

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE (CBR) DE UN SUELO
EXPANSIVO CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE.**

Cristian Camilo Ariza Gómez
Camilo Andrés Rojas Novoa
Yiber romero fuentes

**Universidad la Gran Colombia
Facultad de ingeniería civil
Programa de ingeniería civil
Bogotá D.C
2016**

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE (CBR) DE UN SUELO
EXPANSIVO CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE.**

Cristian Camilo Ariza Gómez
Camilo Andrés Rojas Novoa
Yiber romero fuentes

**Proyecto de Tesis, presentado como requisito
para optar el título de Ingeniero Civil.**

Asesor Disciplinar

Ing. Miguel Sarmiento

Asesora Metodológica

Mary Luz Parra Gómez

**Universidad la Gran Colombia
Facultad de ingeniería civil
Programa de ingeniería civil
Bogotá D.C
2016**

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Presidente del Jurado

Bogotá, Enero del 2017

DEDICATORIA

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

Recordando todos esos momentos de estrés que viví en la realización de esta tesis y toda la paciencia que me dio para continuar y no desfallecer en el intento.

A mi madre 'Cristina Gómez'

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi padre 'Orlando Ariza'

'Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante.

A mi Mascota 'Simón'

Por estar siempre a mi lado en los momentos de trabajo y dedicación brindándome su más sincero amor y acompañamiento hasta las altas horas de la madrugada.

A mi hermano 'Felipe Ariza' y a todos mis familiares y amigos que influyeron directa o indirectamente en la realización de esta tesis de investigación.

Cristian Camilo Ariza

La concepción de este proyecto está dedicada a mis padres María Gilma Novoa y Abdón Rojas, pilares fundamentales en mi vida, sin ellos, jamás hubiese podido conseguir lo que hasta ahora soy. Su tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y destacar, no solo para mí, sino para mis hermanos los cuales siempre me motivaron a salir adelante, gracias Iván y Diana.

También es importante recordar a mi abuelo Manuel Antonio Rojas, quien con sus consejos, me ayudo a crecer como persona y estar hoy en este momento tan importante para mi vida.

Camilo Andrés Rojas

En memoria de mi madre Sol Angie fuentes Soto que me apoyo hasta la última gota de sudor con su trabajo para verme profesional, de mi padre que en paz descansa y que orgullosamente en vida proclamaba su entusiasmo por un hijo profesional, por el Doctor Andrés Rodríguez que me apoyo en los momentos difíciles de mi juventud y que de seguro seguirá siendo así, igualmente a su padre que en paz descansa el financiero Dr. Mariano Rodríguez quien ha sido la persona más influyente en mi superación personal.

Yiber Romero

AGRADECIMIENTOS

Nuestros sinceros agradecimientos están dirigidos primero a Dios ,por brindarnos esta maravillosa oportunidad de llegar a un claustro universitario , a nuestros padres por su apoyo incondicional en cada momento que les necesitamos y a nuestros docentes quienes compartieron con nosotros sus conocimientos brindándonos la oportunidad de estar alcanzando este último peldaño que nos permitirá convertirnos en profesionales y estar así preparados para un desempeño laboral futuro.

Un agradecimiento especial a nuestros profesores y tutores Ing. Miguel Sarmiento y Lic. Mary Luz Parra y a todos aquellos que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario, y que nos ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de la tesis.

**Cristian Camilo Ariza
Yiber Romero y
Camilo Andrés Rojas**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	3
1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	5
2. JUSTIFICACION	6
3. OBJETIVOS	8
3.1. GENERAL	8
3.2. ESPECÍFICOS.....	8
4. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	9
5.1. SUELO Y SUB-RASANTE	16
5.2. ARCILLA EXPANSIVA	17
5.2.1. Problemas de las arcillas expansivas:	18
5.2.2. Determinación de suelos expansivos:	19
5.2.3. Teoría del proceso de expansión:	21
5.3. CENIZA VOLANTE	22
5.3.1. Definición:.....	22
5.3.2. Composición y propiedades de la ceniza volante:.....	23
5.3.3. Clasificación de la ceniza volante:	26
5.3.3.1. Ceniza clase N:.....	26
5.3.3.2. Ceniza clase F:	27
5.3.3.3. Ceniza clase C:.....	27
5.3.4. Usos	27
6.1. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	31
6.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	31
6.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN	31
7. ANÁLISIS Y RESULTADOS	35
7.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO NATURAL	35
7.1.5. Ensayos de CBR.....	40

7.2. Análisis de resultados de las mezclas de suelo natural y ceniza volante con respecto a los resultados de suelo natural.	42
7.2.3. Comparación de los resultados de expansión.	48
7.2.4. Resultados de CBR	49
8. CONCLUSIONES	56
9. RECOMENDACIONES.....	59
10 BIBLIOGRAFIA	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Resultados de límites de Attemberg.....	12
Tabla 2 Resultado de ensayos de expansión de materiales de este estudio entre suelo arcilloso y ceniza volante.....	12
Tabla 3 Resultado de ensayos de CBR de materiales de este estudio entre suelo arcilloso y ceniza volante	13
Tabla 4 Dosificación de Mezcla suelo- cenizas y límites de plasticidad	14
Tabla 5 Predicción de la expansividad a partir del límite líquido.....	20
Tabla 6 Composición de la Ceniza Volante N,F,C en porcentaje	24

Tabla 7 Fases de la investigación	33
Tabla 8 Análisis limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad.....	37
Tabla 9 Límite de contracción del suelo natural	38
Tabla 10 Expansión libre en probeta para el suelo natural.....	38
Tabla 11 Expansión en CBR.	39
Tabla 12 Resultados de CBR, del suelo natural.	40
Tabla 13 Resultados de CBR	41
Tabla 14 Resultados de límites de consistencia.....	43
Tabla 15 Resultados de masa unitaria seca máxima y contenido óptimo de humedad.....	45
Tabla 16 Resultados de expansión libre en probeta del suelo natural y las mezclas A70/C30, A65/C35 y A60/C40.	48
Tabla 17 Resultados de ensayos CBR para 30% de ceniza volante.....	51
Tabla 18 Resultados de ensayos CBR para 35% de ceniza volante.....	52
Tabla 19 Resultados de ensayos CBR para 40% ceniza volante.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de la subrasante en un diseño para adoquines.....	17
Figura 2 Proceso de obtención de la ceniza volante.....	23

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Excavación para obtener muestra de suelo fino.	32
--	----

LISTA DE GRÁFICOS

Grafico 1 Variación en el límite líquido para cada dosificación.	9
Grafico 2 Índice de Plasticidad.....	10
Grafico 3 Índice de expansión para las diferentes mezclas	10
Grafico 4 Presión de expansión para las diferentes mezclas	11
Grafico 5 Análisis granulométrico del suelo natural por medio de hidrómetro.	36
Grafico 6 Curva de fluidez, para el suelo natural	37
Grafico 7 Resultados, curva de compactación método de Harvard miniatura modificado para el suelo natural	39
Grafico 8 Comparación de resultados de CBR de muestra inalterada, antes y después de 3 días de saturación.	40
Grafico 9 Resultados de CBR	41
Grafico 10 Valor de CBR para densidad máx. seca del ensayo de Harvard Miniatura.	42
Grafico 11 Comparación grafica entre los resultados de suelo natural y mezclas de arcilla-ceniza	43
Grafico 12 Análisis del comportamiento de los resultados de Plasticidad	44
Grafico 13 Análisis del comportamiento de los resultados de límite líquido	45
Grafico 14 <i>Resultados graficados del comportamiento de masa unitaria seca.</i>	46
Grafico 15 Resultados graficados del comportamiento del contenido óptimo de humedad.....	46
Grafico 16 Curvas de compactación de suelo natural y mezclas A70/C30, A65/C35, A60/40.	48
Grafico 17 Comportamiento de expansión en ensayos de CBR.	49
Grafico 18 Curva de CBR de la mezcla A70/C30.	50
Grafico 19 Comportamiento de CBR vs densidad máxima seca para 30% de ceniza volante.	50
Grafico 20 Curva de CBR de la mezcla A65/C35	51

Grafico 21 Comportamiento de CBR vs densidad máxima seca para 35% de ceniza volante.	53
Grafico 22 Curva de CBR de la mezcla A60/C40	54
Grafico 23 Comportamiento de CBR vs densidad máxima seca para 40% de ceniza volante.	54
Grafico 24 Comportamiento de CBR vs humedad de la saturación para mezclas de ceniza volante	55
Grafico 25 Comportamiento de los resultados de CBR	55

INTRODUCCIÓN

Atendiendo a que las obras civiles para la construcción de las vías 4G en Colombia se encuentran en auge se hace necesario realizar trabajos de investigación que aporten información de importancia, sobre el manejo que se debe dar a los suelos problemáticos, es así como la presente investigación está orientada a evaluar la capacidad de soporte (CBR) de un suelo expansivo con la adición de ceniza volante, utilizando una muestra del mismo presente en la ciudad de Bogotá.

Según Montejo¹ en Colombia existen gran diversidad de suelos problemáticos, con características físicas y mecánicas muy variables; dentro de los cuales se han identificado algunos suelos de difícil manejo principalmente por sus características de deformabilidad, baja resistencia, expansividad y sensibilidad, lo cual ocasiona problemas en la construcción y en la estructura final del pavimento. Es así como se presentan los resultados de laboratorio de la aplicación de ceniza volante en suelos de tipo expansivo midiendo la capacidad de soporte (CBR) de los mismos utilizando diversos porcentajes de ceniza volante proveniente de termozipa mezclados con muestras de suelo seleccionado.

Los valores de CBR obtenidos son comparados con otros valores obtenidos en experiencias de otros investigadores, con el fin de llegar a conclusiones que permitan aportar información de interés para la construcción de las vías que se encuentran en desarrollo en Colombia.

¹ Montejo Fonseca Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Segunda edición. Bogotá D.C. Universidad Católica de Colombia. 2002. ISBN 956-96036-2-9. Pag.81. Consultado en www.litecsa.com.ec 2587713.

Es fundamental a su vez reconocer que la presencia de obras de infraestructura como las vías favorecen la calidad de vida, la inclusión social y las oportunidades para las comunidades aisladas, a la vez que promueve el crecimiento de la economía y la competitividad de sus empresas. También favorecen la integración del espacio nacional, la interconexión regional, la descentralización y la circulación interna.² Pero no es solamente construirlas sino hacerlo de tal forma que se garantice su buen funcionamiento a largo plazo.

Para la realización de este trabajo se utiliza un suelo que tiene características expansivas ,pero no se le realiza un análisis previo sobre sus contenidos minerales, lo cual según investigaciones realizadas influyen en los resultados obtenidos al adicionar ceniza volante, esto se constituye en una de las dificultades presentadas en los resultados obtenidos .

Además de lo anterior, con las cenizas de termozipa no se encontraron resultados relacionados específicamente con su uso como aditivo en suelos arcillosos como los utilizados, lo cual da una información que puede servir de referente a otras investigaciones.

