	0.99720
.9	0.99627	0.99806	.9	0.99598	0.99777	.9	0.99568	0.99747	.9	0.99538	0.99716

Nota: Tomada de la tabla 128-2 de la norma Invías E-128

Finalmente, se puso la muestra de suelo utilizada en una nueva tara y se secó al horno, para determinar la masa seca de la muestra de suelo, M_s , se realizó los cálculos pertinentes para

determinar el volumen promedio de calibración del picnómetro seco, V_p , la densidad de las partículas sólidas y su gravedad específica, ρ_s y G_t respectivamente y la gravedad específica a 20°C, basados en las siguientes ecuaciones:

$$V_p = \frac{M_{pw,t} - M_p}{\text{Densidad de la masa de agua}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s)} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\rho_s = G_t * \text{Densidad de la masa de agua} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$G_{20^\circ\text{C}} = K * G_t \quad (\text{Ecuación 5})$$

Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 6.

Tabla 6.

Resultados para la gravedad específica de las partículas sólidas del suelo

Peso Tara [g]	10.7
Peso Inicial [g]	59.1
Peso Matraz M_p [g]	186.1
Peso Matraz + Agua $M_{pw,t}$ [g]	684
Peso Matraz + Agua + Muestra $M_{pws,t}$ [g]	720.6
Peso Seco M_s [g]	67.2
Temperatura [°C]	27
Densidad Real del Agua [g/cm³]	0.99652
Coefficiente de Corrección K	0.99831
Volumen Promedio del Picnómetro V_p [ml]	499.64
Gravedad Específica G_t	2.84
Gravedad Específica a 20°C $G_{20^\circ\text{C}}$	2.83
Densidad de los sólidos ρ_s [g/cm³]	2.83

Nota: Datos tomados en laboratorio y resultados obtenidos para la gravedad de los sólidos del suelo virgen.

Al repetir este procedimiento sobre la mezcla óptima se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 7.

Tabla 7.

Resultados para la gravedad específica de las partículas sólidas del suelo en la mezcla óptima

Peso Tara [g]	10.7
Peso Inicial [g]	59.1
Peso Matraz M_p [g]	100.47
Peso Matraz + Agua $M_{pw,t}$ [g]	351.14
Peso Matraz + Agua + Muestra $M_{pws,t}$ [g]	376.88
Peso Seco M_s [g]	50.72
Temperatura [°C]	23.6
Densidad Real del Agua [g/cm³]	0.9974
Coefficiente de Corrección K	0.99919
Volumen Promedio del Picnómetro V_p [ml]	249.67
Gravedad Específica G_t	2.80
Gravedad Específica a 20°C $G_{20°C}$	2.80
Densidad de los sólidos ρ_s [g/cm³]	2.80

Nota: Datos tomados en laboratorio y resultados obtenidos para la gravedad de los sólidos de la mezcla óptima.

3.4. Densidad de la ceniza volante

Para definir la densidad de la ceniza se utilizó como base la norma INV-307, la cual especifica el procedimiento que se debe llevar a cabo para determinar la densidad del cemento, se decidió utilizar esta como base debido a que no se cuenta con una norma o guía específica para la ceniza en el país y al ser un material con características cementantes, es posible la aplicación de la misma. De acuerdo a esto, es necesario el uso de un frasco de Le Chatelier, el cual fue llenado hasta la marca del cuello entre 0 y 1 ml con kerosene, ubicándose en este caso en una lectura estable de 0.5 ml, tal como se muestra en la figura 16. Posteriormente, se añadió aproximadamente 50 g de ceniza volante de manera dosificada, a la vez que se utilizó un

vibrador, de tal forma que no quede aire atrapado y se procure que el material no se pegue a las paredes del frasco, finalmente, al igual que con el kerosene, se sumergió el frasco en un baño en agua temperatura constante, asegurando que la temperatura de la mezcla no varíe más de 0.2°C, hasta que se obtengan dos o tres lecturas iguales de volumen, momento en el que se considera estabilizado, lo cual se presenta en la figura 17. Con los datos obtenidos mediante el procedimiento anterior se realizó los siguientes cálculos para determinar la densidad de la ceniza, los resultados obtenidos se enuncian en las tablas 8, 9 y 10. Es importante notar que el suelo y la ceniza presentan densidades relativamente similares, lo cual es relevante a la hora de realizar las mezclas, ítem que será explicado con mayor detalle en el capítulo siguiente.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa de cemento}}{\text{Volumen desplazado}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Figura 16.
Frasco de Le Chatelier lleno de kerosene entre las marcas

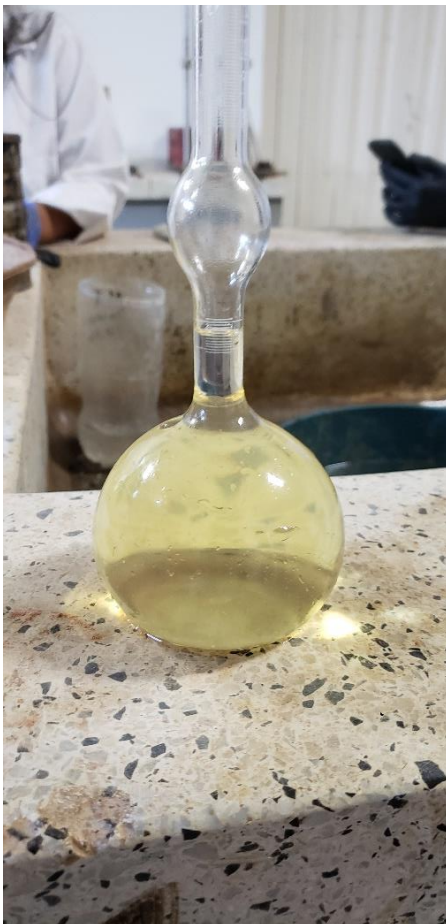


Figura 17.
Frasco de Le Chatelier con muestra ya estabilizada



Tabla 8.*Volumen de kerosene*

Lectura	Volumen [mL]
1	0.5
2	0.5
3	0.5

Nota: Datos tomados en laboratorio y resultados obtenidos para el volumen de kerosene inicial.

Tabla 9.*Volumen de kerosene más muestra*

Lectura	Volumen [mL]
1	23.2
2	22.8
3	22.7
4	22.6
5	22.6
6	22.6

Nota: Datos tomados en laboratorio y resultados obtenidos con la muestra ya estabilizada.

Tabla 10.*Densidad de la ceniza volante*

Volumen [mL]	22.1
Masa [g]	49.5
Densidad [g/cm³]	2.24

Nota: Datos tomados en laboratorio y resultados obtenidos para la densidad de la ceniza volante.

4. Mezcla suelo-ceniza volante

Tras haber caracterizado adecuadamente el suelo y la ceniza, se procedió con la realización de las diferentes mezclas, a las cuales se les aplicó como ensayo índice el correspondiente a los límites de Atterberg, buscando el resultado óptimo, entendido como aquel porcentaje de mezcla que permita disminuir la plasticidad del suelo, de tal manera que pase de ser una arcilla de alta plasticidad, CH, a una de baja plasticidad, CL, adicionando la mayor cantidad de ceniza volante posible, sin alterar las propiedades mecánicas del suelo, para lo cual se decidió evaluar cantidades de mezcla menores al 25% de ceniza volante en peso. Es importante tener en cuenta que las mezclas se realizaron en base a la masa y no al volumen de

los materiales, debido principalmente a la plasticidad de las arcillas que dificulta la lectura de su volumen de acuerdo a sus condiciones de humedad y a que la densidad de ambos materiales, como se comprobó durante su caracterización, es relativamente similar.

Con base en esto, se prepararon inicialmente 5 mezclas correspondientes al 5, 10, 15, 20 y 25% de ceniza en peso respectivamente, con base en los artículos presentados en el capítulo 1 y para lo cual se utilizó como guía la norma INV-603, que hace referencia a las mezclas de suelo y cal, esto debido a la similitud de los materiales y a que no se cuenta actualmente con una guía para mezclas de suelo y ceniza. De acuerdo a esto, para estas mezclas iniciales se prepararon 400 gramos de muestra adecuada para realizar los ensayos de límites correspondientes, debido a la limitante de la cantidad de suelo disponible, procurando el menor desperdicio de material posible. Así, se realizaron las 5 mezclas en una mezcladora mecánica hasta que cada una tuviera un color uniforme, tal como se muestra en las figuras 18, 19, 20 y 21.

Figura 18.

Correspondiente a la mezcla de 10% de ceniza



Figura 19.

Materiales utilizados en la mezcla de 10% de ceniza

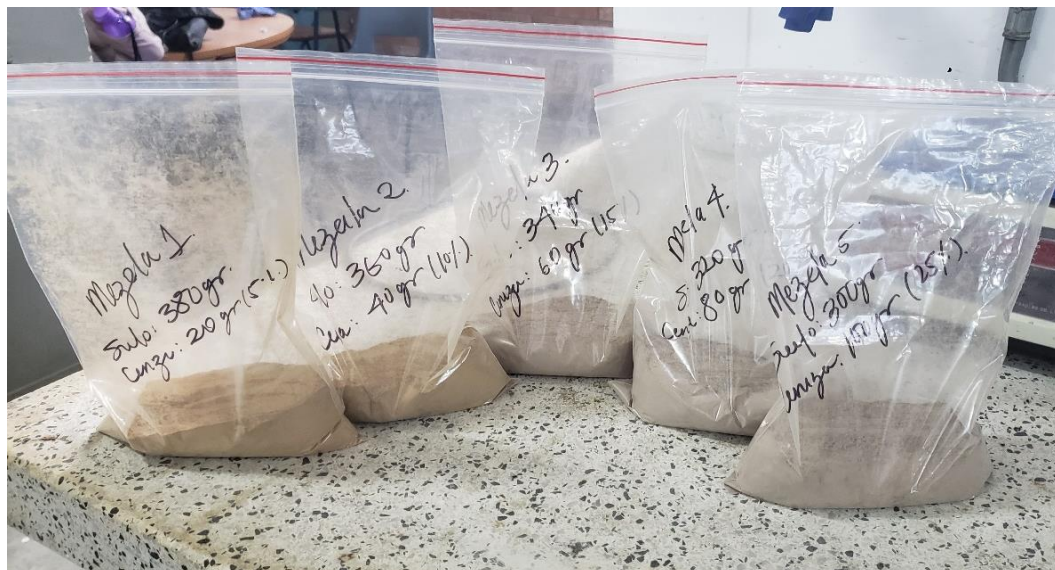
**Figura 20.**

Proceso de mezclado a un 10% de ceniza en peso



Figura 21.

Mezclas iniciales para los ensayos de límites



Después de finalizadas las mezclas iniciales, se procedió a realizar los ensayos de límites de Atterberg a cada una, de igual forma al procedimiento descrito en el capítulo 3.2, obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 11, a continuación.

Tabla 11.

Resultados de plasticidad obtenidos para las mezclas iniciales

Propiedad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
	Porcentaje de Ceniza Volante en Peso				
	5%	10%	15%	20%	25%
Límite Plástico	18	22	21	25	24
Límite Líquido	42	47	57	52	50
Índice Plástico	24	25	36	27	26
Tipo de Suelo	CL	CL	CH	CH	CH-CL

Nota: Resultados obtenidos en laboratorio para los índices de plasticidad para las diferentes mezclas iniciales.

Como se puede observar, el punto de inflexión donde se encuentra la mezcla óptima se encuentra en un rango de 10 a 15% de ceniza volante en peso, presente en la mezcla, por lo que se decidió realizar las mezclas correspondientes al 11, 12, 13 y 14% de ceniza en peso, de tal forma que se pueda determinar la mezcla óptima con mayor precisión. Siguiendo de esta manera el procedimiento descrito para las mezclas iniciales, los resultados finales de las mezclas adicionales se presentan en la tabla 12.

Tabla 12.