Este tipo de prácticas se hace necesario implementarlas para contribuir con el mejoramiento de las obras relacionadas con las vías en Colombia, ya que se requiere disminuir los costos y a su vez se tenga una mejor calidad de la sub rasante utilizando materiales de bajo costo en relación con los utilizados en forma cotidiana.

² Barbero José A. La Infraestructura en el Desarrollo Integral de América Latina. Diagnóstico estratégico y propuesta para una agenda prioritaria. Ideal .2011. XXI Cumbre Iberoamericana de Jefes de Estado y de Gobierno celebrada en Asunción, Paraguay. Pág. 9. Recuperado en Diciembre 5 de 2016 de <http://www19.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2012/09525.pdf>

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Colombia se halla situada en el noroccidente de América del Sur, sobre la línea equinoccial, en plena zona tórrida y equidistante de los extremos del continente americano, aun cuando la mayor parte se ubica en el hemisferio norte. Está bañado por las aguas del Mar Caribe y del Océano Pacífico; su ubicación tiene una relación directa con periodos climáticos que se encuentran enmarcados por una época de sequias y una época de lluvias, lo cual es un factor determinante en la presencia de suelos problemáticos.³

Posee una topografía muy irregular en toda su extensión, es decir cuenta con diferencias de alturas que van desde el nivel del mar ascendiendo hasta un poco más de los 3000 m.s.n.m, debido a esto se puede decir que existe gran variedad de características en sus terrenos naturales, y zonas donde se pueden hallar diferentes tipos de suelo estando entre ellos los llamados suelos problemáticos.

En investigaciones realizadas por la Universidad Nacional como la de Chicangana y otros⁴ se encuentran evidencias de como en Bogotá existen zonas del área metropolitana en donde es frecuente la inclinación y el hundimiento de las calles y las edificaciones por el fenómeno de la licuación de suelos. Se trata evidentemente de la ocupación de llanuras aluviales susceptibles de inundaciones por cuerpos de agua, y presentan como consecuencia el fenómeno de la licuación de suelos, lo cual está relacionado

³En Colombia. Situación geográfica de Colombia. <https://encolombia.com/educación-ultura/geografia/situacion-geografica-Colombiana/#sthash.nMAI5tHD.dpuf>

⁴ CHICANGANA Germán y otros 2015. "La amenaza sísmica de la Sabana de Bogotá frente a un sismo de magnitud $M > 7.0$, cuyo origen esté en el Piedemonte Llanero". Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 24 (2): 73-91. DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50207. Pag. 85

con la presencia de arcillas expansivas, este es un problema que debe ser manejado teniendo en cuenta que no solo en Bogotá el problema de los pavimentos es notorio y por lo tanto se deben plantear algunas soluciones que mitiguen paulatinamente este problema.

Las arcillas expansivas reaccionan volumétricamente al contacto con el agua, pero al ausentarse el líquido estas tienden a contraerse y formar micro relieves dando una forma irregular en la superficie del suelo lo que puede ocasionar daños en la infraestructura que se haya construido sobre dichos suelos, según investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia como la mencionada anteriormente y otras.

Es así como se puede afirmar que los suelos finos expansivos para una sub-rasante son nocivos, ya que estos tienden a no cumplir con las propiedades geotécnicas mínimas necesarias para una estructura vial, siempre y cuando su contenido de humedad no tenga variaciones porque de esta depende si se expande o no, pero el suelo natural es muy susceptible a este cambio debido a que el nivel freático mantiene una dependencia de factores como el clima, el cual está asociado a épocas de lluvias y de sequías en varios periodos del año.

Entender el comportamiento del suelo natural en una vía es muy importante, por lo cual se deben conocer las propiedades básicas de la sub-rasante como la porosidad, el grado de absorción, el límite líquido, el límite plástico, el índice de plasticidad y la capacidad de soporte, ahora en base a esto se tomará una muestra compuesta por material fino, en la cual se debe tener en cuenta que:

Existen tres grandes grupos de minerales que hacen parte de la formación básica de las arcillas: caolinitas, ílitas y montmorillonitas. Los suelos arcillosos no solamente son expansivos debido a la estructura química que hace parte

de estos, sino que además la presencia de minerales como la montmorillonita que permite mayores índices de hinchamiento.⁵

Los suelos arcillosos expansivos traen grandes problemas en sus propiedades al tener bajo índice de resistencia a las cargas comúnmente exigidas en su serviciabilidad y uso vial, para ello se necesita saber la capacidad de soporte o el potencial de resistencia que tiene dicho suelo o sub-rasante en este caso, y se sabe que en la práctica esta capacidad se le asigna un valor con el CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO). Que según la ASTM (American Society for Testing and Materials) mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo y para poder evaluar la calidad del terreno para sub-rasante, sub base y base de pavimentos, efectuándose bajo condiciones controladas de humedad y densidad⁶.

1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el comportamiento mecánico de un suelo fino con baja estabilidad volumétrica al adicionar ceniza volante al 30%, 35% y 40?

⁵ Javier Camacho, Oscar Reyes, Catalina Mayorga, Dolly Méndez. Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas. 2006. Vol 16. N° 2. Pág. 46

⁶ SANCHEZ, Fredy. Instrucciones para hacer el ensayo CBR, Venezuela, 2011, [en línea] consultado el 19 de septiembre de 2016. Tomado de <<https://www.youtube.com/watch?v=UVQvm4pUTCM&nohtml5=False>>

2. JUSTIFICACION

La ceniza volante es un derivado de las hidroeléctricas considerado como desecho; se producen mundialmente una cantidad superior a 800.000 millones de toneladas como lo fue en el año 2011 donde solo el 20% de esta cantidad se reutiliza y el otro 80% se deposita en vertederos generando contaminación del suelo, agua y aire. Las cenizas volantes tienen la propiedad de activación alcalina, esto quiere decir que si se combina la ceniza volante con cualquier activador alcalino que generalmente tienen $\text{PH} > 13$ se comporta como cementante, ya que las cenizas volantes están compuestas de óxido de silicio, aluminio, hierro y calcio (en baja proporción)⁷.

Teniendo presente este concepto básico de la producción y uso de la ceniza volante mencionada en este trabajo como ceniza volante clase F, que significa bajo contenido en calcio, se aprovechara dicho subproducto del carbón, el cual se usará para disminuir el fenómeno de la expansión, aplicándose concentraciones diferentes, con estos porcentajes se podrá estimar la concentración adecuada para llegar al resultado más favorable, así mismo, al adicionar la arcilla, el material de ensayo sufrirá modificaciones en su granulometría con base a esto se floccularan los porcentajes de arcillas para obtener reducciones en el índice de plasticidad, límite líquido y límite plástico, además, las reacciones puzolánicas permitirán incrementar la capacidad de soporte de la sub-rasante y con ello mejorar las estructuras viales, teniendo en cuenta que de obtener un resultado positivo de este estudio, se reflejaría directamente en las dimensiones de las capas de una estructura de pavimento, es decir su volumen no tendría que aumentar como se realiza actualmente, y adicionalmente el presupuesto en una obra se vería beneficiado.

⁷ CRIADO, María. Corrosión de armaduras en nuevos materiales cementantes basados en cenizas volantes, España, 2012. [En Línea] Consultado el 12 de septiembre de 2016. Recuperado de <<https://www.youtube.com/watch?v=SqIUAgdEYho&nohtml5=False>>

La alta demanda de energía en Colombia, que ha venido enfrentando una crisis energética debido al bajo nivel de agua de los embalses presentado debido al conocido fenómeno del niño, acompañado de fuertes y largas temporadas de estiaje que se viven en Colombia, produce una problemática que ha hecho que las termoeléctricas aumenten y mantengan una constante producción de energía. En este proceso de producción se deriva un subproducto del carbón que es la ceniza volante, la cual puede ser aprovechada en distintos campos de la ingeniería, en este caso para intentar mejorar el comportamiento de una sub rasante compuesta por arcillas expansivas; teniendo presente que este subproducto contamina el aire, puesto que es muy volátil llegando así hasta las vías respiratorias de las personas, causando también graves enfermedades.

La ceniza volante será utilizada entonces para aportarle mejores características a los suelos que son limitados en capacidad de soporte. Con este estudio se evalúa si las cenizas mejoran las propiedades de las arcillas expansivas, ya que estas son un problema en la sub rasante. Al mejorar esta capa se logra la estabilización de la estructura del pavimento que es algo deseable.

3. OBJETIVOS

3.1. GENERAL

Evaluar el comportamiento mecánico de un suelo fino con baja estabilidad volumétrica al adicionar ceniza volante al 30%, 35% y 40%

3.2. ESPECÍFICOS

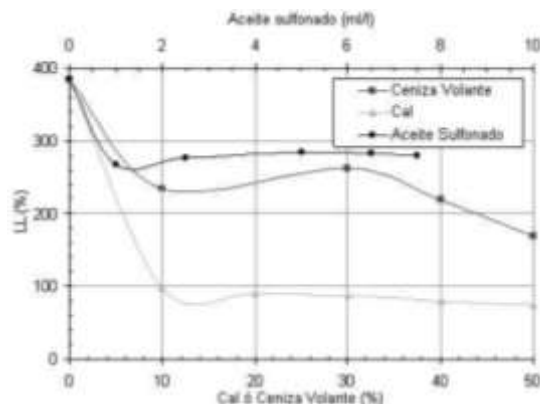
- Identificar las características del material de Arcilla de acuerdo a las normas de INVIAS.
- Identificar el comportamiento del cambio de volumen de las mezclas A70/C30, A65/35 Y A60/40
- Identificar el comportamiento en cuanto a la capacidad de carga de las mezclas A70/C30, A65/35 Y A60/40

4. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Para la obtención de un estudio basado en el comportamiento de una mezcla arcilla-ceniza se deben tener en cuenta dosificaciones, las cuales se tomaron de algunas investigaciones como referencia, cabe mencionar que las investigaciones que serán citadas obtuvieron sus humedades óptimas con base a ensayos de compactación proctor, este es un ensayo que se caracteriza porque tiene un proceso de compactación por medio de impactos.

La universidad Militar Nueva Granada⁸, realizó un estudio utilizando mezclas con tres tipos de materiales, las cuales fueron ceniza volante, cemento, y aceite sulfonado, utilizando para la ceniza y el cemento un porcentajes de 10, 20, 30, 40 y 50%, con estas mezclas analizaron el comportamiento de los límites de attemberg y de expansión. Los resultados obtenidos se observan en las siguientes gráficas.

Grafico 1 Variación en el límite líquido para cada dosificación.

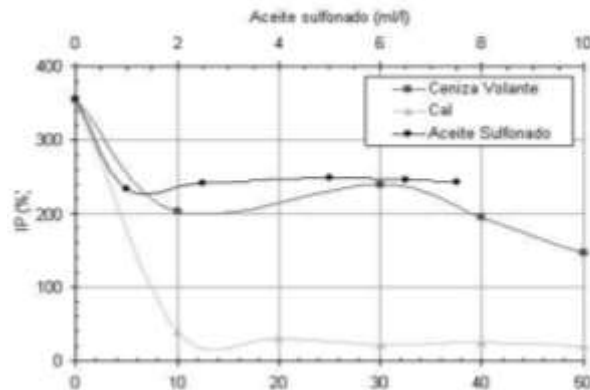


Fuente: CAMACHO Javier, REYES Oscar, MAYORGA Catalina, MÉNDEZ Dolly.⁹

⁸ Javier Camacho, Oscar Reyes, Catalina Mayorga, Dolly Méndez. Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas. 2006. Vol 16.