Resultados de plasticidad obtenidos para las mezclas adicionales

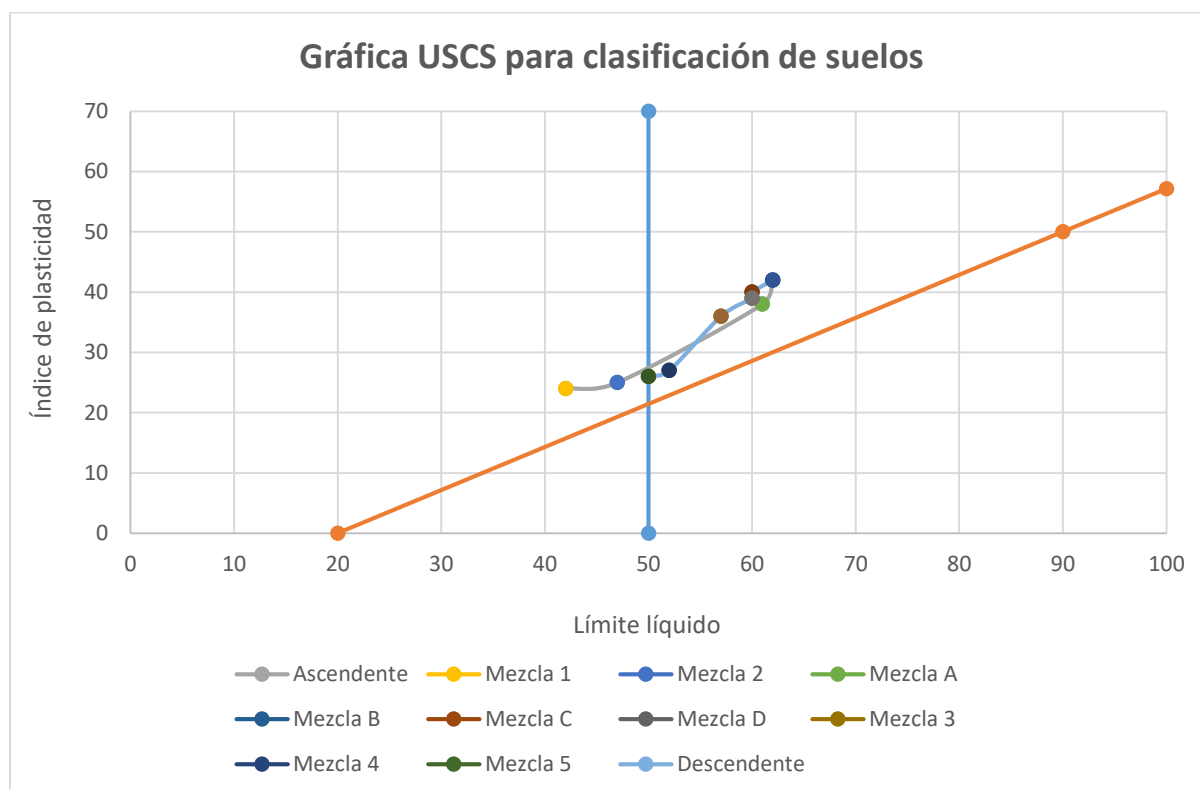
Propiedad	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla C	Mezcla D
	Porcentaje de Ceniza Volante en Peso			
	11%	12%	13%	14%
Límite Plástico	23	20	20	21
Límite Líquido	61	62	60	60
Índice Plástico	38	42	40	39
Tipo de Suelo	CH	CH	CH	CH

Nota: Resultados obtenidos en laboratorio para los índices de plasticidad para las diferentes mezclas adicionales.

Graficando los resultados obtenidos, se genera la curva sobre la gráfica USCS presentada en la figura 22.

Figura 22.

Comportamiento plástico de las mezclas suelo-ceniza



Nota: Gráfica utilizada para comparar el comportamiento de las diferentes mezclas con el fin de determinar el punto óptimo.

De acuerdo a la gráfica y a los resultados presentados, es posible observar que la mayor plasticidad se da en la mezcla B, correspondiente al 12% de ceniza, mientras que la mezcla 2, correspondiente al 10% de ceniza es la que se encuentra más próxima al límite entre CH y CL, por lo que se decide que esa es la mezcla óptima evaluada, para la cual se procede a realizar la

mezcla de 10 kg, necesarios para la aplicación de los ensayos presentados a continuación en el capítulo 5. Es importante denotar que para mezclas con contenido de ceniza mayores al 25% se podría obtener un buen comportamiento, de acuerdo a lo observado en la tendencia, sin embargo, se requiere un mayor análisis aplicado a mayores porcentajes, lo cual no se contempla en el alcance de este proyecto, ya que al utilizar porcentajes altos de ceniza también se debe evaluar el efecto que se puede presentar en las propiedades de resistencia propias del suelo, lo que esta fuera del objetivo de este proyecto.

5. Ensayos realizados sobre el suelo y la mezcla óptima

Finalmente, tras definir la mezcla óptima, se procedió a realizar los ensayos de proctor modificado, potencial de cambio volumétrico, consolidación y corte directo, tanto para el suelo virgen como para la mezcla óptima, con el fin de analizar el resultado de la optimización que presenta la ceniza en la expansividad del suelo arcilloso estudiado.

5.1. Proctor modificado

Para la determinación de la humedad óptima y la densidad máxima seca de la muestra de suelo y de la mezcla óptima, necesarias para que alcance el comportamiento requerido, se siguió el proceso de la norma INV-142-13.

5.1.1. Suelo virgen

De manera inicial se determinó el método de ensayo modificado de compactación a realizar según el material, siendo en este caso el método A ya que pasa por el tamiz de 4.75 mm (No.4).

Se prepararon, aproximadamente, entre 16 – 20 kg de muestra seca para el desarrollo de este ensayo, se cuarteó y se pasó por el tamiz No. 4 como se observa en la figura 23.

Figura 23.

Material cuarteado y tamizado por el tamiz No. 4



En segundo lugar, se estimó una humedad del 4% para agregar a la muestra inicial y luego se fue aumentando consecutivamente un 2% para diferentes muestras.

Posteriormente, se determinó la masa del molde como se muestra en la figura 24 para, así, iniciar el proceso de compactación.

Figura 24.

Peso del molde de compactación



De esta forma, se realizó la compactación del material accionando el martillo con 25 golpes por capa, completando 5 capas en total. Lo cual es consignado, junto con las dimensiones del molde en la tabla 13.

Tabla 13.
Dimensiones del molde para compactación

Molde No.	24
Número de capas	5
Número de golpes por capa	25
Diámetro del molde [cm]	10
Altura molde [cm]	11.5
Volumen molde [cm³]	903.21

Seguido de esto, se enrazó el material con el molde para, luego, registrar el peso de la muestra más el molde. Se tomó una muestra del material compactado para determinar el contenido de humedad y se desmoldó como se observa en la figura 25 y se repitió la operación para 4 muestras adicionales con diferentes porcentajes de humedad. Los datos totales del ensayo están registrados en la tabla 14 y 15.

Figura 25.
Desmolde del material



Finalmente, después de determinar el contenido de humedad de cada punto con su respectiva densidad seca, se graficó cada uno de estos puntos para determinar la humedad óptima y la densidad seca máxima, como se ilustra en la figura 26, cuyos resultados se consignan en la tabla 16.

Tabla 14.
Contenido de humedad para las diferentes muestras ensayadas

Peso tara [g]	16	15.5	15.8	15.3	15.8	15.7	15.9	15.8	15.8	15.7
Peso tara + suelo húmedo [g]	58.7	58	60.7	59	50.7	50	50.6	51.7	54.4	55.4
Peso tara + suelo seco [g]	53.8	52.9	54.7	52.8	45.5	45	45	45.9	47.6	48.2
Peso agua [g]	4.9	5.1	6	6.2	5.2	5	5.6	5.8	6.8	7.2
Peso sólido [g]	37.8	37.4	38.9	37.5	29.7	29.3	29.1	30.1	31.8	32.5
Humedad [%]	13	13.6	15.4	16.5	17.5	17.1	19.2	19.3	21.4	22.2
Promedio humedad [%]	13.3		15.98		17.29		19.26		21.77	

Tabla 15.
Densidad seca para las diferentes muestras ensayadas

Peso molde [g]	4278	4278	4278	4278	4278
Peso molde + suelo húmedo [g]	6100	6213	6254	6190	6156
Peso suelo húmedo [g]	1822	1935	1976	1912	1878
Densidad humedad [g]	2.017	2.142	2.188	2.117	2.079
Densidad seca [g]	1.78	1.85	1.87	1.78	1.71

Figura 26.
Gráfica de resultados del ensayo de proctor modificado para el suelo

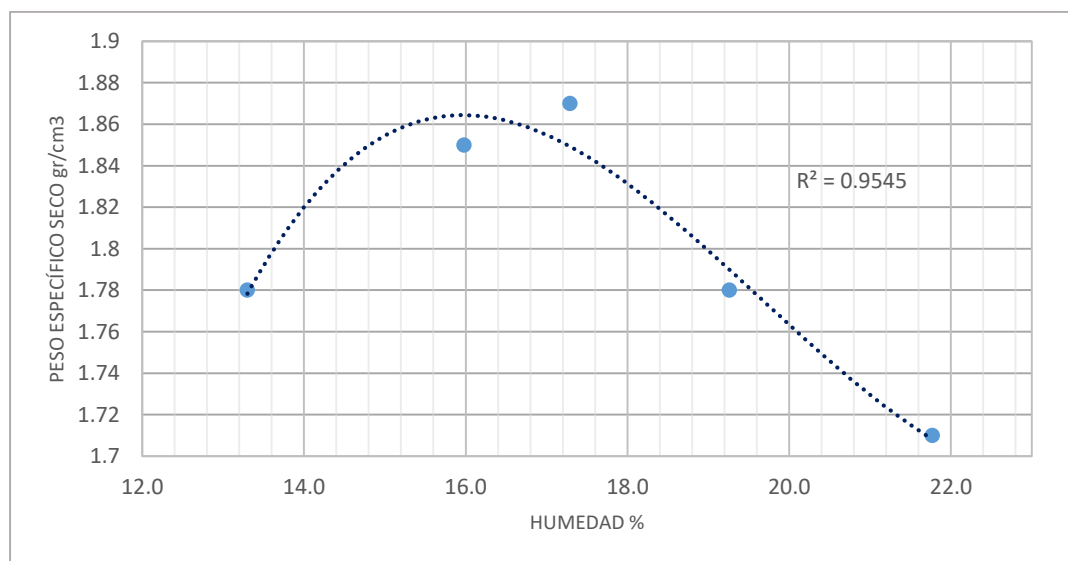


Tabla 16.*Resultados del ensayo de proctor modificado para el suelo virgen*

Humedad óptima [%]	16
Densidad máxima seca [g/cm³]	1.861

5.1.2. Mezcla óptima

Para la determinación de la humedad óptima y la densidad máxima seca de la mezcla de suelo y ceniza volante se realizó el mismo procedimiento que con la muestra de suelo virgen.

Inicialmente se determinó el método de ensayo modificado de compactación a realizar, siendo de igual manera, el método A ya que pasa por el tamiz de 4.75 mm (No.4). En base a esto se procedió a la preparación del material, el registro del peso del molde y así realizar el proceso de compactación, teniendo en cuenta la información suministrada en la tabla 17.

Tabla 17.*Datos iniciales para la compactación*

Molde No.	5
Número de capas	5
Número de golpes por capa	25
Peso del molde [g]	3860
Volumen molde [cm³]	956.0

Seguido de esto, se enrazó el material con el molde para, luego, registrar el peso de la muestra más el molde. Se tomó una muestra del material compactado para determinar el contenido de humedad y por último se desmoldó. Se realizó la operación para 4 muestras diferentes. Los datos totales del ensayo están registrados en las tablas 18 y 19.

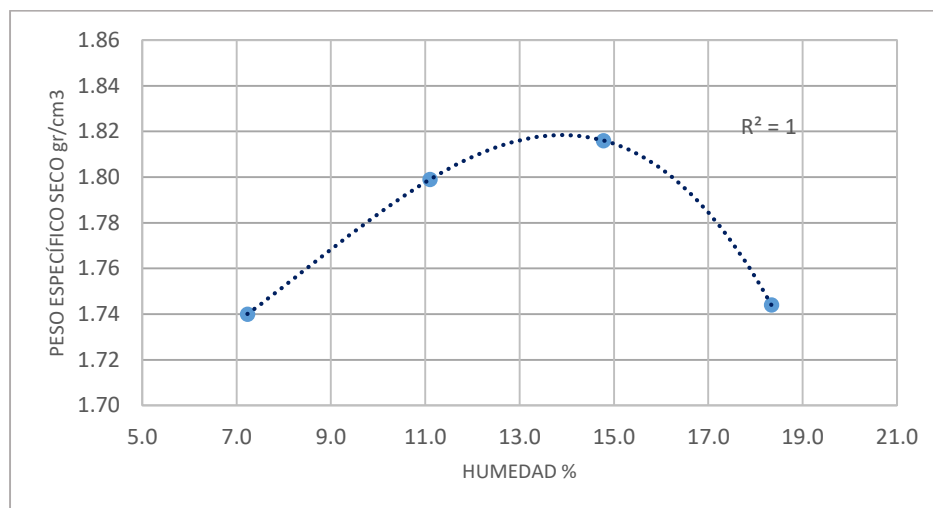
Tabla 18.*Contenido de humedad para las diferentes muestras de mezcla ensayadas*

Peso tara [g]	4.60	5.76	5.92	5.48
Peso tara + suelo húmedo [g]	61.88	89.43	75.96	62.26
Peso tara + suelo seco [g]	58.02	81.07	66.94	53.46
Peso agua [g]	3.86	8.36	9.02	8.80
Humedad [%]	7.23	11.10	14.78	18.34

Tabla 19.*Densidad seca para las diferentes muestras de mezcla ensayadas*

Peso molde + suelo húmedo [g]	5644	5771	5853	5833
Peso suelo húmedo [g]	1784	1911	1993	1973
Densidad húmeda [g/cm³]	1.866	1.999	2.085	2.064
Densidad seca [g/cm³]	1.740	1.799	1.816	1.744

Luego de determinar el contenido de humedad de cada punto con su respectiva densidad seca, se graficó cada uno de estos puntos para determinar la humedad óptima y la densidad seca máxima, como se ilustra en la figura 27, cuyos resultados se consignan en la tabla 20.