⁹ Javier Camacho, Oscar Reyes, Catalina Mayorga, Dolly Méndez. Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas. 2006. Vol 16.

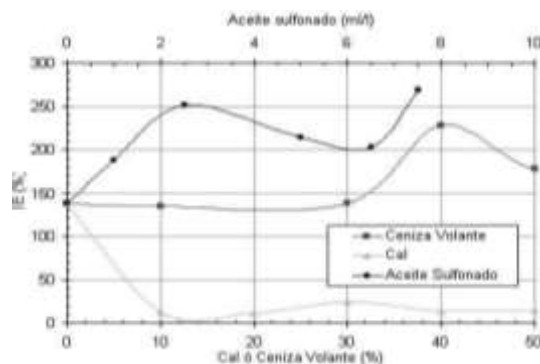
Grafico 2 Índice de Plasticidad



Fuente: CAMACHO Javier, REYES Oscar, MAYORGA Catalina, MÉNDEZ Dolly. ¹⁰

Atendiendo a las informaciones obtenidas de las gráficas 1 y 2 con respecto al análisis de resultados que se detallaron en la investigación, se observa una similitud en la reducción de los límites de attemberg, por consiguiente se puede decir que cuando la cantidad de aditivo considerado es mayor, el Límite líquido (LL) y el Índice de plasticidad (IP) disminuye al adicionarle la ceniza volante, pero también se observa que hay una curva parabólica entre los porcentajes de 20 a 40% y su punto de mayor reducción se obtuvo con una mezcla de 50% de ceniza volante.

Grafico 3 Índice de expansión para las diferentes mezclas

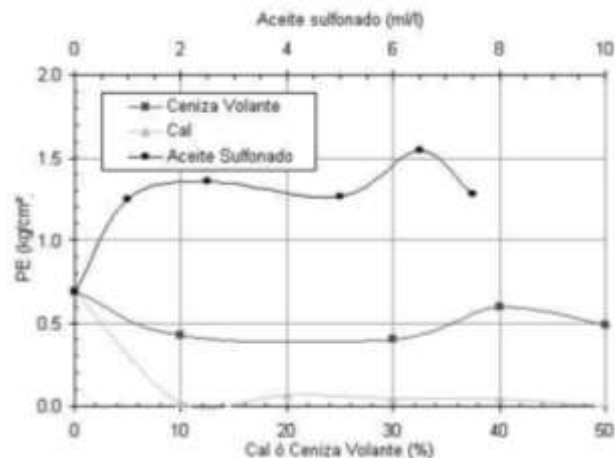


Fuente: CAMACHO Javier, REYES Oscar, MAYORGA Catalina, MÉNDEZ Dolly. ¹¹

¹⁰ Javier Camacho, Oscar Reyes, Catalina Mayorga, Dolly Méndez. *Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas*. 2006. Vol 16. Pág. 50

¹¹ . ibid. pág. 51

Grafico 4 Presión de expansión para las diferentes mezclas



Fuente: CAMACHO Javier, REYES Oscar, MAYORGA Catalina, MÉNDEZ Dolly. ¹²

Con respecto a las gráficas 3 y 4 se aprecia que los resultados de índice de expansión % y presión de expansión se calificó como nula la expansión con el aditivo de cal; con respecto a la mezcla de ceniza volante la investigación se pronunció diciendo que “los valores de presión de expansión disminuyeron con respecto al valor de expansión para la bentonita pura.”¹³, ahora observando el IE muestra que mantiene un constante comportamiento de 0 a 30% del mismo aditivo, porque desde este punto se nota un incremento de expansión, seguido de un leve descenso.

Por lo que se refiere a lo que concluyeron los autores, dicen que la cal fue el aditivo que tuvo el mejor desempeño y que la ceniza funciona como un aditivo inhibidor, para lograr un óptimo resultado se debe emplear una gran cantidad de ceniza volante y en el caso de la cal solamente 10% para obtener un porcentaje óptimo.

¹²CAMACHO Tauta Javier Fernando y otros. Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas. Ciencia e ingeniería neogranadina. Vol 16 No 2 Diciembre de 2006 Universidad Militar Nueva Granada . pag. 51

¹³ Ibid. .pag. 50

La Universidad Nacional De Ingeniería¹⁴ (Perú) realizó un estudio utilizando proporciones de muestras compuestas por suelo natural, ceniza volante y cemento en diferentes proporciones, a su vez combinaron solamente la ceniza volante y el suelo natural con el fin de comparar dichos resultados. Para la combinación ceniza/suelo se usaron proporciones de 20 y 40% de ceniza con respecto al peso seco de la muestra total de arcilla, ellos llamaron a estas muestras S80/CV20 y S60/CV40 respectivamente, a continuación se mostraran tablas de los resultados obtenidos.

Tabla 1 Resultados de límites de Attemberg

Material/Mezcla	Límites de Consistencia		
	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)
S	52	24	28
S80/CV20	48	22	26
S60/CV40	40	18	22
CV	-	NP	NP

Fuente: PÉREZ, Rocio, 2012¹⁵

Tabla 2 Resultado de ensayos de expansión de materiales de este estudio entre suelo arcilloso y ceniza volante

Material/Mezcla	Símbolo	Expansión a los 4 días (%)
Suelo	S	5.7
Mezcla N°1	S80/CV20	1.2
Mezcla N°2	S60/CV40	0.7

Fuente: PÉREZ, Rocio, 2012¹⁶

¹⁴ PÉREZ Collantes Rocio, Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos, Lima – Peru 2012.

¹⁵ PEREZ Collantes Rocio, Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos. Universidad Nacional de Ingeniería Tesis de Posgrado Lima – Peru 2012 Pag 55

¹⁶ Ibid. pag.70

Tabla 3 Resultado de ensayos de CBR de materiales de este estudio entre suelo arcilloso y ceniza volante

Material/Mezcla	Símbolo	CBR al 100 % DE LA MDS (%)
Suelo	S	7.7
Mezcla N°1	S80/CV20	16.9
Mezcla N°2	S60/CV40	23.5

Fuente: PÉREZ, Rocio, 2012¹⁷

En cuanto a los resultados de límites de Atterberg reportados en la tabla 1 se observa que al aplicarse más cantidad de ceniza volante los resultados tanto de límite líquido como de límite plástico, disminuyen con respecto a los resultados del suelo natural, por otra parte se puede observar en la tabla 2 que la expansión cuyos resultados están dados en porcentaje muestran también disminución, es decir que a mayor cantidad de aditivo, menor expansión y finalmente los resultados de ensayos de CBR (Tabla 3) muestran una considerable mejoría, ya que a mayor cantidad de ceniza volante aumenta el valor de CBR .

En la conclusión de esta investigación mencionan que para tener resultados satisfactorios se debe emplear o adicionar una cantidad mayor al 20% de ceniza volante, además concluyen que al adicionarle 3% de cemento los resultados mejoran el comportamiento de un suelo expansivo para ser utilizado como subrasante.

En la investigación realizada por FLOREZ G.C, y otros sobre estabilización Química de Suelos Expansivos de San José de Cúcuta (Colombia), usando

¹⁷ Ibid Pag 73

Cenizas Volantes, citada por QUINTERO L. Leidy J. y otros¹⁸ se encuentra el resultado de la aplicación de ceniza volante a diferentes muestras de arcilla de tipo expansivo a la cual se le han determinado los minerales presentes como resultado de la investigación de Quintero .Observemos sus resultados en la tabla 4, donde se evidencian las mezclas de ceniza volante en porcentajes de 20, 25 y 30% con 5 muestras de suelo caracterizadas según su mineralogía.

De esta investigación en el trabajo mencionado se llega a las siguientes conclusiones: se nota la disminución de los límites al aumento de la proporción de cenizas agregadas, esto en la mayoría de los casos. La mezcla hecha al 30% en volumen provocó la mayor disminución del índice de plasticidad y del límite líquido.

Tabla 4 Dosificación de Mezcla suelo- cenizas y límites de plasticidad

MEZCLA	0% VO L.	20% VO L.	25% VO L.	30% VO L.
MUESTRA				
A1-M1				
LL	62.5 0	55.0	53.4 0	52.6 0
LP	23.3 9	21.4 6	21.7 5	26.2 9
IP	39.0 1	33.5 4	31.6 5	26.3 1
LC	12.6 6	14.4 6	13.8 7	15.0 9
% Re. del IP	-----	14.0 2	18.8 7	32.5 6
A2-M1				
LL	64.4 0	49.0 0	48.0 0	48.1 0
LP	24.1	17.6	17.8	24.1
IP	40.2 4	31.4 0	30.1 5	23.9 4
LC	11.4 0	12.3 1	17.8 5	11.9 8
% Re. del IP	-----	21.9 7	25.0 7	40.5 1
A2-M2				
LL	65.6 0	58.1 0	59.0 0	55.5 0
LP	25.4 4	24.1 9	24.9 3	26.8 7
IP	40.1 6	33.9 1	34.0 7	28.6 3

¹⁸ QUINTERO Lemus Leidy y Gallardo Amaya Romel Jesús Gallardo . Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Grupo de Investigación en Geotecnia y Medio Ambiente GIGMA. INGENIO UFPSO – Vol. 08 – Ene-Dic 2015 - p-ISSN 2011-642X e-ISSN 2389-864X.Pag. 89

MEZCLA	0% VO L.	20% VO L.	25% VO L.	30% VO L.
LC	12.0 9	16.2 5	18.4 5	15.7 8
% Re. del IP	-----	15.5 6	15.1 6	28.7 1
A3-M1				
LL	67.5 0	54.7 0	58.0 0	54.4 0
LP	22.4 5	21.8 1	24.3 7	22.1 0
IP	45.0 5	32.8 9	33.6 3	32.3 0
LC	12.5 5	20.1 7	16.6 8	18.2 9
% Re. del IP	----- -	26.9 9	25.3 5	28.3 0
A3-M2				
LL	59.7 0	60.6 0	51.7 0	52.2 0
LP	21.9 7	24.0 6	22.4 1	23.3 9
IP	37.7 3	36.5 4	29.2 9	28.8 1
LC	15.8 7	14.4 8	15.8 4	14.7 2
% Re. del IP	_____	3.15	22.3 7	23.6 4

Fuente. Flórez et al, 2008¹⁹.

Pero también se puede observar que el comportamiento de las 5 muestras varia con respecto a los límites de Attemberg, lo cual se relaciona con la composición mineralógica de las diferentes muestras, siendo poco consistente en todos los resultados la disminución, ya que en algunos de ellos, al aumentar el porcentaje de ceniza muestra incrementos en el valor de algunos de los límites.