Figura 27.*Gráfica de resultados del ensayo de proctor modificado para la mezcla***Tabla 20.***Resultados del ensayo de proctor modificado para la mezcla óptima*

Humedad óptima [%]	14
Densidad máxima seca [g/cm³]	1.819

5.2. Ensayo de potencial de cambio volumétrico utilizando el aparato de Lambe

Después de realizado el ensayo de proctor modificado y de obtenida la humedad óptima se realizó el ensayo de cambio volumétrico con el fin de determinar de una manera cualitativa un indicador que permita intuir el nivel de hinchamiento del suelo arcilloso, con el fin de

evaluar de una manera más completa el resultado de la estabilización posterior con la ceniza volante. De esta manera, se siguieron los lineamientos de la norma INV-120, realizando el ensayo para un estado húmedo, en cuyo caso la humedad utilizada es la óptima, y con un contenido de humedad igual al límite plástico, para ello lo primero es determinar la humedad natural del suelo al momento del ensayo, con el fin de mezclarlo con la cantidad de agua suficiente para alcanzar la humedad deseada, tras esto, se procedió a pesar el anillo, como se muestra en la figura 28, y a compactar la muestra con ayuda del martillo calibrado, mostrado en la figura 29, de acuerdo al número de capas y golpes señalados en la tabla 120-1 de la norma, presentada a continuación como la tabla 21.

Figura 28.

Masa del anillo porta muestras



Figura 29.

Martillo calibrado para compactación de muestras



Tabla 21.*Alternativas de compactación de la muestra*

Humedad	Número de capas	Número de golpes por capa
Límite Plástico	1	5
Húmedo (100% de humedad relativo)	3	4
Seco (50% de humedad relativa)	3	7 para las dos primeras capas y 8 para la última

Nota: Tomada de la tabla 120-1 de la norma Invías E-120

Posteriormente, se pesó la muestra junto al anillo, se montó el equipo y se calibró el lector en cero, tal como se muestra en las figuras 30, 31 y 32, para finalmente tomar el dato de expansión tras las dos horas, desmontar el equipo, medir la humedad final de la muestra y las medidas del anillo, con el propósito de calcular el índice de hinchamiento y con este el potencial de cambio volumétrico, mediante las ecuaciones presentadas a continuación y el uso de la gráfica 120-1 de la norma, mostrada en la figura 33. Los resultados para ambos casos son presentados en las tablas 22 y 23.

Figura 30.*Masa de la muestra compactada junto al anillo, para una humedad igual al límite plástico***Figura 31.***Montaje del anillo en el aparato de Lambe*

Figura 32.

Montaje final del aparato de Lambe y calibración del lector en cero

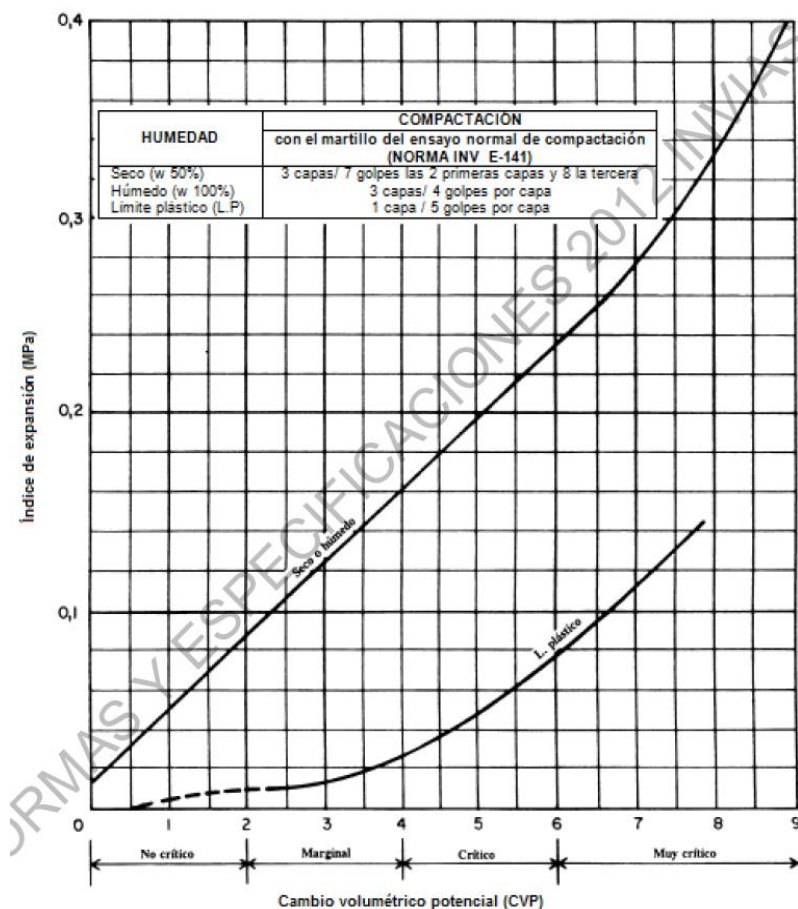


$$\text{Índice de hinchamiento} = \frac{\text{Fuerza aplicada}}{\text{Sección transversal de la probeta}} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde la fuerza aplicada se utiliza en newtons, N y se determina con base en las líneas recorridas, teniendo en cuenta que cada una representa una fuerza equivalente a 1.6 kg para la muestra con humedad igual al límite plástico y de 0.8 kg para la muestra a la humedad óptima y la sección transversal del anillo es igual a 3848.45 mm². El índice de hinchamiento se da en mega-pascales, MPa.

Figura 33.

Gráfica de cambio volumétrico vs índice de hinchamiento



Nota: Tomada de la figura 120-1 de la norma Invías E-120

Tabla 22.

Resultados obtenidos a una humedad inicial igual al límite plástico

Índice de hinchamiento	0.020	MPa
CVP	3.5	Marginal

Nota: Resultados de laboratorio obtenidos con una humedad igual al límite plástica.

Tabla 23.

Resultados obtenidos a una humedad inicial igual a la humedad óptima

Índice de hinchamiento	0.126	MPa
CVP	3.3	Marginal

Nota: Resultados de laboratorio obtenidos con una humedad igual a la humedad óptima.

Como se puede observar, el suelo presenta un cambio volumétrico potencial marginal, cercano a crítico, esto concuerda con el comportamiento arcilloso esperado para el mismo.

5.3. Ensayo de consolidación unidimensional

5.3.1. Suelo virgen

Tras obtener un primer criterio cualitativo, se pasó a buscar un resultado cuantitativo que permitiera conocer, de una manera más exacta, el comportamiento de expansividad del suelo, para ello es utilizado el ensayo de consolidación unidimensional, de acuerdo a la norma INV-151, con cargas, M_a , de 2, 4, 8 y 16 kg. Para esto, lo primero que se realizó es la preparación de la muestra a las condiciones de humedad óptima, determinada con el ensayo de proctor modificado, se pesó el anillo junto a la muestra, seguido a esto, se saturó y se dejó una carga mínima de 100 gramos durante 24 horas para alcanzar un estado estabilizado en la muestra y posteriormente empezar a realizar los procesos de carga en intervalos de 24 horas, registrando los resultados de consolidación del suelo en los intervalos indicados por la norma, hasta alcanzar los 16 kg, tal como se puede observar en la figura 34.

Figura 34.

Carga de 2 kg para el ensayo de consolidación unidimensional



Al terminar con las 4 cargas, se procedió a realizar el proceso de descarga y al terminar la toma de datos sin carga, se realizó el proceso de recarga, utilizando de nuevo las cargas de 2, 4, 8 y 16 kg. Finalmente, tras obtener todas las lecturas de consolidación y expansión del

suelo, se tomó la altura final de la muestra, se pasó a secar la muestra y a registrar el peso seco y el peso del anillo y se registran las dimensiones del anillo, a partir de las cuales se calculan el área, A, y el volumen, Vo, del mismo. Es importante recalcar los siguientes resultados:

- Altura del anillo, Ho: 2.2 cm
- Diámetro del anillo: 5 cm
- Masa del anillo: 82.9 gr
- Altura final de la muestra, Het: 1.88 cm
- Masa del anillo y la muestra final, MT: 80.1 gr
- Masa de la muestra seca, Md: 66.4 gr

Tras terminar el ensayo, se procedió a realizar los siguientes cálculos, para la muestra en general:

$$MT_o = \text{Masa de anillo y muestra inicial} - \text{Masa del anillo} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$\%W = \frac{MT - Md}{Md} * 100 \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$V_s = \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$e_o = \frac{H_o - H_s}{H_s} \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$e_f = \frac{H_{et} - H_s}{H_s} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$S_o = \frac{MT_o - Md}{A * \rho_s * (H_o - H_s)} * 100 \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$S_f = \frac{MT - Md}{A * \rho_s * (H_{et} - H_s)} * 100 \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

MT_o: Masa total del espécimen antes del ensayo

%W: Humedad o contenido de agua

V_s: Volumen de sólidos

e: Relación de vacíos

S: Grado de saturación

De esta forma, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 24.

Tabla 24.

Resultados obtenidos para la muestra de suelo sometida a consolidación unidimensional

Deformación Unitaria	0.001	mm
Peso Unitario	0.80	kg
Peso del Anillo	82.90	g
Peso del Anillo + Muestra	160.10	g
MT_o	77.20	g
H_o	2.20	cm
Diámetro del Anillo	5.00	cm
Área del Anillo	0.00196	m ²
V_o	43.20	cm ³
H_{et}	1.88	cm
MT	80.10	g
M_d	66.40	g
%W_o	16.27	%
%W	20.63	%
ρ_d	1.54	g/cm ³
V_s	23.47	cm ³
Altura de los Sólidos (H_s)	1.20	cm
e_o	0.84	
e_f	0.57	
S_o	54.93	%
S_f	100	%

Nota: Resultados de laboratorio obtenidos para la consolidación unidimensional del suelo virgen.

Adicionalmente, se realizaron los cálculos para cada una de las lecturas tomadas para las diferentes cargas, en los periodos de carga, descarga y recarga de la altura de la muestra, H, la relación de vacíos, e, y la deformación unitaria axial, ϵ , con base en las siguientes ecuaciones:

$$H = H_o - \text{deformación leída} \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$\varepsilon = \frac{\text{Deformación leída}}{H_0} * 100 \quad (\text{Ecuación 16})$$

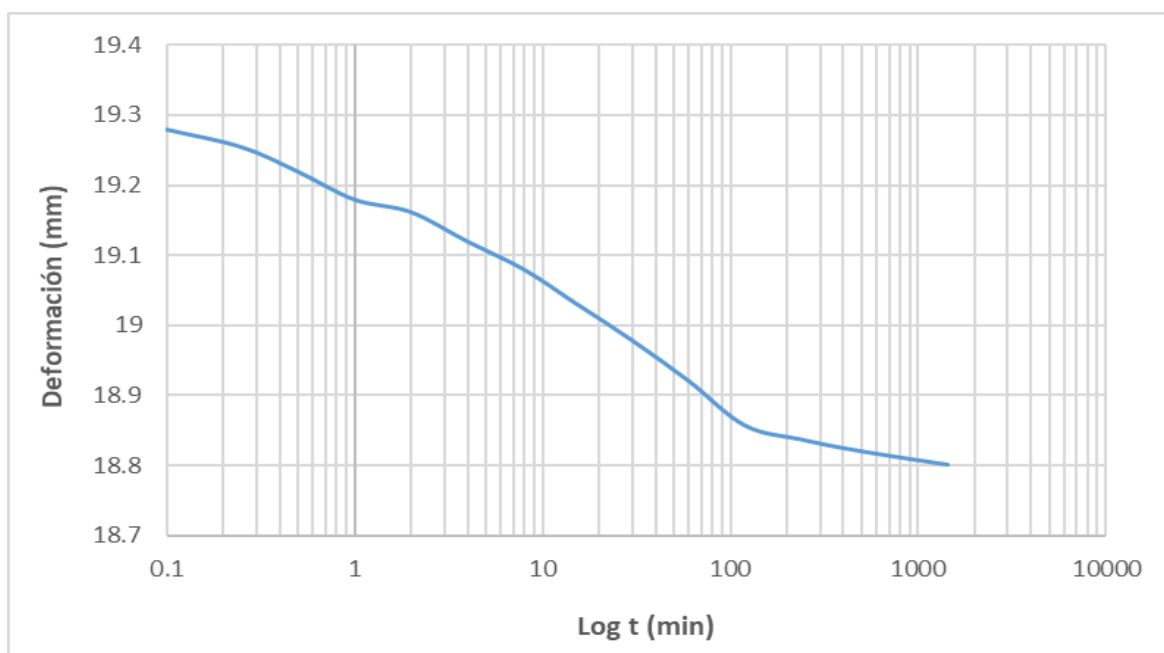
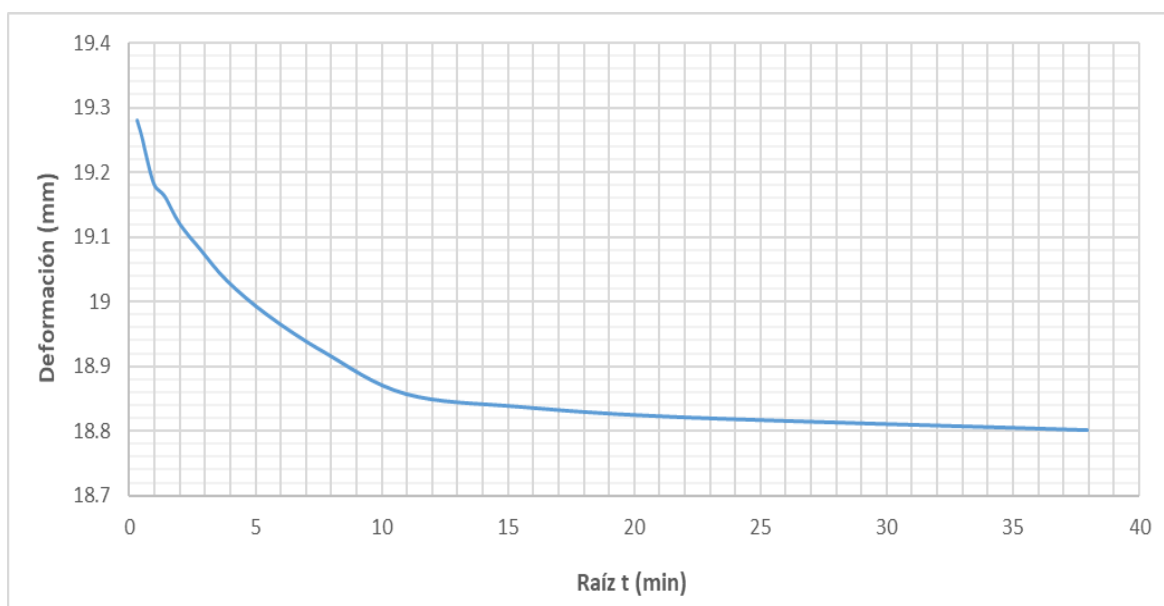
$$\sigma = \frac{\text{Fuerza aplicada}}{A} \quad (\text{Ecuación 17})$$

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la primera carga de 16 kg, en la tabla 25, junto con la gráfica de deformación vs logaritmo del tiempo y deformación vs raíz del tiempo de los métodos de Casagrande y de Taylor, respectivamente, en las figuras 35 y 36, ya que estos serán utilizados para determinar el coeficiente de consolidación, C_v , y posteriormente, la velocidad necesaria en el ensayo de corte directo más adelante.