Con base a las anteriores investigaciones se puede apreciar que el suelo natural mezclado con la ceniza volante comienza a arrojar un notable mejoramiento con una adición del 25% de ceniza, por lo cual este proyecto investigativo puede desarrollar un análisis con porcentajes que varíen de 30 a 40% de material arcilla-ceniza. Los porcentajes serian 30%, 35% y 40%, teniendo estos porcentajes se analizara o se intentara encontrar un porcentaje óptimo.

5. MARCO TEORICO

¹⁹ Ibid Pág. 90

5.1. SUELO Y SUB-RASANTE

El suelo y la roca son dos términos que se encuentran íntimamente relacionados, en general se dice que la roca al descomponerse por diferentes procesos de meteorización da origen a lo que llamamos suelo, dicha acción se presenta por la influencia de fenómenos atmosféricos por un tiempo apreciable. Además de estos existen agentes químicos y biológicos que contribuyen a la formación de suelos de diferente tipo, los cuales se clasifican en diversas formas y grupos ;entre ellos la clasificación AASHTO, en este sistema los suelos se encuentran divididos en dos grupos: los suelos granulares y los suelos finos limo arcillosos, siendo estos últimos en general los que presentan más problemas para su manejo en relación con lo que tiene que ver con la pavimentación, pues presentan variaciones en algunos casos muy notorias cuando están secos y húmedos, lo cual trae como consecuencia ruptura de la capa asfáltica, siendo este hecho una de las inquietudes que se desea abordar por medio de este proyecto. ²⁰

Otro término de gran interés es el de subrasante, según Montejo para la construcción de un pavimento se debe conocer en primer lugar el CBR de la subrasante, este valor determina el grosor que debe tener esta capa del pavimento, en general entre más alto sea su % de CBR menor será su espesor²¹.

☆ Esta clasificación de los suelos se basa en determinaciones de laboratorio como granulometría, límite líquido e Índice de plasticidad, este es un método realizado principalmente para obras viales Guía de clasificación de suelos. Microsoft PowerPoint - BTERZAGHI_NOV.

²⁰ MONTEJO Fonseca Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Segunda edición. Bogotá D.C. Universidad Católica de Colombia. 2002 .ISBN 956-96036-2-9 Pag.39-45 Consultado en www.litecsa.com.ec 2587713.

²¹ Ibid Pag 369

Pero en sí, la subrasante se puede definir así: Es el suelo preparado y compactado para soportar una estructura o un sistema de pavimento. También se define como el terreno de fundación de los pavimentos, pudiendo estar constituida por el suelo natural del corte o de la parte superior de un relleno debidamente compactado²².

Figura 1 Ubicación de la subrasante en un diseño para adoquines

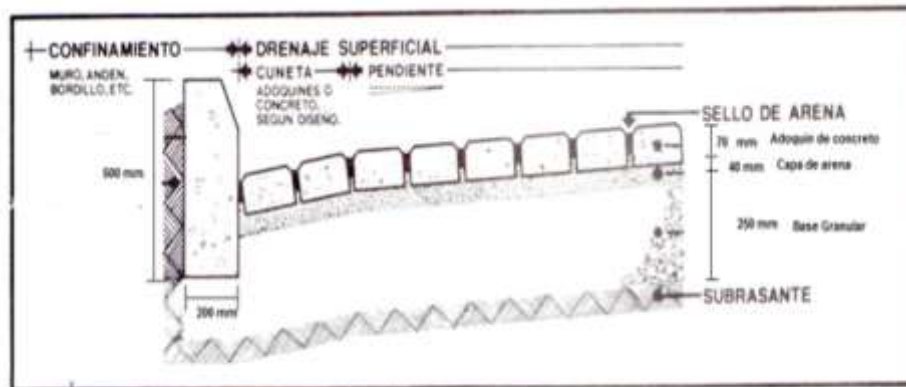


Imagen tomada y editada de Notas Técnicas ICPC. Diseño de espesores para pavimentos de adoquines de concreto.

Fuente: Notas Técnicas ICPC. Diseños de espesores para pavimentos de adoquines de concreto

En esta imagen se observa la ubicación de la subrasante en el perfil de lo que es un suelo adoquinado, así mismo sucede en un suelo que está siendo pavimentado, esta subrasante es posible mejorarla con el fin de prevenir problemas tales como el hundimiento de una capa de pavimento entre otros , para ello existen varias opciones de manejo con materiales que van desde cemento hasta materiales como la ceniza que es un subproducto de las termoeléctricas.

5.2. ARCILLA EXPANSIVA

²² BLANCO, Prada Henry. Glosario de terminos de Ingenieria civil. http://www.academia.edu/7799970/GLOSARIO_DE_TERMINOS_Ingenier%C3%ADa_civil

“Son todas aquellas arcillas que tienen la capacidad de incluir agua en su estructura de láminas, lo cual genera un ensanchamiento o expansión de la estructura cristalina original que puede llegar a producir problemas en las fundaciones de edificios, casas y carreteras.”²³. Estas arcillas son a su vez capaces de absorber grandes cantidades de agua, por lo tanto experimentan cambios de volumen cuando cambia su contenido de humedad. Al aumentar la humedad del terreno se producirán hinchamientos, mientras que si disminuye la humedad (deseccación) se producirán retracciones. Cuando se está frente a un terreno arcilloso potencialmente expansivo y se produce una variación de la humedad se producen cambios de volumen que generan problemas tales como: Grietas verticales e inclinadas en ambos sentidos ocasionados por la variación de tensiones en la cimentación, fisuración y rotura de elementos estructurales y deformación de pavimentos entre otros. Este tipo de suelos son abundantes en Colombia, lo que hace que sean considerados para ser tenidos en cuenta en propuestas de investigación para su mejoramiento.²⁴

5.2.1. Problemas de las arcillas expansivas:

Los daños estructurales causados por las arcillas expansivas a las obras de ingeniería, cimentaciones o pavimentos, causan pérdidas económicas sustanciales y un inadecuado servicio de las construcciones. Este problema ha sido y es motivo de investigación experimental enfocada a la caracterización y mitigación de riesgos geotécnicos.

²³ HUANCA Anampa, Abrahan Segundo laboratorio: exploraciones geotécnicas. Mecánica de suelos aplicada a cimentaciones .Departamento académico de mecánica de suelos. Facultad de ingeniería civil Universidad Nacional de Peru, pag 1

²⁴ Construide (Mensaje de blog). (19 septiembre 2016). Que son las arcillas expansivas?. Recuperado de <http://construide.blogspot.com.co/>

Los factores que influyen en la expansión pueden dividirse en dos grupos: el primero incluye las condiciones estratigráficas y las propiedades intrínsecas del suelo: tipo de mineral arcilloso, tamaño y superficie específica de las partículas, contenido de arcilla y contenido de agua. El segundo grupo abarca las condiciones ambientales: precipitación, evaporación y temperatura. Por lo anterior es que las arcillas expansivas sufren cambios importantes de contenido de agua donde en época de invierno se satura y en verano se deseca, de tal forma que la capa superficial se comporta como un suelo parcialmente saturado. Es así como el sistema hidrológico de las cuencas y subcuencas de una ciudad influyen en el comportamiento del subsuelo, lo cual amerita que todo problema que se presente en una obra de infraestructura sea considerado como parte de ese sistema.²⁵

5.2.2. Determinación de suelos expansivos:

Para la determinación de este material es indispensable tener como base los ensayos de límite líquido (LL) el cual está regido por la norma INV-E 125²⁶ esta norma lo explica como el contenido de humedad de un suelo, el cual es expresado porcentualmente y secado al horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico. Además de otros dos factores como índice de plasticidad (IP) INV-E 126 y la succión del suelo con humedad natural según norma INV E – 157; de acuerdo a lo anterior se mostrará una tabla donde se presentan especificaciones tangibles para caracterizar este tipo de suelo como expansivo.

²⁵ ORDOÑEZ Ruiz Jorge y otro. Caracterización del subsuelo y análisis de riesgos geotécnicos asociados a las arcillas expansivas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVI (número 3), julio-septiembre 2015: 453-470 ISSN 1405-7743 FI-UNAM (artículo arbitrado). <http://dx.doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.010>

²⁶ Norma INV-E 125, 2014

Tabla 5 Predicción de la expansividad a partir del límite líquido

GRADO DE EXPANSIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	
	CHEN	NORMA IS 1498
Bajo	< 30	20 – 35
Medio	30 – 40	35 – 50
Alto	40 – 60	50 – 70
Muy alto	> 60	70 - 90

Fuente: INVÍAS, E-132, 2014

Mineralmente las arcillas expansivas son caracterizadas por propiedades básicas, mediante técnicas adecuadas de laboratorio, los minerales que conforman a la arcilla se pueden evaluar cuantitativamente. La montmorillonita está denotada por su fórmula general $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ esta es un filosilicato que está ubicada en el grupo de las esmectitas, las cuales tienen las siguientes características:

- Es muy expansiva, de alta plasticidad y de muy baja permeabilidad. Tiene un alto intercambio catiónico de 75-150 m.e.q.
- Efervescencia con ataque ácido indica que es Montmorillonita cálcica o magnésica.
- Las unidades están enlazadas por fuerzas de Van der Waals (sistema de capa triple o-t-o). Cada enlace es roto fácilmente por corte, por lo tanto la Montmorillonita es pegajosa y suave cuando se enrolla entre los dedos.²⁷

²⁷ HUANCA Anampa, Abraham SEGUNDO LABORATORIO: EXPLORACIONES GEOTÉNICAS. mecánica de suelos aplicada a cimentaciones .Departamento académico de mecánica de suelos. Facultad de ingeniería civil Universidad Nacional de Ingeniería, 2015. Peru pag 1 Tomado de http://www.academia.edu/7067259/UNIVERSIDAD_NACIONAL_DE_INGENIERIA_FACULTAD_DE_INGENIERIA_CIVIL_DEPARTAMENTO_ACADEMICO_DE_MECANICA_DE_SUELOS_SEGUNDO_LABORATORIO_EXPLORACIONES_GEOTECNICAS

5.2.3. Teoría del proceso de expansión:

En cuanto a esta teoría se dice que las moléculas de agua están siempre rodeando a las partículas de arcilla en forma de agua absorbida, considerándose estas como parte de la superficie de la arcilla, es así que cuando se trata de analizar su comportamiento, el agua influye en sus propiedades físicas como resistencia, plasticidad y permeabilidad. De acuerdo con Sharma (1998) el humedecimiento puede ocurrir por cualquiera de las siguientes formas:

- Por hidratación o incorporación en la estructura cristalina, la cual es el mecanismo principal;
- Por atracción intermolecular entre la superficie sólida del material y el agua sobre un pequeño rango como resultado de las fuerzas de van der Waals; y
- Por enlaces de hidrógeno expuestos a átomos de oxígeno en la superficie de la arcilla.²⁸

Al considerar la presencia de una película de agua absorbida por las partículas de arcilla, se puede dar una explicación o un análisis a una teoría llamada la Capa Doble Difusa (CDD), es así como Chapman describe una película de agua alrededor de una partícula de arcilla, en la cual la concentración de cationes varía en forma continua desde alta concentración en la superficie mineral a bajas concentraciones a medida que se aleja de la superficie. La posición de los cationes está gobernada por los efectos de oposición y atracción electrostática hacia la superficie y difusión a medida que decrece la concentración. La CDD está compuesta por la superficie de la arcilla y el

²⁸ RODRIGUEZ Castiblanco Edgar Alexander. Evaluación del Comportamiento Geomecánico de Arcillas en el Sector de Campoalegre – Ciudad de Barranquilla Evaluación . Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. 2014, pag 26

enjambre de cationes cerca de ella, lo cual nos permite entender un poco la razón por la cual la arcilla en presencia de agua aumenta su plasticidad.²⁹

5.3. CENIZA VOLANTE

5.3.1. Definición

La norma ASTM C-618-12^{a30} define el término ceniza volante como: “El residuo finamente dividido resultante de la combustión del carbón mineral o finamente molido y transportado en el flujo gaseoso”. Esta definición no incluye, entre otras cosas, los residuos resultantes de: (1) la quema de basura municipal o algún otro tipo de basura con carbón; (2) la inyección de cal directamente dentro del calentador para remover azufre; o (3) la quema de basura industrial o municipal en incineradores comúnmente llamados “incineradores de ceniza”.