Tabla 25.

Resultados obtenidos para la carga de 16 kg sobre el suelo virgen

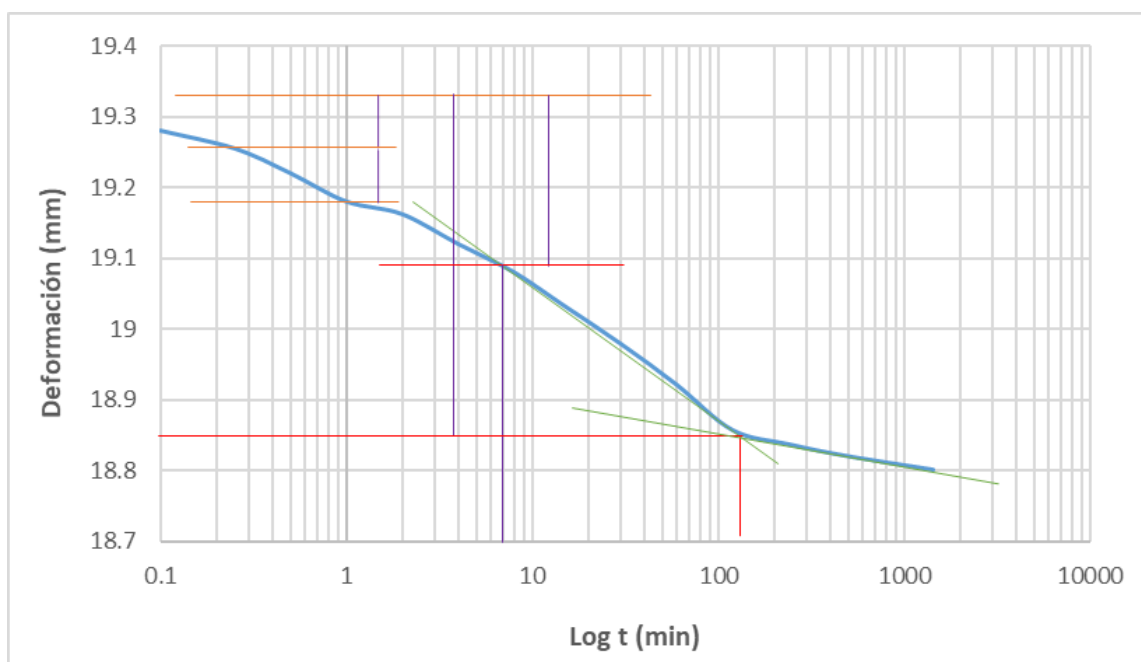
Tiempo [min]	Líneas	Deformación [mm]	H [mm]	e	ε [%]
0.1	2720	2.720	19.28	0.6131	12.36
0.25	2745	2.745	19.255	0.6110	12.48
0.5	2780	2.780	19.22	0.6080	12.64
1	2820	2.820	19.18	0.6047	12.82
2	2838	2.838	19.162	0.6032	12.9
4	2880	2.880	19.12	0.5997	13.09
8	2920	2.920	19.08	0.5963	13.27
15	2968	2.968	19.032	0.5923	13.49
30	3021	3.021	18.979	0.5879	13.73
60	3079	3.079	18.921	0.5830	14.00
120	3143	3.143	18.857	0.5777	14.29
240	3163	3.163	18.837	0.5760	14.38
480	3179	3.179	18.821	0.5747	14.45
1440	3199	3.199	18.801	0.5730	14.54

Figura 35.*Deformación vs Logaritmo del tiempo para una carga de 16 kg sobre el suelo virgen***Figura 36.***Deformación vs Raíz del tiempo para una carga de 16 kg sobre el suelo virgen*

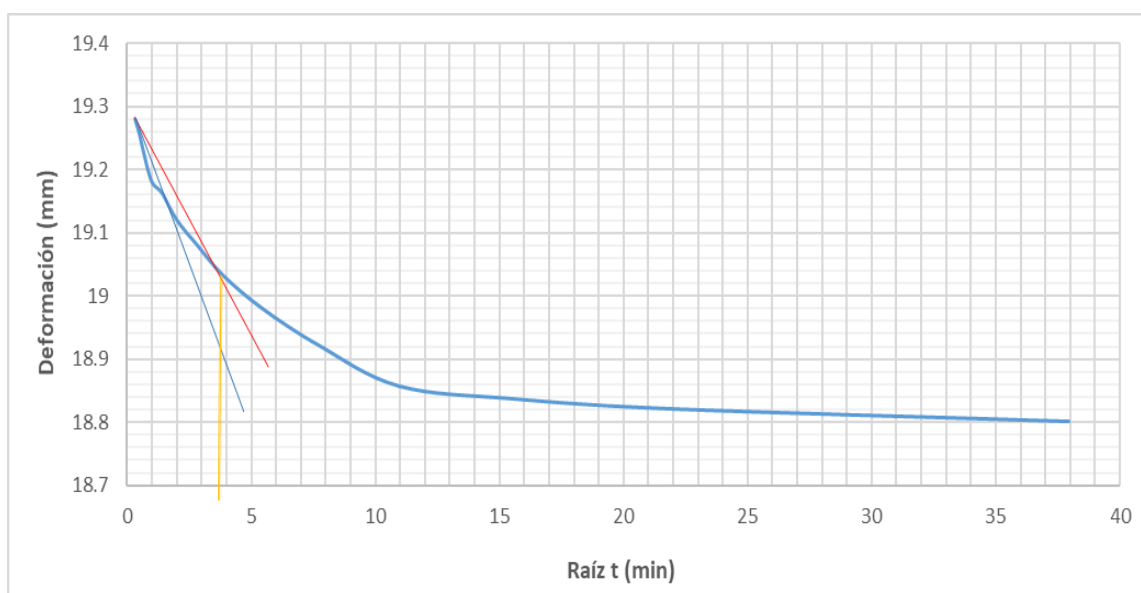
Para determinar el coeficiente de consolidación se siguieron inicialmente los procedimientos descritos en la norma para el cálculo de los tiempos t_{50} y t_{90} , que representan aquellos en los que se alcanzan el 50% y el 90% de la consolidación primaria, respectivamente. De esta manera se obtuvieron valores de t_{50} de 6.7 minutos y t_{90} de 12.25 minutos para una carga de 16 kg. Este procedimiento gráfico es presentado en las figuras 37 y 38.

Figura 37.

Procedimiento de Casagrande para el cálculo del t_{50} para una carga de 16 kg sobre el suelo virgen

**Figura 38.**

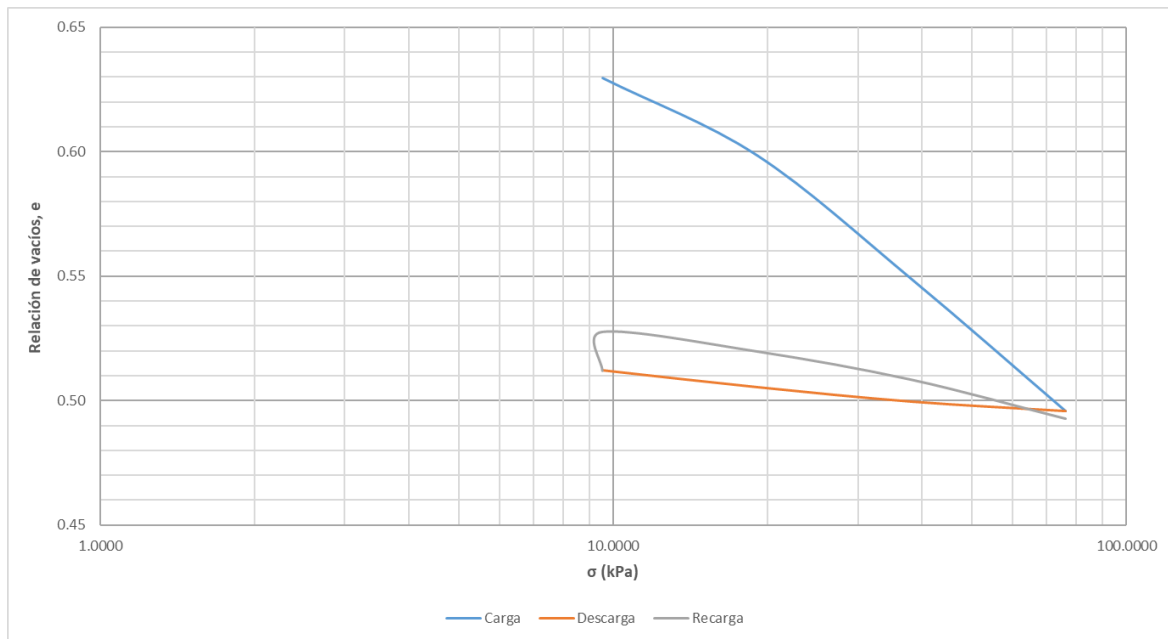
Procedimiento de Taylor para el cálculo del t_{90} para una carga de 16 kg sobre el suelo virgen



Posteriormente se procedió a realizar la gráfica de relación de vacíos vs logaritmo de esfuerzos, que puede encontrarse en la figura 39, para, a partir de esta, determinar los coeficientes de compresibilidad, a_v , compresibilidad volumétrica, m_v y consolidación, C_v , junto a los índices de compresión, C_c , e hinchamiento, C_d , a partir de las ecuaciones 18, 19, 20 y 21.

Figura 39.

Gráfica de relación de vacíos vs logaritmo del esfuerzo para el suelo virgen



Es importante aclarar que los valores que se deben determinar de manera gráfica son el esfuerzo efectivo de pre-consolidación, σ'_p , y el esfuerzo vertical efectivo presente, σ' , que se obtiene al alcanzar 0.4-0.42 veces la relación de vacíos inicial, para lo cual es utilizado el método de Casagrande, de acuerdo a lo ilustrado en las figuras 40 y 41. (Das, M. Braja. 2008)

Es importante a la hora de realizar los cálculos tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- H_{D90} es equivalente a la mitad de la altura de la muestra al momento de alcanzado el 90% de la consolidación primaria, que, mediante interpolación, es igual a 19.051 mm, por lo tanto, se toma un valor de 9.53 mm.
- T_{90} tiene un valor de 0.848 de acuerdo con lo enunciado en la norma.
- $t=t_{90}$ al utilizarse el método de Taylor
- e_f no es el obtenido como resultado en el ensayo de consolidación, sino que es equivalente a $0.4e_0$.

- Para determinar C_c se utiliza la pendiente de la recta virgen de consolidación, que se obtiene entre σ' y σ'_p y para determinar C_d se utiliza la recta obtenida en la zona de descarga de la gráfica.