Las cenizas volantes, son en sí residuos de carbón bitumisos ardiendo, que siendo lo suficientemente finos son llevados por el gas que sale del horno. La ceniza se elimina por medio de una serie de precipitadores mecánicos y electrostáticos antes de que el gas sea liberado a la atmosfera como se muestra en la figura 2.

²⁹ IBID

³⁰ ASTM C 618. Especificación estándar para las cenizas volantes de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso como un aditivo mineral en concreto. ASTM C 618-2001. En: Libro Anual de las normas ASTM, vol. 04,02; 2.001

Figura 2 Proceso de obtención de la ceniza volante



Fuente: SANTAELLA Luz Elena. (2001).³¹

5.3.2. Composición y propiedades de la ceniza volante:

Aparentemente existen diferencias considerables en la composición química de la ceniza volante, pero de menor importancia si es comparada con la composición mineralógica y la granulometría (tamaño y forma de la partícula) la cuales determinan la influencia de la ceniza volante en las propiedades del concreto.

Las cenizas en general son granos finos compuestos básicamente por silicatos, aluminios, cal libre y algunos óxidos que permiten una reacción puzolánica con el suelo que al igual que otras sustancias reduce el índice de expansión.

La norma ASTM C-618-12a menciona unos parámetros de composición química de la ceniza volante para lograr su clasificación. Los requerimientos se presentan en la tabla 7.

³¹ SANTAELLA Valencia Luz Elena. Caracterización, física, química y mineralógica de las cenizas volantes,(2001) Universidad Militar Nueva Granada Ciencia e Ingeniería Neogranadina ISSN: 0124-8170 .

Tabla 6 Composición de la Ceniza Volante N,F,C en porcentaje

	CLASE		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO ₂) +óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)+óxido de fierro (Fe ₂ O ₃), min%	70.0	70.0	50.0
Trióxido de azufre (SO ₃), máx. %	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad, máx. %	3.0	3.0	3.0
Perdida por calcinación, máx. %	10.0	6.0A	6.0
Oxido de magnesio (MgO), máx. %	5	5	5

Fuente: Norma ASTM C-618-12a

La ceniza volante presenta unas características físicas que pueden ser observadas a simple vista y otras químicas que se establecen según las características y constituyentes del carbón quemado en las centrales térmicas, y también teniendo en cuenta el método como se ha obtenido que puede ser mecánico (en los molinos), térmico (en las calderas) y eléctrico (en los precipitados electrostáticos). Alguna de sus propiedades son³²:

Color: Color natural gris. Y según la fuente productora, varía desde un gris claro hasta el negro.

Propiedad Puzolánica: Indica granulometría, fineza y forma de la partícula.

Densidad: en las cenizas volantes es una propiedad con un nivel de variación tanto alto como la distribución del de las partículas o la perdida por ignición.

Los minerales más importantes encontrados en las cenizas volantes como inclusiones dentro de la fase vítrea o depositados en la superficie de las

³². SANTAELLA Valencia Luz Elena. Caracterización, física, química y mineralógica de las cenizas volantes,(2001) Universidad Militar Nueva Granada Ciencia e Ingeniería Neogranadina ISSN: 0124-8170 .Pag.54.

partículas son los siguientes: mullita, magnetita, sílice, hematites, aluminatos cálcicos, anhidrita y oxido de calcio libre.

La composición de cada una de las clases de ceniza y el porcentaje de carbón encontrado en estas depende del proceso que se realice en cada una de las plantas de la termoeléctrica.

De acuerdo con M.C. Alonso et al. (1995) las cenizas volantes presentan las siguientes propiedades:

- Capacidad reactiva, lo que las hace aptas para múltiples aplicaciones. Otra de sus propiedades es la puzolánica e hidráulica, aunque se necesita de un período más o menos largo de tiempo para que se manifieste su reactividad puzolánica.
- Las cenizas volantes aumentan la trabajabilidad del material en estado plástico, debido a un aumento en la dispersión de las partículas del sistema.
- Las cenizas volantes en los morteros disminuyen las expansiones asociadas a la reacción árido-álcalis, disminuyendo la pérdida por durabilidad.
- El contenido de agua libre (que no reacciona con el cemento) es mayor en presencia de cenizas volantes a primeras edades, y por lo tanto la porosidad del sistema también será mayor. Sin embargo, dado que las cenizas volantes aumentan la trabajabilidad, es posible reducir la relación agua / cemento, contrarrestando la mayor porosidad.
- Las resistencias mecánicas al utilizar cenizas volantes serán menores en las primeras edades, comparadas con las alcanzadas en cementos Portland. Las cenizas actúan como un diluyente inerte, durante el tiempo de incubación de la reacción puzolánica. A edades largas se

produce un refinamiento de la estructura porosa debido a la evolución de la actividad puzolánica.

- Las cenizas volantes reducen el calor de hidratación en el cemento debido al menor contenido de alita (C3S) procedente del clínker Portland. Este compuesto es el responsable en su mayor parte del calor desprendido durante la hidratación del cemento Portland. La reacción puzolánica también es exotérmica, pero su desprendimiento es progresivo en el tiempo.
- Las cenizas volantes incorporadas al cemento mejoran su durabilidad en determinados ambientes sulfatados y de agua de mar. Esto se debe a una mayor impermeabilidad y a la reducción en el contenido de portlandita (SC3). Esto último, inhibe la formación de etringita expansiva. El aumento en la impermeabilidad se debe a que los productos formados durante la actividad puzolánica se depositan en el interior de los poros capilares interconectados, dificultando la penetración de los iones sulfato y cloruro.

5.3.3. Clasificación de la ceniza volante:

La norma ASTM C-618-12a³³ divide en tres los tipos de ceniza volante como: ceniza clase N, ceniza clase F y ceniza clase C.

5.3.3.1. Ceniza clase N:

Puzolanas naturales calcinadas o sin calcinar, como algunas tierras diatomáceas; horstenos opalinos y pizarras; tobas y cenizas volcánicas o pumíticas, calcinadas 10 o sin calcinar; y materiales varios que requieren de

³³ ASTM C 618. Especificación estándar para las cenizas volantes de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso como un aditivo mineral en concreto. ASTM C 618-2001. En: Libro Anual de las normas ASTM, vol. 04,02; 2.001

calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y pizarras.

5.3.3.2. Ceniza clase F:

Ceniza volante normalmente producida de la calcinación del carbón antracítico o bituminoso. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas. Reaccionan lentamente con la cal y los álcalis.

5.3.3.3. Ceniza clase C:

Ceniza volante normalmente producida de la calcinación del carbón sub bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza volante además de tener propiedades puzolánicas tiene propiedades cementicias.

5.3.4. Usos:

Este subproducto, es usado para elaborar vidrio, cerámica y concreto. En el concreto, la ceniza volante puede cumplir tres papeles: 1) adición activa incorporada directamente en la mezcladora; 2) adición inerte, como elemento sustituyente o complementario de las fracciones finas de los arados; 3) en la preparación de cementos molida conjuntamente con el clinker³⁴

Son muchos los usos que a través de investigaciones se le han atribuido con el fin de aprovechar al máximo estos residuos para que no se conviertan en desechos contaminantes de la naturaleza. Es utilizado para la fabricación de vidrios, cerámica y elaboración de hormigones. Pero es utilizada para mezclar

³⁴ RAMÍREZ Alonso, J.L.; Orígenes, tipos y caracterización de las cenizas volantes, MOPU-CEDEX, Cuaderno de investigación C27, Madrid 1990

con arcilla en el momento que se esté trabajando en la capa subrasante y “evaluar el análisis del drenaje en el diseño de pavimentos, con el objeto de eliminar la posibilidad de la reducción de la vida útil de pavimento por el efecto que produce el agua al presentarse dentro del paquete estructural; en todos y cada uno de los casos en que se prevean problemas de humedad deberán diseñarse estructuras de drenaje tales como: bases drenantes, drenajes colectores del agua (cunetas), filtros laterales de transición elaborados con materiales granulares ó geotextiles (Subdrenajes).”³⁵

En la práctica podemos tener en cuenta que la “Concentración de 25% de cenizas en el suelo puede resultar muy beneficiosa, afectando la granulometría, floculando los porcentajes de arcillas del suelo y reduciendo el límite líquido y el índice plástico del suelo. Las reacciones puzolánicas permiten incrementar la capacidad de soporte de la sub-rasante y con ello mejorar las estructuras viales en carreteras.”

Muchos investigadores han estudiado el mecanismo que contribuye al proceso de estabilización de suelos tratados con cenizas volantes. Según Acosta et al. (2003) existen tres mecanismos principales contribuyendo a la estabilización. El primero es que la resistencia del suelo aumenta como resultado de la cementación producida a partir de la hidratación de aluminato tricíclico presentes en las cenizas volantes. Otro mecanismo es que la cal libre (CaO) en las cenizas volantes reacciona con los minerales de arcilla, causando compresión de la capa de absorción y la reducción en la plasticidad. Finalmente, la cal libre que no hace reaccionar con los minerales de arcilla se

³⁵ Pavimentos, (2011) Características Suelos subrasante. Drenaje en pavimentos .Abril de 2013 .tomado de : <http://libro-pavimentos.blogspot.com.co/2013/04/drenaje-en-pavimentos.html> .Universidad en Línea.

encuentra disponible para el proceso de cementación adicional a través de la reacción puzolánica con los compuestos de sílice y alúmina”.³⁶

Según lo refiere Camacho Tauta³⁷ una concentración del 25% de cenizas en el suelo puede resultar muy beneficiosa, afectando la granulometría, floculando los porcentajes de arcillas del suelo y reduciendo el límite líquido y el índice plástico del suelo. Las reacciones puzolánicas permiten incrementar la capacidad de soporte de la subrasante y con ello mejorar las estructuras viales.