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} = \frac{e_0 - e_f}{\sigma' - \sigma'_p} \quad (\text{Ecuación 18})$$

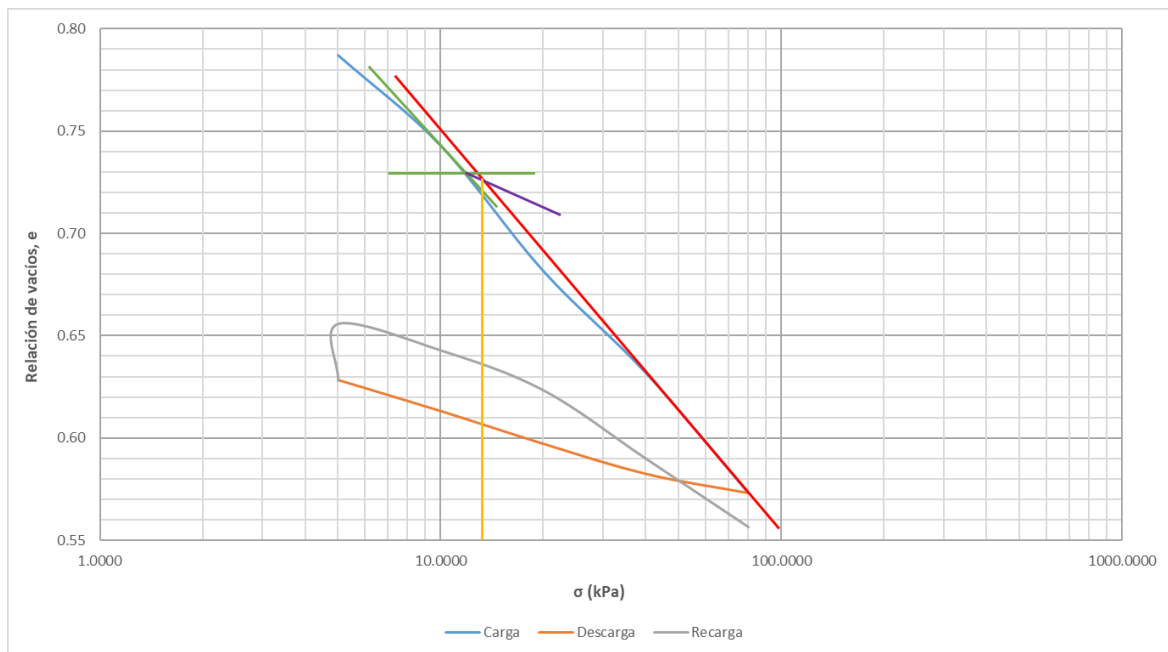
$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$C_v = \frac{T_{90} * H_{D90}^2}{t} \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$C_c = C_d = \frac{\Delta e}{\text{Log}(\sigma') - \text{Log}(\sigma'_p)} = \frac{\Delta e}{\text{Log}(\sigma' / \sigma'_p)} \quad (\text{Ecuación 21})$$

Figura 40.

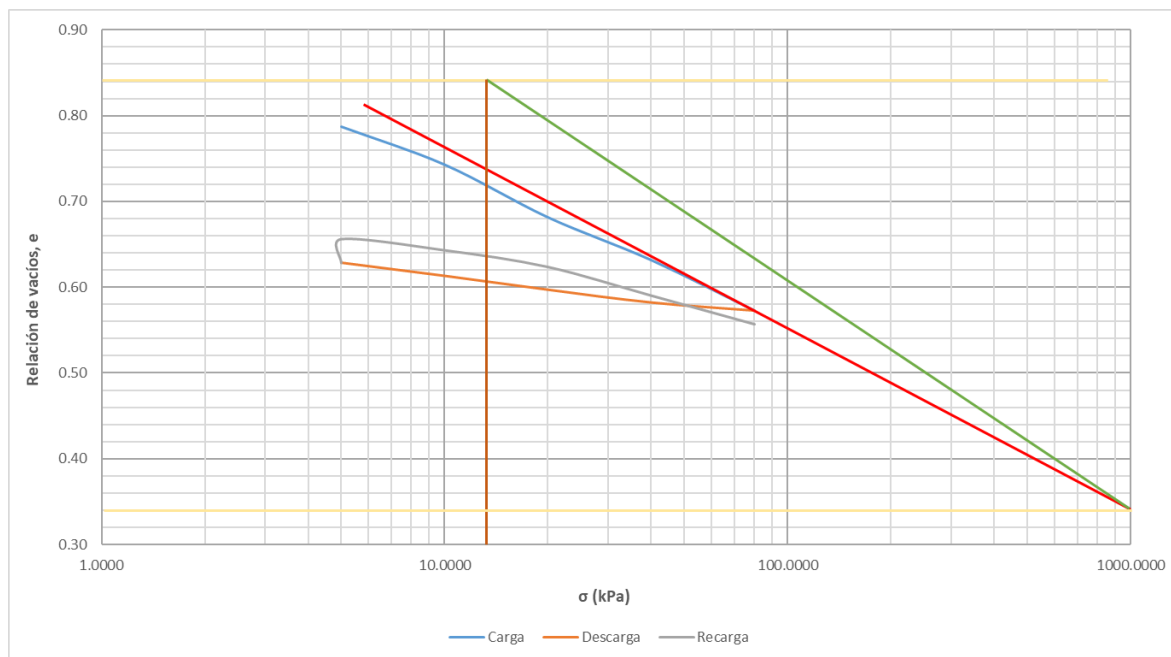
Método de Casagrande para determinar el esfuerzo efectivo de preconsolidación para el suelo virgen



Finalmente, basados en las gráficas y ecuaciones anteriores se obtienen los resultados expuestos en la tabla 26.

Figura 41.

Método de Casagrande para determinar el esfuerzo vertical efectivo ($0.4 e_o$) para el suelo virgen

**Tabla 26.**

Resultados finales del ensayo de consolidación para el suelo virgen

σ'_p	10.3	kPa
σ'	1000	kPa
t_{90}	12.25	min
t_{90}	735	seg
H_{90}	0.95	cm
C_v	$1.05 \cdot 10^{-3}$	cm^2/seg
C_v	3.3	$\text{m}^2/\text{año}$
a_v	$5.10 \cdot 10^{-4}$	m^2/kN
m_v	$2.77 \cdot 10^{-4}$	m^2/kN
C_c	0.254	
C_d	0.050	

5.3.2. Mezcla óptima

Aplicando el procedimiento y utilizando las ecuaciones enunciadas en la descripción del ensayo para el suelo virgen, sobre la muestra de la mezcla óptima, se obtuvieron los resultados presentados en las tablas 27 y 28.

Tabla 27.

Resultados obtenidos para la muestra de la mezcla óptima sometida a consolidación unidimensional

Deformación Unitaria	0.001	mm
Peso Unitario	0.80	kg
Peso del Anillo	101.39	g
Peso del Anillo + Muestra	185.18	g
MT_o	83.79	g
H_o	2.10	cm
Diámetro del Anillo	5.12	cm
Área del Anillo	0.00206	m ²
V_o	43.24	cm ³
H_{et}	1.88	cm
MT	88.52	g
M_d	72.28	g
%W_o	15.92	%
%W	22.47	%
ρ_d	1.67	g/cm ³
V_s	25.86	cm ³
Altura de los Sólidos (H_s)	1.26	cm
e_o	0.67	
e_r	0.50	
S_o	66.41	%
S_f	100	%

Nota: Resultados de laboratorio obtenidos para la consolidación unidimensional de la mezcla óptima.

Tabla 28.*Resultados obtenidos para la carga de 16 kg sobre muestra de la mezcla óptima*

Tiempo [min]	Líneas	Deformación [mm]	H [mm]	e	ε [%]
0.1	1756	1.756	19.244	0.5322	8.36
0.25	1809	1.809	19.191	0.5280	8.61
0.5	1842	1.842	19.158	0.5254	8.77
1	1897	1.897	19.103	0.5210	9.03
2	1947	1.947	19.053	0.5170	9.27
4	2025	2.025	18.975	0.5108	9.64
8	2113	2.113	18.887	0.5038	10.06
15	2181	2.181	18.819	0.4984	10.39
30	2188	2.188	18.812	0.4978	10.42
60	2194	2.194	18.806	0.4974	10.45
120	2200	2.200	18.800	0.4969	10.48
240	2205	2.205	18.795	0.4965	10.50
480	2208	2.208	18.792	0.4962	10.51
1440	2215	2.215	18.785	0.4957	10.55

Con base en los resultados presentados en la tabla 28 se realizan las figuras 42, 43, 44, 45, 46, 47 y 48, a partir de las cuales se determinaron los resultados presentados en la tabla 29, de acuerdo a los procedimientos de Taylor y Casagrande descritos previamente.

Figura 42.

Deformación vs Logaritmo del tiempo para una carga de 16 kg sobre la mezcla óptima

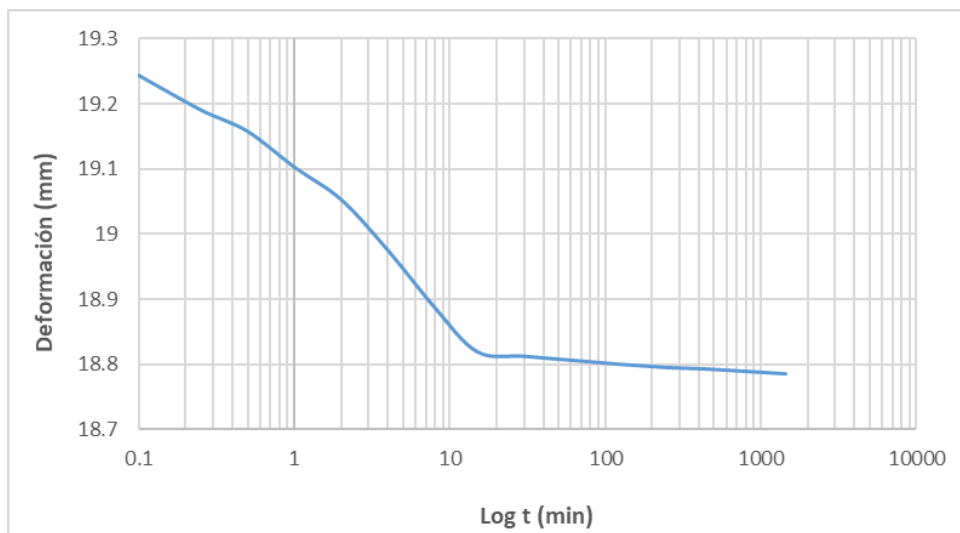


Figura 43.

Deformación vs Raíz del tiempo para una carga de 16 kg sobre la mezcla óptima

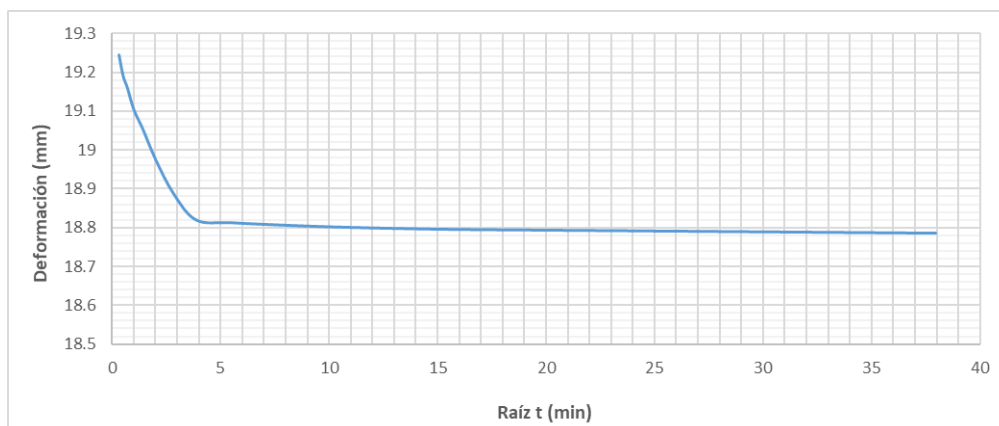


Figura 44.

Procedimiento de Casagrande para el cálculo del t50 para una carga de 16 kg sobre la mezcla óptima

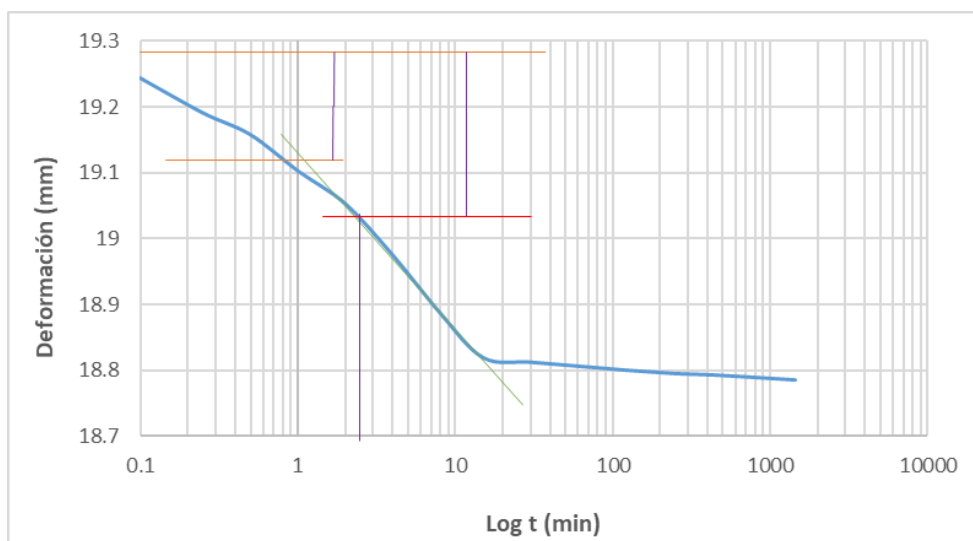


Figura 45.

Procedimiento de Taylor para el cálculo del t_{90} para una carga de 16 kg sobre la mezcla óptima

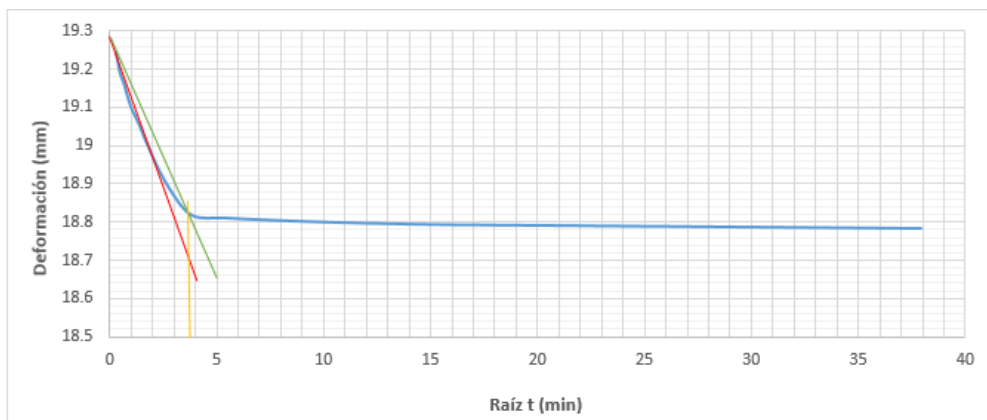


Figura 46.

Gráfica de relación de vacíos vs logaritmo del esfuerzo para la mezcla óptima

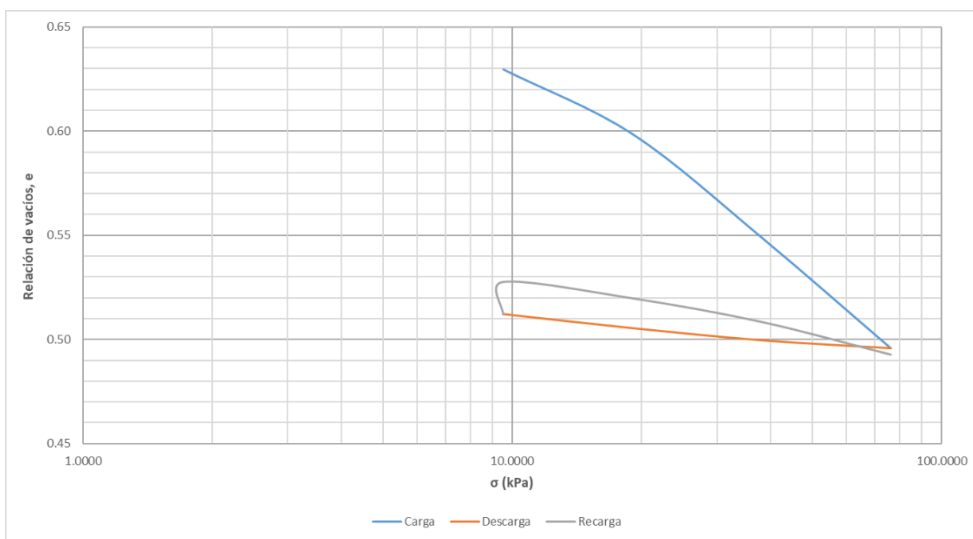


Figura 47.

Método de Casagrande para determinar el esfuerzo efectivo de preconsolidación para la mezcla óptima

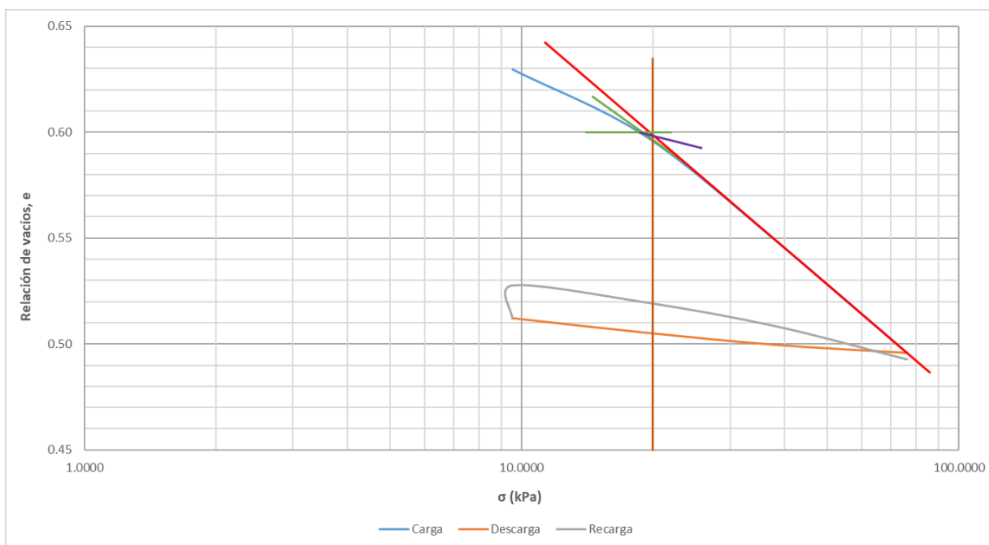
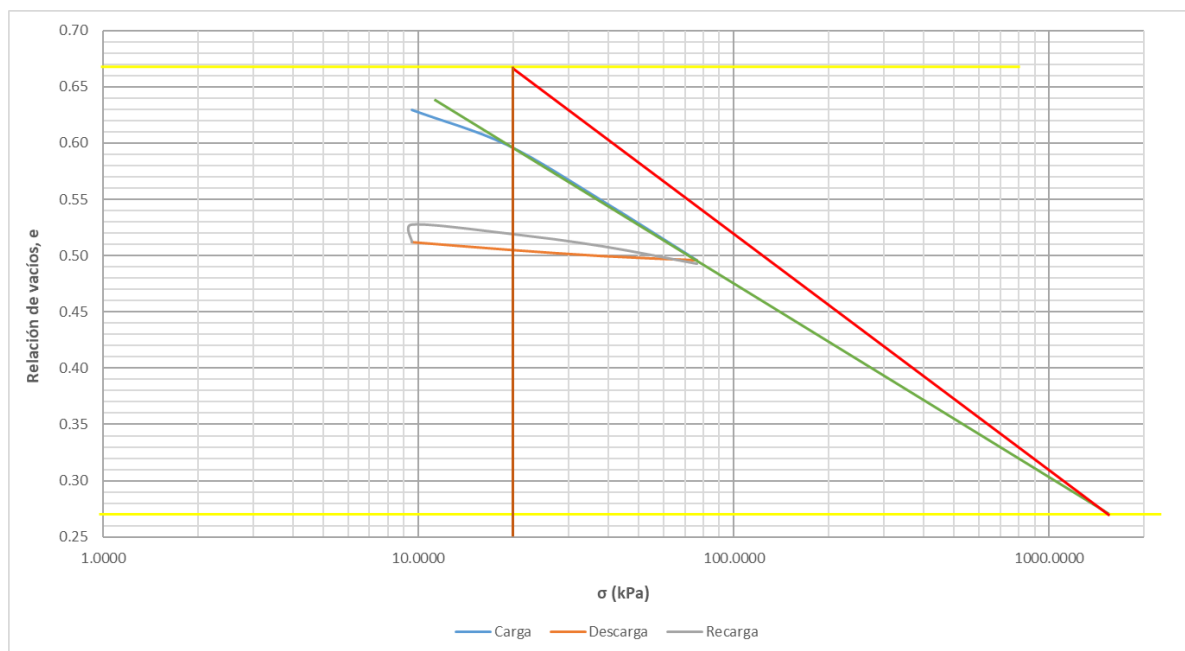


Figura 48.

Método de Casagrande para determinar el esfuerzo vertical efectivo ($0.4 \text{ veces } e_o$) para la mezcla óptima

**Tabla 29.**

Resultados finales del ensayo de consolidación para la mezcla óptima

σ'_p	11.0	kPa
σ'	1500	kPa
t_{90}	14.44	min
t_{90}	866.4	seg
H_{90}	0.94	cm
C_v	$8.67 \cdot 10^{-4}$	cm^2/seg
C_v	2.73	$\text{m}^2/\text{año}$
a_v	$2.71 \cdot 10^{-4}$	m^2/kN
m_v	$1.62 \cdot 10^{-4}$	m^2/kN
C_c	0.189	
C_d	0.018	

5.4. Ensayo de corte directo

Como ensayo final se tiene el ensayo de corte directo, realizado según la norma INV-154, donde se establece el procedimiento para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada drenada. Se prepararon 3 anillos de muestra de 2, 4 y 8 kg.

5.4.1. Suelo virgen

De manera inicial, se realizó la preparación de la muestra a las condiciones de humedad óptima determinada con el ensayo de proctor modificado, se pesó el anillo junto a la muestra, posteriormente se hizo el montaje en el aparato de corte, se saturó y se dejó con la primera carga de 2 kilogramos durante 24 horas para alcanzar un estado estabilizado en la muestra y posteriormente empezar a fallar con una velocidad de corte de 0.07 [mm/min] determinada con el t_{90} calculado del ensayo de consolidación teniendo en cuenta las ecuaciones 22 y 23, hasta que la muestra falle a corte.

$$t_f = 11.6 * t_{90} \quad \text{(Ecuación 22)}$$

$$R_d = \frac{10}{t_f} \quad \text{(Ecuación 23)}$$

Se realizó el registro del esfuerzo a medida que se produjo cada 0.1 mm de deformación hasta el corte tal y como se muestra en la tabla 30.

Tabla 30.

Resultados del ensayo de corte directo para una carga de 8 kg para el suelo virgen

Deformación [mm]	Esfuerzo [Kg]	Esfuerzo [Kg/cm ²]
0.1	0.35	0.0124
0.2	0.35	0.0124
0.3	5.55	0.1972
0.4	6.50	0.2309
0.5	7.10	0.2522
0.6	7.70	0.2735
0.7	7.90	0.2806

0.8	8.70	0.3091
0.9	9.20	0.3268
1.0	9.50	0.3375
1.1	9.85	0.3499
1.2	10.10	0.3588
1.3	10.20	0.3623
1.4	10.25	0.3641
1.5	10.30	0.3659
1.6	10.25	0.3641
1.7	10.20	0.3623
1.8	10.15	0.3606
1.9	10.15	0.3606
2.0	10.20	0.3623
2.1	10.25	0.3641
2.2	10.20	0.3623
2.3	10.20	0.3623
2.4	10.10	0.3588
2.5	10.05	0.3570
2.6	10.00	0.3552
2.7	10.00	0.3552
2.8	9.85	0.3499
2.9	9.80	0.3481
3.0	9.75	0.3464

Luego de alcanzar la falla a cortante, se desmontó el anillo del aparato de corte, se pesó el anillo junto a la muestra y se procedió a retirar la muestra del anillo para secarla y finalmente se registró el peso de la muestra seca. Los datos iniciales y finales están consignados en la tabla 31. A continuación, se realizó la gráfica de esfuerzo cortante vs deformación de los datos

consignados en la tabla 30, para observar el comportamiento de la muestra y determinar el punto de corte, tal como se ilustra en la figura 49.

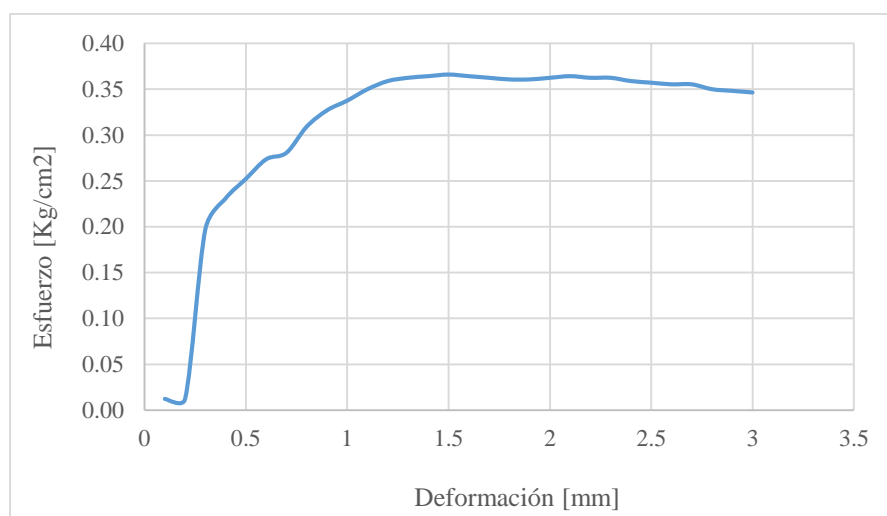
Tabla 31.

Datos iniciales y finales del ensayo de corte directo para el suelo virgen

Peso del anillo [g]	107.1
Peso del anillo + muestra [g]	233.5
MTo [g]	126.4
MT [g]	126.5
Peso seco [g]	103.4
Área del anillo [cm²]	28.15
V [mm/min]	0.07

Figura 49.

Esfuerzo cortante vs deformación de la carga de 8 Kg para el suelo virgen



Por último, se registraron los datos del esfuerzo máximo, es decir, dónde se presentó la falla, para cada carga relacionado con su respectiva densidad, seguido a esto, se realizó la gráfica de esfuerzo cortante vs esfuerzo normal para finalmente, determinar el ángulo de fricción y la cohesión, lo que se puede observar en la figura 50 y las tablas 32 y 33.

5.4.2. Mezcla óptima

De igual manera que con el suelo virgen, se realizó la preparación de la mezcla a las condiciones de humedad óptima determinada con el ensayo de proctor modificado, se pesó el anillo junto a la mezcla, posteriormente se hizo el montaje en el aparato de corte, se saturó y se dejó con la primera carga de 4 kilogramos durante 24 horas para alcanzar un estado estabilizado en la muestra y posteriormente empezar a fallar con una velocidad de corte de 0.05 [mm/min] determinada con el t_{90} calculado del ensayo de consolidación.

Tabla 32.

Esfuerzo y densidad máxima de cada anillo para el suelo virgen

Carga [Kg]	Esfuerzo [kPa]	ρ [kPa]
0	0.1264	0
2	1.130	6.97
4	1.652	13.94
8	3.659	27.88

Figura 50.