5.4. COEFICIENTE CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO)

El CBR de un suelo es la relación en porcentaje (%) entre el esfuerzo necesario para penetrar un pistón de dimensiones dadas a una velocidad prefijada hasta una profundidad determinada en la muestra del suelo analizado, y la presión correspondiente para la misma penetración en una muestra patrón con características ideales. El CBR o valor soporte relativo de los suelos establece, en forma indirecta, una medida de resistencia al corte.³⁸

Este ensayo es entonces una medida de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante bajo condiciones de humedad y densidad controladas, que tiene aplicación en el diseño y en la evaluación de pavimentos asfálticos. El soporte de la subrasante se puede expresar, también, en términos del módulo de reacción, obtenido a través de pruebas de placa directa. Este módulo se usa en el diseño de pavimentos rígidos. La respuesta del soporte se puede

³⁶ PÉREZ Collantes Rocio del Carmen, 2012. Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos, pág. 35

³⁷ CAMACHO Tauta Javier Fernando y otros. Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas. Ciencia e ingeniería neogranadina. Vol 16 No 2 Diciembre de 2006 Universidad Militar Nueva Granada .Pag 48

³⁸ Notas de pavimentos .Ingeniería del transporte.UBA Universidad de Buenos Aires –Argentina 2007.material educativo .Power point. Pag 14.Tomado de <http://materias.fi.uba.ar/6807/contenidos/Notas%20Pavimentos.pdf>

caracterizar también en términos de parámetros elásticos (módulo resiliente y relación de Poisson), los cuales se aplican en los procedimientos empírico mecánicos de diseño de pavimentos asfálticos.³⁹

El CBR entonces se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{CBR} = \frac{\text{esfuerzo en el suelo ensayado (penetración X)}}{\text{esfuerzo en el suelo patrón (penetración X)}} \times 100$$

³⁹ SANCHEZ Sandoval Fernando MODULO 6.Evaluación de la subrasante. Escuela de ingenieros. Material educativo. Power Point. http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%206.pdf

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

La caracterización de este estudio está enfocada en la parte cuantitativa y tiene como prioridad la utilización numérica, además de herramientas estadísticas que pueden refutar o afirmar las hipótesis de la investigación, además de ello, lo anterior puede ser utilizado para encaminar los resultados generales a unos más concretos. Con base a lo anterior se tiene una investigación con resultados obtenidos en campo y principalmente en laboratorio que se relacionan para el análisis de datos.

6.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.

Esta es una investigación de diseño experimental descriptivo de el “todo” que se trabaja, en este caso ese todo es la sub-rasante, y relacionarlo con una variable como las cenizas volantes para poder medir experimentalmente el mejoramiento del comportamiento. Para ello se apoya en conocimientos científicos e ingenieriles ya establecidos por la humanidad y el desarrollo intelectual, que nos dan las herramientas para un análisis cuantitativo.

6.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN

Comprenden las actividades o procedimientos de excavación, perforación, penetración y toma de muestras, con los que se obtiene una información directa de la estratigrafía y de las condiciones del suelo. Incluyen:

- **Excavaciones abiertas:** De acuerdo a lo anterior, las técnicas de recolección se realizaron por medio de maquinaria, puesto que las muestras se tomaron de una obra que estaba ubicada en la sabana de

Bogotá, para ser más exactos quedaba entre la salida por la Av. Medellín y Cota, allí había presencia de una pajarita, la cual sirvió para hacer una excavación de aproximadamente 1.5 metros de profundidad como se muestra en la siguiente ilustración

Ilustración 1 Excavación para obtener muestra de suelo fino.



Fuente: Autores, 2016.

- **Muestreos:** posteriormente se procedió a moldear la muestra con una barra para así obtener una muestra inalterada la cual fue tomada con dos moldes de CBR, seguidamente estas se envolvieron en papel vinipel y papel aluminio, esto se hizo para conservar sus condiciones naturales al ser transportada hasta el laboratorio; de esta misma excavación también se tomaron aproximadamente unos 120 kilogramos de muestra alterada la cual fue transportada en sacos hasta el laboratorio donde se le realizaron los respectivos ensayos para el desarrollo de este proyecto

6.4. FASES DE INVESTIGACIÓN

Tabla 7 Fases de la investigación

FASE	ACCIONES
<p>Caracterizar el material Arcilla expansiva de acuerdo a normas invias aplicables.</p>	<p>Esta caracterización del terreno natural se hará por medio de las especificaciones de las siguiente normas</p> <p>I.N.V. E – 101 – 14</p> <p>I.N.V. E – 125 – 14</p> <p>I.N.V. E – 132 – 14</p> <p>I.N.V. E – 124 – 14</p> <p>I.N.V. E – 126 – 14</p> <p>I.N.V. E – 148 – 14</p> <p>I.N.V. E – 157 – 14</p>
<p>Caracterizar la ceniza volante, según metodologías vigentes y aplicables de reconocida aceptación.</p>	<p>La caracterización de la ceniza volante para este estudio será regida por las siguientes normas</p> <p>I.N.V. E – 126 – 14</p> <p>I.N.V. E – 124 – 14</p> <p>I.N.V. E – 125 – 14</p> <p>I.N.V. E – 157 – 14</p>
<p>Caracterizar la mezcla arcilla expansiva-ceniza volante en proporciones de 30, 35 y 40%.</p>	<p>Se harán la mezclas respectivamente</p> <ul style="list-style-type: none"> • 10% ceniza y 90% arcilla • 25% ceniza y 75% arcilla • 50 %ceniza y 50% arcilla <p>A estas se les realizaran ensayos según las siguientes normativas</p> <p>I.N.V. E – 101 – 14</p> <p>I.N.V. E – 125 – 14</p>

FASE	ACCIONES
	I.N.V. E – 132 – 14
	I.N.V. E – 124 – 14
	I.N.V. E – 126 – 14
	I.N.V. E – 148 – 14
	I.N.V. E – 157 – 14
Evaluar el potencial de la capacidad de soporte de una sub-rasante.	La práctica de este ensayo éste regida por la norma I.N.V. E – 148 – 14

Fuente: Autores, 2016.

7. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a los ensayos de laboratorio, que se le realizaron a muestras de suelo fino tomado de la sabana de Bogotá y de ceniza volante obtenida de la termoeléctrica Termozipa. Estos resultados se presentaran en el siguiente orden: caracterización del suelo natural, características de la ceniza volante y comparaciones de los resultados de las mezclas con el suelo natural fino.

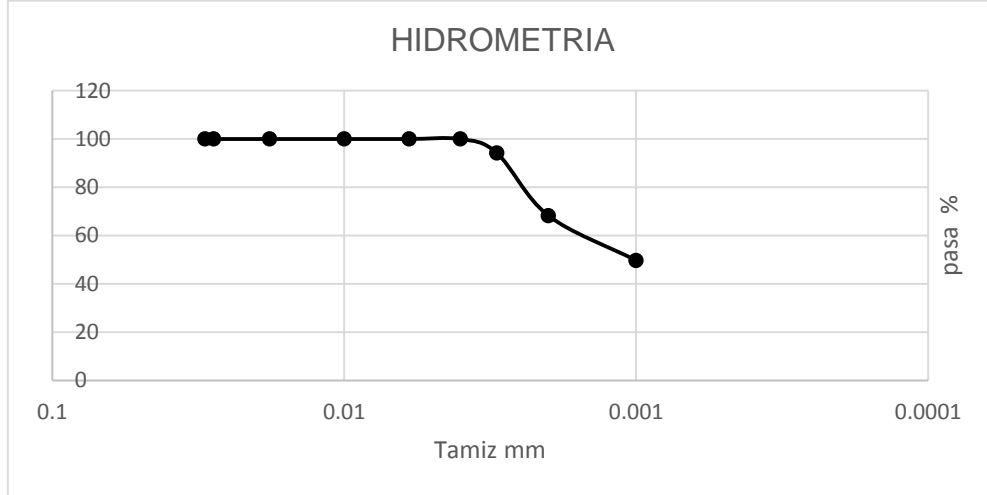
7.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO NATURAL

7.1.1. Distribución granulométrica. Los análisis granulométricos se realizaron de acuerdo a la Norma INVIAS 124-14⁴⁰, el ensayo de laboratorio se realiza por medio del hidrómetro, en la gráfica 5 se muestra la curva granulométrica correspondiente al suelo natural.

Se evidencia que el material es completamente fino, puesto que la totalidad de la muestra tiene sus partículas de un tamaño menor a 0,01 milímetros; el ensayo hidrométrico también muestra en la gráfica de derecha a izquierda que por lo menos la mitad del material que pasa es menor de 0.004, donde es clasificado como un tipo de suelo predominantemente arcilloso, y al avanzar la curva en el mismo sentido se encuentra que el cien por ciento de la muestra restante es menor al 0.03, esto decir que parte de suelo restante es un limo.

⁴⁰ Norma INV E-124-14 .Análisis granulométrico por medio de higrómetro

Grafico 5 Análisis granulométrico del suelo natural por medio de hidrómetro.



Fuente: Autores, 2016.

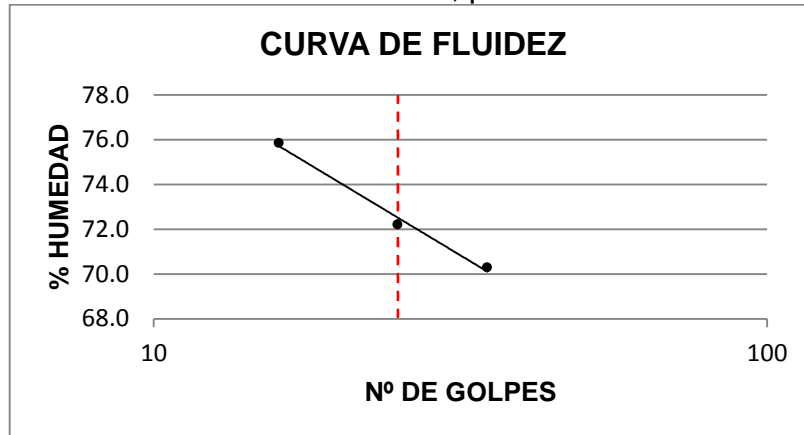
7.1.2. Límites de attemberg: El limite líquido (LL), limite plástico (LP), índice de plasticidad (IP) y límite de contracción se determinaron de acuerdo a las normas INVIAS 125-14⁴¹, 126-14⁴² y 127-14⁴³ respectivamente. Con base a los resultados anteriores, se puede observar en la gráfica 6 que el imite liquido es elevado, puesto que a los 25 golpes tiene un valor de 72,88 lo indica que se necesita ese contenido de agua en porcentaje para que el material pase a una fase liquida, además también se puede evidenciar en la tabla 9 que el material es de alta plasticidad, por ende se puede decir que para el suelo pase de un estado semisólido a liquido se requiere agregar gran cantidad de agua.

⁴¹ Norma INV E-125-14 .Determinación del límite líquido.

⁴² Norma INV E-126-14 .Limite plástico e índice de plasticidad de suelos.

⁴³ Norma INV E-127-14 .Determinación de los factores de contracción de los suelos.

Grafico 6 Curva de fluidez, para el suelo natural



Fuente: autores, 2016.

Tabla 8 Análisis limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad

LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLÁSTICO			
	1	2	3		1	2
Nº GOLPES	35	25	16	RECIPIENTE Nº	107	80
RECIPIENTE Nº	110	15	26	M ₁ (g)	27,01	22,88
M ₁ (g)	36,26	34,46	31,88	M ₂ (g)	23,45	19,0
M ₂ (g)	28,05	24,51	22,55	M ₃ (g)	16,14	11,1
M ₃ (g)	16,37	10,73	10,25	%w	48,7	49,1
%w	70,3	72,2	75,9	% w PROMEDIO	48,9	

LIMITE LIQUIDO %	72,88
LIMITE PLASTICO %	48,9
INDICE DE PLASTICIDAD %	24,0

INDICE DE LIQUIDEZ	0,099
INDICE DE CONSISTENCIA	0,901
INDICE DE FLUIDEZ	0,293

Fuente: Ariza Camilo, Rojas Camilo, Romero Yiber 2016

Tabla 9 Límite de contracción del suelo natural

LIMITE DE CONTRACCIÓN (%)	9,5
RELACIÓN DE CONTRACCIÓN	1,796
CAMBIO VOLUMÉTRICO	124,9
CONTRACCIÓN LINEAL	23,7

Fuente: Autores, 2016.

7.1.3. Expansión

Los resultados de la expansión en probeta y CBR que se muestran en las tablas 10 y 11 respectivamente, estos permiten observar cómo actúa el agua en contacto con el suelo estudiado, de donde se puede afirmar que la expansión en probeta (7.14) es igual a la expansión en CBR (7.13) a las 24 horas y aunque no aumenta de forma lineal se deduce un aumento con el tiempo, como lo sugiere el resultado de expansión a las 72 horas; además la expansión en probeta libre muestra un aumento del doble al adicionar ceniza volante

Tabla 10 Expansión libre en probeta para el suelo natural

expansión libre en probeta			
% ceniza	volumen de agua cm ³	volumen de kerossene cm ³	índice de expansión libre %
0	15	14	7,14
30	16	14	14,29
35	16	14	14,29
40	16	14	14,29

Fuente: Autores, 2016.

Tabla 11 Expansión en CBR.

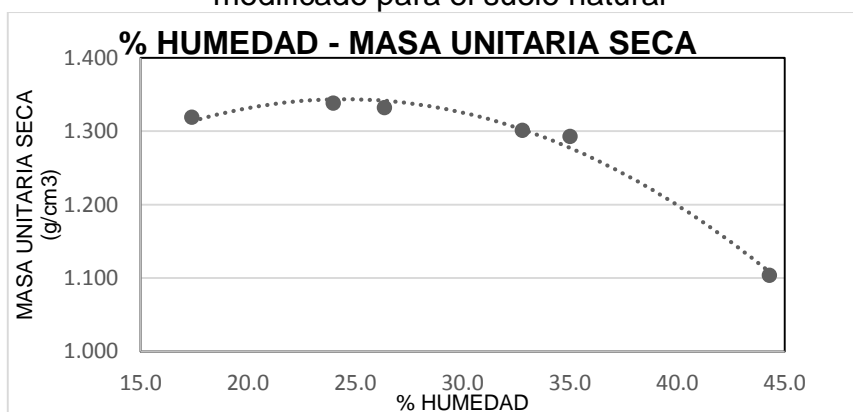
DATOS EXPANSIÓN		mm	% de expansión
LECTURA INICIAL (0,001")	115,4	2,93	13,23
LECTURA FINAL 24 HORAS (0,001")	280,7	7,13	
LECTURA FINAL 48 HORAS (0,001")	534,6	13,58	
LECTURA FINAL 72 HORAS (0,001")	721,7	18,33	

Fuente: Autores, 2016.

7.1.4. Determinación del % óptimo de humedad y la densidad máxima seca – método Harvard miniatura –modificado:

La muestra de suelo natural fue sometida a este ensayo de compactación, para lo cual se amaso, con el fin de asemejar lo que sucede en los suelos finos en una obra vial, encontrándose que cuando la masa unitaria seca es 1.334 (g/cm³) el contenido óptimo de agua es del 24.5%

Grafico 7 Resultados, curva de compactación método de Harvard miniatura modificado para el suelo natural



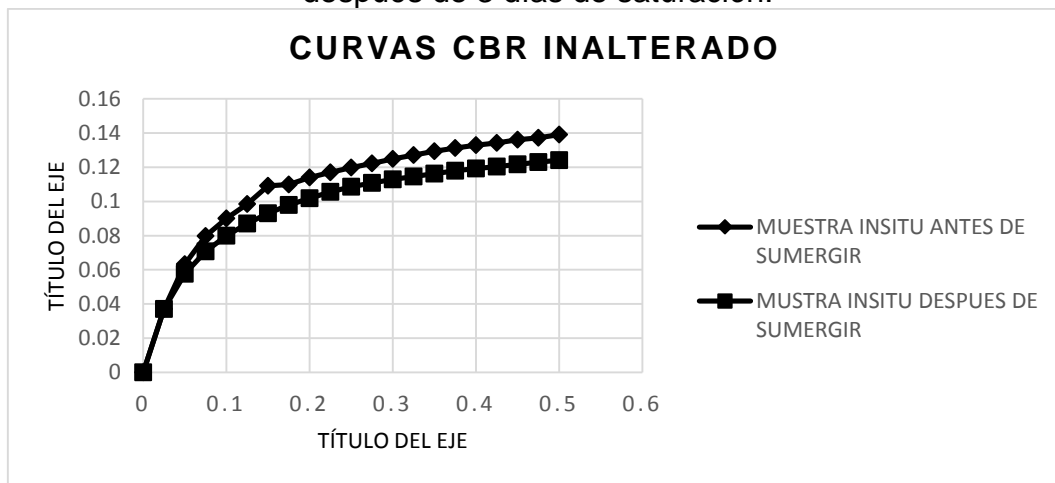
MASA UNITARIA SECA MAXIMA (g/cm³)	1,344
CONTENIDO OPTIMO DE HUMEDAD (%)	24,5

Fuente: Autores, 2016.

7.1.5. Ensayos de CBR

En la gráfica 8 y la tabla 12 se observan los resultados de dos ensayos de CBR realizados en el suelo en estado natural y el suelo después de tres días de saturación, donde se pueden observar los siguientes resultados; cuando el suelo esta inalterado el valor de CBR es bastante bajo y lo mismo sucede cuando se encuentra saturado, lo cual indica que esta muestra es de baja calidad para una subrasante.

Grafico 8 Comparación de resultados de CBR de muestra inalterada, antes y después de 3 días de saturación.



Fuente: Autores, 2016.

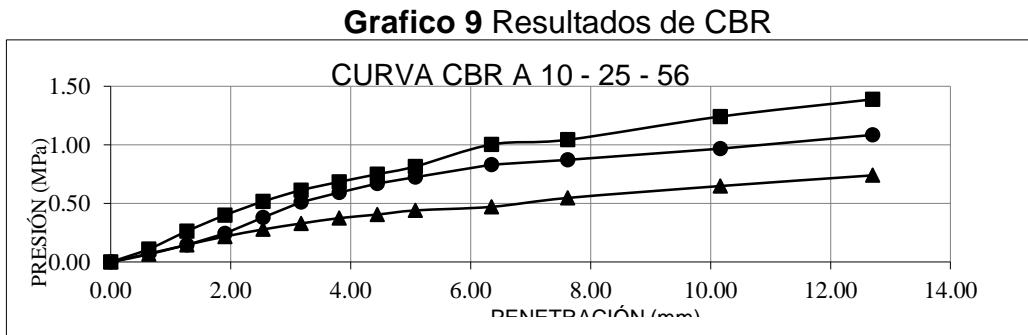
Tabla 12 Resultados de CBR, del suelo natural.

	Estado natural	Después de 3 días de saturación
C.B.R. A 2,54mm (0,100 pulg) (%):	1,31	1,16
C.B.R. A 5,08mm (0,200 pulg) (%):	1,1	0,98

Fuente: autores, 2016.

Estos resultados del Ensayo de CBR se realizaron con base a la curva de compactación que arrojó el ensayo de Harvard Miniatura representado en la

gráfica 10 , en estos resultados se puede evidenciar que el porcentaje de CBR aumenta cuando el suelo se compacta, así mismo sucede con la presión que soporta la muestra de suelo según el número de golpes como se observa en la gráfica 9 , además en la tabla 13 se observan los resultados al 100%, 98% y 95% de la densidad máxima.



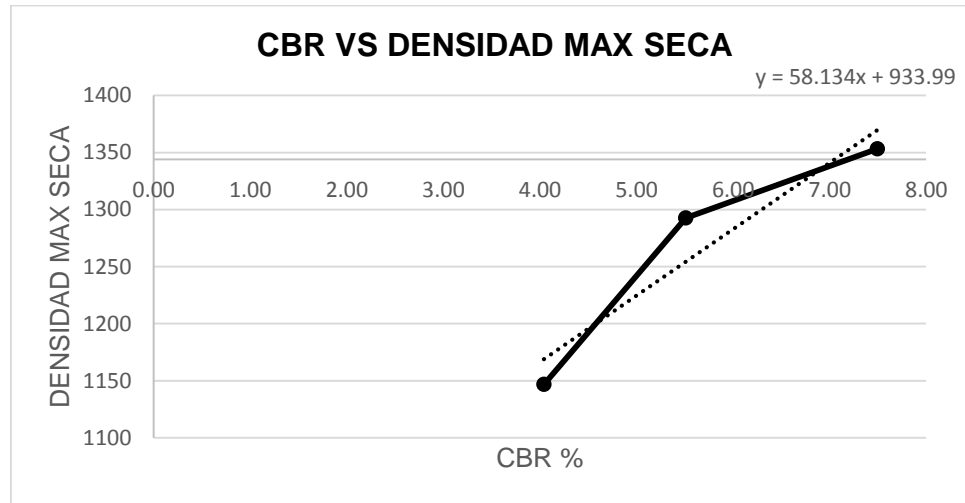
Fuente: autores, 2016

Tabla 13 Resultados de CBR

DESCRIPCIÓN	DENSIDAD (kg/m ³)	CBR (%)
CBR AL 100% DE LA DENSIDAD MÁXIMA	1353	7,9
CBR AL 98% DE LA DENSIDAD MÁXIMA	1326	7,5
CBR AL 95% DE LA DENSIDAD MÁXIMA	1286	6,8
CBR AL % DE LA DENSIDAD MAX DE HARVARD MINIATURA	1344,0	7,05

Fuente: Autores, 2016.

Grafico 10 Valor de CBR para densidad máx. seca del ensayo de Harvard Miniatura.