Esfuerzo cortante vs esfuerzo normal de cada anillo para el suelo virgen

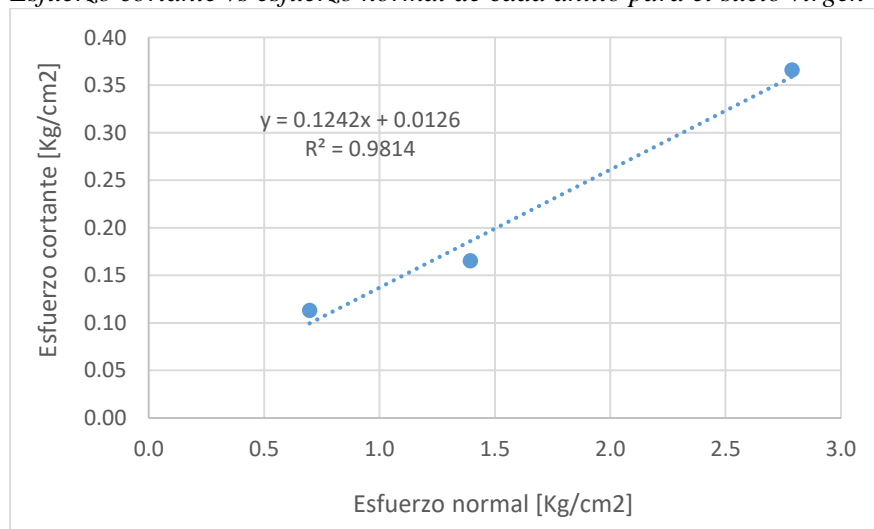


Tabla 33.

Ángulo de fricción y cohesión del suelo virgen

Ángulo de fricción [°]	7.1
Cohesión [kg/cm ²]	0.013

Se tomó el registro del esfuerzo para cada deformación hasta alcanzar la falla a cortante, tal y como se muestra en la tabla 34.

Tabla 34.

Resultados del ensayo de corte directo para una carga de 8 kg para la mezcla óptima

Deformación [mm]	Esfuerzo [Kg]	Esfuerzo [Kg/cm²]
0.06	7.689	0.242
0.12	17.417	0.548
0.19	20.425	0.643
0.25	23.77	0.748
0.32	27.359	0.861
0.60	34.966	1.101
0.95	36.812	1.159
1.30	36.506	1.149

Luego de fallar hasta corte, se desmontó el anillo del aparato de corte, se pesó el anillo junto a la mezcla y se procedió a retirar la mezcla del anillo para secar. Finalmente se registró el peso de la mezcla seca. Los datos iniciales y finales están consignados en la tabla 35.

Tabla 35.

Datos iniciales y finales del ensayo de corte directo para la mezcla óptima

Peso del anillo [g]	85.07
Peso del anillo + muestra [g]	212.65
M_{To} [g]	127.58
MT [g]	154.1
Peso seco [g]	81.53
Área del anillo [cm²]	31.77
V [mm/min]	0.05

Se realizó la gráfica de esfuerzo cortante vs deformación de los datos consignados en la tabla 34, para observar el comportamiento de la mezcla y determinar el punto de corte. Lo anterior se ilustra en la figura 51.

Por último, se registraron los datos del esfuerzo máximo para cada carga relacionado con su respectiva densidad, con el fin de realizar la gráfica de esfuerzo cortante vs esfuerzo normal para, finalmente, determinar el ángulo de fricción y la cohesión, tal como se observa en la figura 52 y las tablas 36 y 37.

Figura 51.

Esfuerzo cortante vs deformación de la carga de 8 Kg para la mezcla óptima

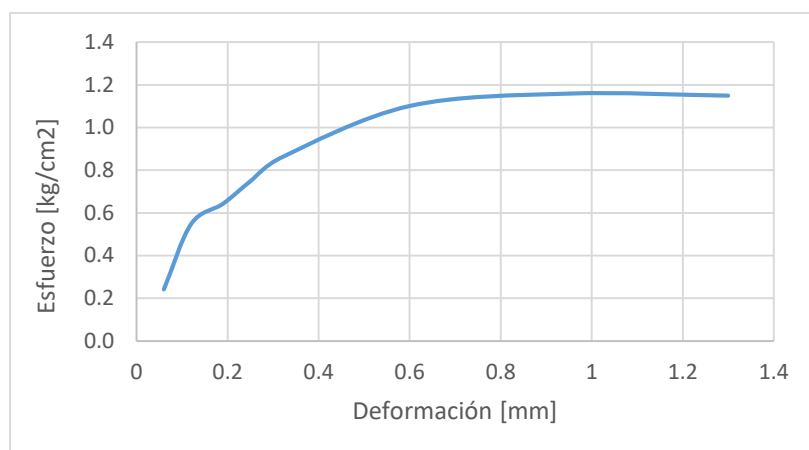


Tabla 36.

Esfuerzo y densidad máxima de cada anillo para la mezcla óptima

Carga [Kg]	Esfuerzo [kPa]	ρ [kPa]
0	3.178	0
2	5.752	6.18
4	6.439	12.35
8	11.587	24.70

Figura 52.

Esfuerzo cortante vs esfuerzo normal de cada anillo para la mezcla óptima

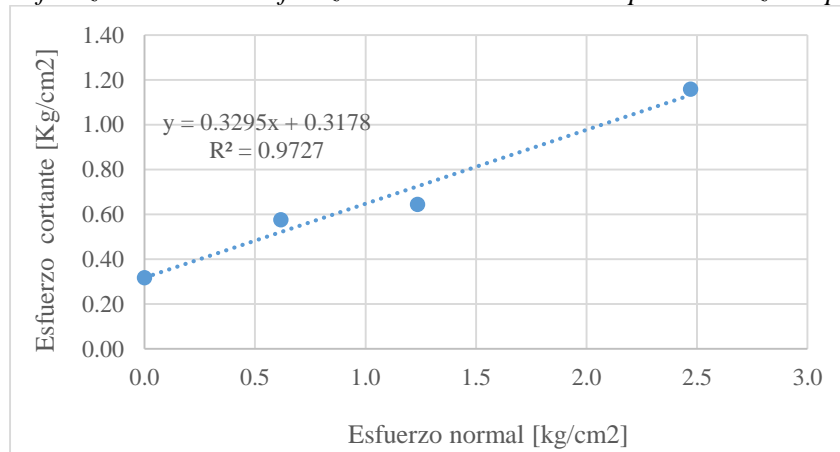


Tabla 37.*Ángulo de fricción y cohesión de la mezcla óptima*

Ángulo de fricción [°]	18.2
Cohesión [kg/cm²]	0.318

Finalmente, se presenta un resumen de los principales datos obtenidos en la tabla 38.

Tabla 38.*Resumen de los principales resultados*

Propiedad	Suelo virgen	Mezcla óptima
Gravedad específica	2.84	2.80
Relación de vacíos	0.84	0.67
Límite líquido	60	47
Límite plástico	22	22
av [m ² /kN]	5.10*10 ⁻⁴	2.71*10 ⁻⁴
mv [m ² /kN]	2.77*10 ⁻⁴	1.62*10 ⁻⁴
Cv [m ² /año]	3.3	2.73
Cc	0.254	0.189
Cd	0.050	0.018
Ángulo de fricción	7.1°	18.2°
Cohesión [kg/cm ²]	0.013	0.318

6. Análisis de resultados

Una vez finalizados los ensayos sobre el suelo virgen y la mezcla óptima, se procedió a realizar el análisis sobre los resultados, para lo cual fue necesario investigar y evaluar los resultados sugeridos por la literatura acerca de las propiedades esperadas para las arcillas respecto a las obtenidas en el laboratorio para el suelo virgen, los cuales se presentan en las tablas 39, 40, 41, 42, 43, 44 y 45 y las figuras 53 y 54, para posteriormente analizar la utilidad de la ceniza en la estabilización de este tipo de suelo.

Tabla 39.*Valores de referencia para la gravedad específica de los sólidos*

	TIPO DE SUELO	GRAVEDAD ESPECÍFICA (G)
Inorgánico	Grava	2.65
	Arena gruesa a media	2.65
	Arena fina (limosa)	2.65
	Loess, polvo de piedra y limo arenoso	2.67
	Arena	2.65
	Limo arenoso	2.66
	Limo	2.67-2.70
	Arena arcillosa	2.67
	Limo arcillo arenoso	2.67
	Arcilla arenosa	2.70
	Arcilla limosa	2.75
	Arcilla	2.72-2.80
Orgánico	Limos con trazos de materia orgánica	2.30
	Lodos aluviales orgánicos	2.13-2.60
	Turba	1.50-2.15

Nota: Adaptado de la tabla 4.48 de INVIAS (2012)

De acuerdo a lo observado en la tabla 39 y teniendo en cuenta que INVIAS también especifica que las arcillas expansivas pueden tener valores de gravedad específica oscilantes entre 2.84-2.88, los resultados obtenidos en el laboratorio cumplen con los valores esperados, ubicándose en el valor inferior esperado para arcillas expansivas. Es importante analizar para la mezcla óptima que el valor de la gravedad específica de la misma se mantiene dentro de los

rangos de arcillas, a pesar de que la ceniza volante presenta un valor muy inferior, lo que es de esperar debido al pequeño porcentaje que representa esta de la masa total de la mezcla.

Al comparar los resultados obtenidos del ensayo de proctor modificado para determinar el porcentaje de compactación y la humedad de moldeo necesaria para que el suelo alcance el comportamiento requerido, se pudo observar que para la muestra de suelo virgen se obtuvo una humedad óptima de 16% con densidad máxima de 1.861 [gr/cm³] y para la mezcla se obtuvo una humedad óptima de 14% con densidad máxima de 1.819 [gr/cm³]. En base a esto se pudo notar que, al agregar ceniza volante al suelo virgen, la densidad seca máxima a la que se puede llegar a compactar el suelo es menor, lo que se esperaba debido a que la densidad de la ceniza volante es menor a la del suelo arcilloso virgen, tal como se mencionaba al realizar la mezcla óptima, además que esta densidad, al ser menor, puede ser alcanzada con un porcentaje de humedad menor, lo que se traduce en una menor demanda de agua, disminuyendo los costos y el desperdicio relacionado al consumo necesario para su compactación.

Tabla 40.

Valores de referencia para la relación de vacíos

Tipo de suelo	Relación de vacíos, e	Contenido natural de agua en estado saturado (%)	Peso específico seco (kN/m³)
Arena suelta uniforme	0.8	30	14.5
Arena densa uniforme	0.45	16	18
Arena limosa suelta de grano angular	0.65	25	16
Arena limosa densa de grano angulas	0.4	15	19
Arcilla firme	0.6	21	17
Arcilla suave	0.9-1.4	30-50	11.5-14.5

Loess	0.9	25	13.5
Arcilla orgánica suave	2.5-3.2	90-120	6-8
Tilita glacial	0.3	10	21

Nota: Adaptado de la tabla 2.2 de Das, M. B. (2008)

Tabla 41.

Valores de referencia para los índices de compresión e hinchamiento

Suelo	Límite líquido	Límite plástico	Índice de compresión, C_c	Índice de expansión, C_d
Arcilla azul de Boston	41	20	0.35	0.07
Arcilla de Chicago	60	20	0.4	0.07
Arcilla de Fuerte Gordon, Georgia	51	26	0.12	—
Arcilla de Nueva Orleans	80	25	0.3	0.05
Arcilla de Montana	60	28	0.21	0.05

Nota: Adaptado de la tabla 6.1 de Das, M. B. (2008)

Tabla 42.

Valores de referencia para el coeficiente de compresibilidad volumétrica, m_v

Tipo de arcilla	Termino descriptivo	Coefficiente de compresibilidad volumétrica, m_v (m^2/MN)	Índice de compresión, C_c
Dura	Compresibilidad muy baja	<0.05	0.025
Rígida	Compresibilidad baja	0.05-0.1	0.025-0.05
Firme	Compresibilidad media	0.1-0.3	0.05-0.15
Pobremente consolidada	Compresibilidad alta	0.3-1.5	0.15-0.75
Altamente orgánicas	Compresibilidad muy alta	>1.5	0.75-5+

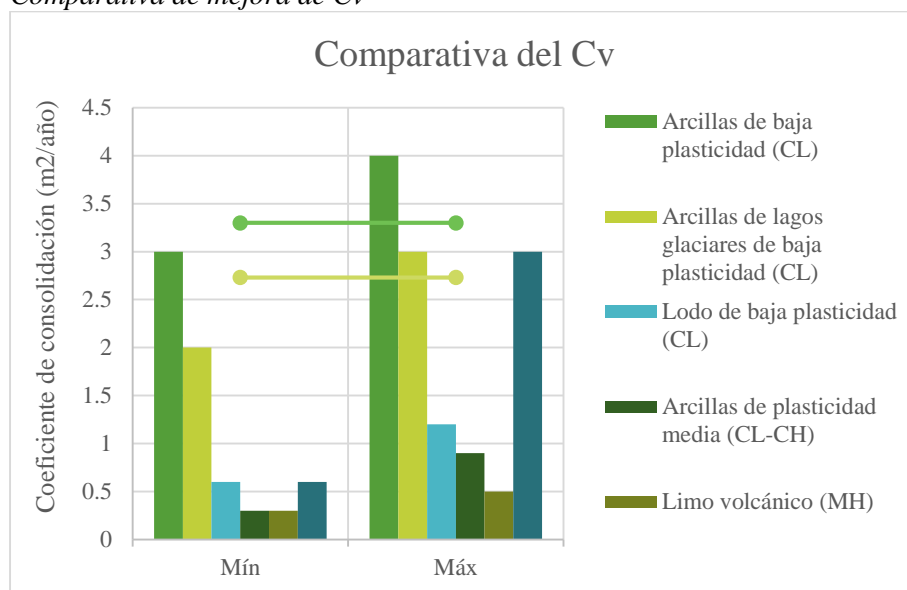
Nota: Adaptado de la tabla 5.1 de Carter M. y Bentley S. P. (2016)

Tabla 43.
Valores de referencia para el coeficiente de consolidación, c_v

Tipo de suelo	C_v	
	cm^2/s	m^2/a
Arcillas de baja plasticidad (CL)	0.001-0.006	3-19
Arcillas de lagos glaciares de baja plasticidad (CL)	0.0006-0.0009	2-3
Lodo de baja plasticidad (CL)	0.0002-0.0004	0.6-1.2
Arcillas de plasticidad media (CL-CH)	<0.0001-0.0003	<0.3-0.9
Limo volcánico (MH)	0.0001-0.00015	0.3-0.5
Limo orgánico (OL)	0.0002-0.001	0.6-3.0

Nota: Adaptado de la tabla 5.3 de Carter, M. y Bentley, S. P. (2016)

Figura 53.
Comparativa de mejora de C_v



Inicialmente, a partir de los valores de referencia que se observan en las tablas anteriores, se pudo afirmar que se obtuvieron resultados coherentes para este tipo de suelo, pero es posible hacer apreciaciones importantes respecto a las características de plasticidad esperados, lo primero es notar que se obtuvo un valor de relación de vacíos intermedio entre arcillas duras y suaves o blandas, pero más cercano a estas últimas, sin embargo el valor de

humedad obtenido es inferior al sugerido por la literatura, esto se puede deber a factores como el cambio de humedad presentado durante el transporte del material, ya que se manejó en estado alterado en el laboratorio, además de la presencia de impurezas como limos o pequeños trazos de arenas que pueden alterar un poco los resultados respecto a una arcilla totalmente pura, esto pudo apreciarse en el laboratorio debido al tacto liso propio del limo en ciertas zonas de la muestra y permite explicar otros comportamientos ligeramente desviados de los esperados, como es el resultado del ensayo de potencial de cambio volumétrico mediante el aparato de Lambe, donde se obtuvo un resultado del potencial levemente inferior al crítico, que era el resultado esperado, o el resultado del coeficiente de compresibilidad volumétrica, donde se obtuvo un resultado correspondiente a una arcilla de compresibilidad media a alta, siendo el esperado una compresibilidad alta, además pudo corroborarse con el valor de ángulo de fricción obtenido, el cual será explicado a mayor detalle más adelante. En cuanto a los valores de los coeficientes de expansión e hinchamiento se pudo observar que los resultados son cercanos a los presentados en la arcilla de Montana, lo que es coherente debido a la proximidad de sus valores de límites líquido y plástico con los obtenidos para la muestra de suelo virgen.

Ya conociendo las condiciones iniciales del suelo, se procedió a analizar los resultados del ensayo para la mezcla óptima, para los cuales se pudo ver una reducción en el valor de la relación de vacíos y de todos los coeficientes obtenidos del ensayo de consolidación unidimensional, esto cumple con los resultados esperados y la hipótesis planteada, con lo que se demuestra una reducción en los problemas de plasticidad y asentamientos presentes en las arcillas expansivas, como la utilizada en este proyecto, mediante el uso de un material de desecho como es la ceniza volante, presentándose como una buena alternativa para la estabilización de este tipo de suelos, sin embargo, esto terminará de asegurarse a continuación,

con el análisis de los resultados para el ángulo de fricción interna y la cohesión, obtenidos del ensayo de corte directo.

Tabla 44.

Valores de referencia para la cohesión y el ángulo de fricción en suelos cohesivos en kPa

Tipo	Descripción del suelo/Estado	Cohesión efectiva (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Cohesivo	Suave-Orgánico	5-10	10-20
	Suave-No orgánico	10-20	15-25
	Rígido	20-50	20-30
	Duro	50-100	25-30

Nota: Tomada de la tabla 7.9 de Look, B. (2007)

Tabla 45.

Valores de referencia para la cohesión y el ángulo de fricción en suelos cohesivos en kg/cm²

Tipo de suelo	Ángulo de fricción interna [°]	Cohesión [kg/cm ²]
Arcilla rígida	17-20	0.25
Arcilla semirrígida	15-17	0.1
Arcilla blanda	0.1	0.01
Arcilla arenosa	20-25	0.05
Limo rígido	25-30	0.02

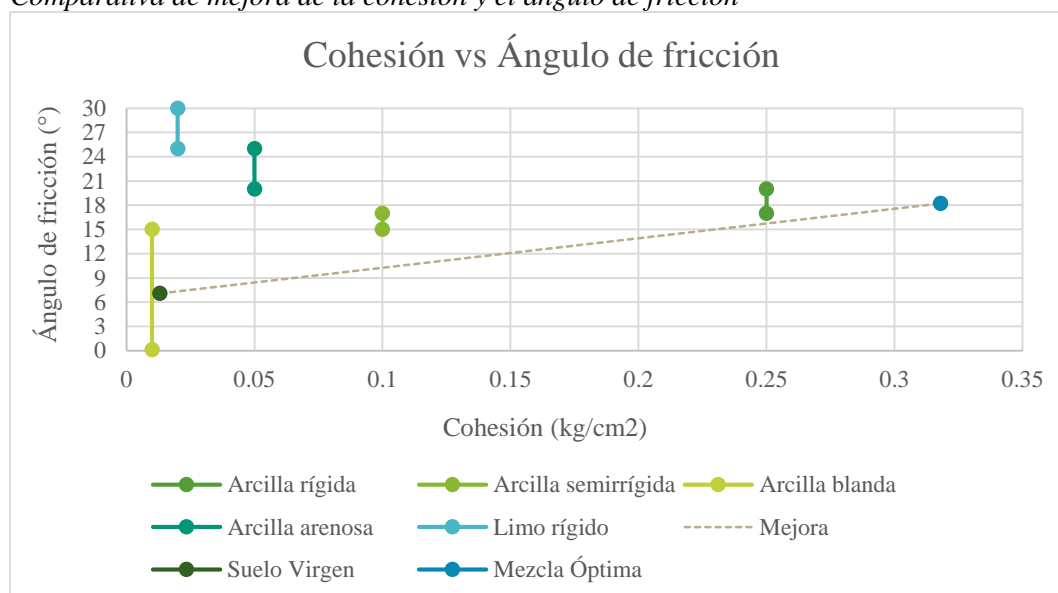
Nota: Modificada de DIN 1054 (2005)

Respecto al comportamiento del ángulo de fricción y cohesión del suelo, es importante observar que al tratar con arcillas blandas puras, al ser completamente cohesivas, se esperaba un valor cercano a 0° para el ángulo de fricción, sin embargo, se obtuvo un valor de 7.1°, lo cual puede deberse principalmente a que se trate de una arcilla más rígida o que presente impurezas como la presencia de limos o arena fina, sin embargo al observar el valor 0.013 kg/cm² obtenido para la cohesión, se puede confirmar, como se mencionó anteriormente, que se debe principalmente a la presencia de algunos limos o ciertas impurezas presentes en la

muestra de suelo analizada. Al comparar los valores obtenidos para la mezcla óptima se puede ver que se confirma la utilidad de la ceniza volante para estabilizar el suelo, ya que por la parte de la cohesión se tiene un aumento significativo, lo que se podría aproximar al comportamiento de una arcilla muy rígida y en cuanto al valor del ángulo de fricción se presenta igualmente un aumento, ubicándose en un valor correspondiente igualmente al de una arcilla rígida, al realizar la analogía, lo cual era de esperarse debido a las cualidades cementantes de la ceniza volante y del tamaño de sus partículas.

Figura 54.

Comparativa de mejora de la cohesión y el ángulo de fricción



De esta manera la principal conclusión a la que permite llegar el análisis de resultados, como ya se mencionó, es que la hipótesis planteada se cumple, lo que significa que la ceniza volante es un material que puede ser tenido en cuenta como una buena opción para la solución a problemas de estabilidad generado por la presencia de suelos expansivos o compuesto por arcillas expansivas, ya que cumple con las propiedades técnicas, como ha sido demostrado en este estudio, además de ser una opción relativamente económica respecto a otros materiales, debido a que es un material de residuo proveniente de otros procesos, que actualmente es subutilizado.

7. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede concluir que la ceniza volante es un material que permite reducir las propiedades de expansividad de los suelos arcillosos, ya que disminuye la consolidación y los asentamientos generados en ellos, a la vez que aumenta sus propiedades de resistencia al corte lo que se puede notar principalmente en la disminución de aproximadamente 0.6 m²/año en el coeficiente de consolidación y el aumento de la cohesión en más de 0.3 kg/cm².

Con base en la literatura y en el estudio presentado, se puede observar que es necesario realizar un análisis detallado del porcentaje de ceniza volante que sea más adecuado para mezclar con el suelo que se esté trabajando, debido a que este valor varía significativamente dependiendo de las propiedades del suelo con el que se vaya a mezclar, así como, con las características de resistencia que sean de mayor interés en cada caso particular.

El uso de ceniza volante como material de estabilización es una alternativa importante a tener en cuenta en la solución de este tipo de problemas, ya que, al ser un material de desecho, su obtención puede ser relativamente económica en comparación con materiales como la cal, además de que su uso permite mitigar los efectos ambientales adversos que genera su desperdicio, sin embargo, es importante analizar y caracterizar adecuadamente la ceniza volante con la que se vaya a trabajar, debido a que sus propiedades son muy variables dependiendo del lugar y el proceso del que sean producidas.

8. Recomendaciones

Realizar los ensayos para contenidos de ceniza volante, en peso, mayores al 25%, teniendo en cuenta y midiendo el cambio que se presenta en las propiedades de resistencia del suelo y las mezclas, tales como compresión inconfiada, módulo de resiliencia y CBR.

Elaborar un estudio en el que se realice la comparativa en el efecto de la ceniza para diferentes tiempos de curado, teniendo en cuenta el análisis de su estructura química, de tal forma que se puedan determinar aquellos componentes que sean más beneficiosos a la hora de realizar una estabilización de arcillas expansivas.

Ejecutar un análisis económico para determinar la viabilidad práctica en la ejecución y aplicación de este tipo de mezclas y los porcentajes de mezcla que presenten mejores beneficios de acuerdo a las situaciones de cada obra.

Realizar un estudio comparativo entre los beneficios que pueden presentar diversos materiales, como el presentado para cal, cemento o fibras, respecto a diversos tipos de ceniza volante, de manera que se puedan evaluar múltiples alternativas para la solución de problemas de estabilidad en suelos arcillosos.

9. Bibliografía

- American Society of Testing Materials. ASTM. (2017). *Norma ASTM C-618*. Estados Unidos.
- American Society of Testing Materials. ASTM. (2017). *Norma ASTM D-1883*. Estados Unidos.
- Carter, M. y Bentley, S. P. (2016). *Soil properties and their correlations*. Segunda Edición. Capítulo 5, pp. 82 y 88.
- Celis Chaparro, M. M. y Martínez Suarez, L. H. (2015). *Estudio del mejoramiento de las propiedades físicas y químicas de suelos residuales arcillosos de la formación Bucaramanga, Vereda Llanadas, Municipio de San Juan de Girón, Santander, aditivo con residuos de construcción* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Das, M. B. (2008). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Tercera edición. Capítulos 6 y 7, pp. 151-217.
- Edil, T. B., Acosta, H. A. y Benson, C. H. (2006). *Stabilizing Soft Fine-Grained Soils with Fly Ash*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2), pp. 283-294. Recuperado de <https://ascelibrary.org/>
- García López, D. A. y Cabana Valverde, M. J. (2014). *Propiedades de retención de humedad de arcillas sobreconsolidadas por desecación del occidente de la sabana de Bogotá* (tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bogotá D.C, Colombia.
- Kumar, A., Walia, B. S. y Bajaj, A. (2007). *Influence of Fly Ash, Lime, and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil*. *Journal of materials in Civil Engineering*, 19(3), pp. 242-248. Recuperado de <https://ascelibrary.org/>
- Instituto Alemán de Normalización. DIN. (2005). *Norma DIN 1054: Ground-Verification of the safety of earthworks and foundations*, pp. 112. Alemania.
- Instituto Nacional de Vías. INVIAS. (2012). *Manual de diseño de cimentaciones superficiales y profundas para carreteras*, pp. 4-61. Colombia.

Instituto Nacional de Vías. INVIAS. (2013). *Manual de normas técnicas de ensayos de materiales para carreteras*. Sección 100. Colombia.

Look, B. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*, pp. 82. Londres.

Martínez Cepeda, C. A. (2016). *Correlación entre el límite líquido y el coeficiente de compresibilidad para arcillas de llanura costera*. *Ingenio Magno*, 7(1), pp. 84-100.

Pérez Collantes, R. C. (2012). *Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o subbase de pavimentos* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Tastan, E. O., Edil, T. B., Benson, C. H. y Aydilek, A. H. (2011). *Stabilization of Organic Soils with Fly Ash*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(9), pp. 819-833. Recuperado de <https://ascelibrary.org/>