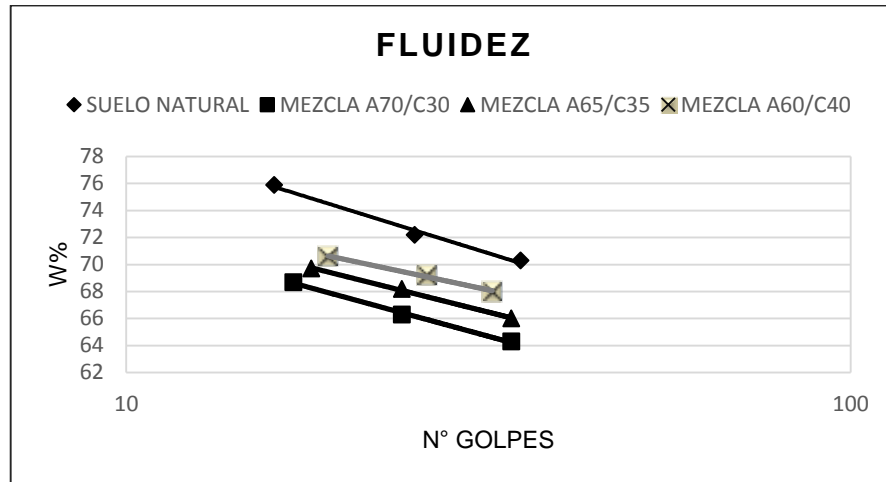
Fuente: Autores, 2016.

7.2. Análisis de resultados de las mezclas de suelo natural y ceniza volante con respecto a los resultados de suelo natural.

7.2.1. Límites de Attemberg:

En los resultados de la tabla 14 y grafica 11 se comparan los valores de límites de consistencia, se puede evidenciar que en el índice de plasticidad hay una disminución en la tres mezclas respecto a los resultados de la muestra de suelo natural, puesto que la mayor disminución es de 6,8 de porcentaje de humedad; lo que quiere decir que a mayor cantidad de ceniza menor será la plasticidad, además se puede observar que el Límite de contracción aumenta, esto es natural ya que la ceniza es un material de poca absorción con poca contracción o expansión.

Grafico 11 Comparación grafica entre los resultados de suelo natural y mezclas de arcilla-ceniza



Fuente: Autores, 2016.

Tabla 14 Resultados de límites de consistencia

Limite liquido	72,88	66,44	68,04	69,42
límite de contracción	9,5	37,59	38,53	39,27
Índice de plasticidad.	24	18	17,8	17,2
% de ceniza	0	30	35	40

Fuente: Autores, 2016.

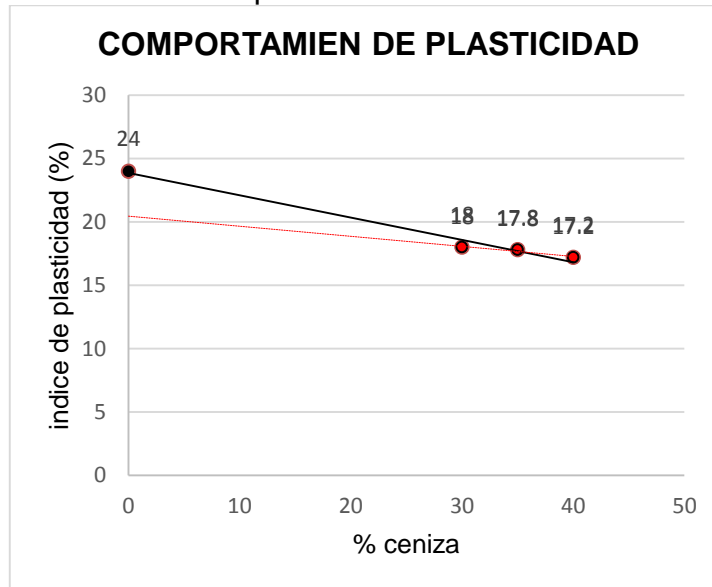
Del índice de plasticidad también se puede asumir un comportamiento lineal del aumento de % de ceniza con respecto a suelo sin ceniza.

También se observa un aumento en el límite de contracción, sin embargo este parece no ser lineal con respecto al suelo sin ceniza ya que el suelo con ceniza y el suelo sin ella están en diferente plano como se observa en el gráfica 12.

En la gráfica 12 la línea roja representa la tendencia de la contracción con el aumento de ceniza tomando en cuenta el comportamiento del suelo sin ceniza, mientras que la línea verde representa el comportamiento del suelo ya con ceniza sin tomar en cuenta el suelo sin ceniza; estos resultados pueden

explicarse de tal forma que las muestras con ceniza tiene la capacidad de absorber una considerable cantidad de agua sin cambiar su volumen, de igual forma cabe mencionar estas muestras no tendrán una variación de contracción por debajo de 37,59% este valor para la muestra de A70/C30.

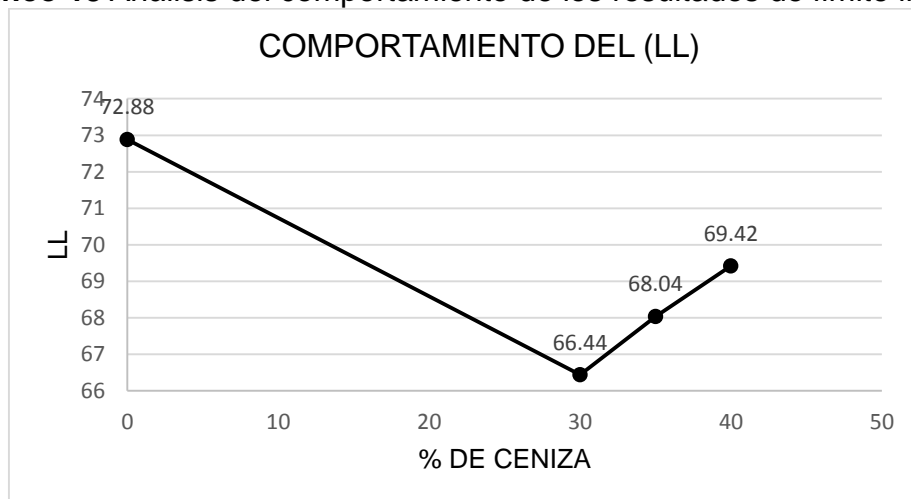
Grafico 12 Análisis del comportamiento de los resultados de Plasticidad



Fuente: Autores, 2016.

Cabe destacar también que en los resultados de límite líquido ocurre que la mezcla de A70/C30 es la que más varía, puesto que en las otras dos muestras de A65/C35 y A60/C40 en límite líquido comienza a aumentar aunque estas no sobrepasan el valor del suelo natural, lo anterior se puede observar con más detalle en el gráfico 13.

Grafico 13 Análisis del comportamiento de los resultados de límite liquido



Fuente: autores, 2016.

En la gráfica 13 se observa que el límite líquido con 0% de ceniza es 73 cuando se adiciona 30% de ceniza disminuye a 66 pero al ir aumentando el porcentaje de ceniza aumenta paulatinamente.

7.2.2. Análisis de compactación Harvard Miniatura modificado: Como se puede observar en el ensayo de compactación Harvard, se obtienen los siguientes resultados para cada uno de los porcentajes 0, 30, 35 y 40% de ceniza mezclada en una arcilla expansiva.

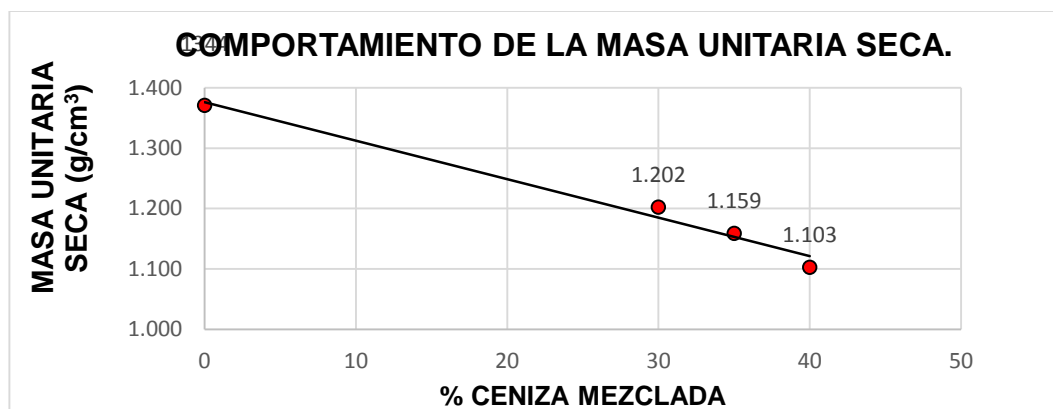
Tabla 15 Resultados de masa unitaria seca máxima y contenido óptimo de humedad.

% ceniza	0	30	35	40
MASA UNITARIA SECA MAXIMA (g/cm³)	1,344	1,202	1,159	1,103
CONTENIDO OPTIMO DE HUMEDAD (%)	26,6	20,8	19,3	19,0

Fuente: Autores, 2016.

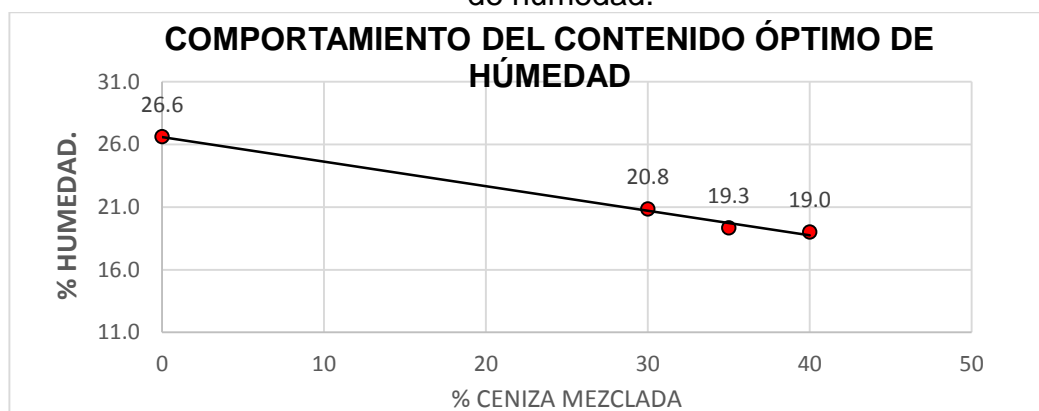
Si se grafican los resultados de la humedad y la masa unitaria del suelo con respecto a la cantidad de ceniza mezclada; se tiene el comportamiento que se muestra en las gráficas 14 y 15 en estas se puede observar claramente un comportamiento lineal con pendiente negativa, lo que indica que entre más porcentaje de ceniza contenga el suelo tanto su masa unitaria seca y el porcentaje óptimo de humedad irán disminuyendo de manera proporcional.

Grafico 14 Resultados graficados del comportamiento de masa unitaria seca.



Fuente: Autores, 2016.

Grafico 15 Resultados graficados del comportamiento del contenido óptimo de humedad.

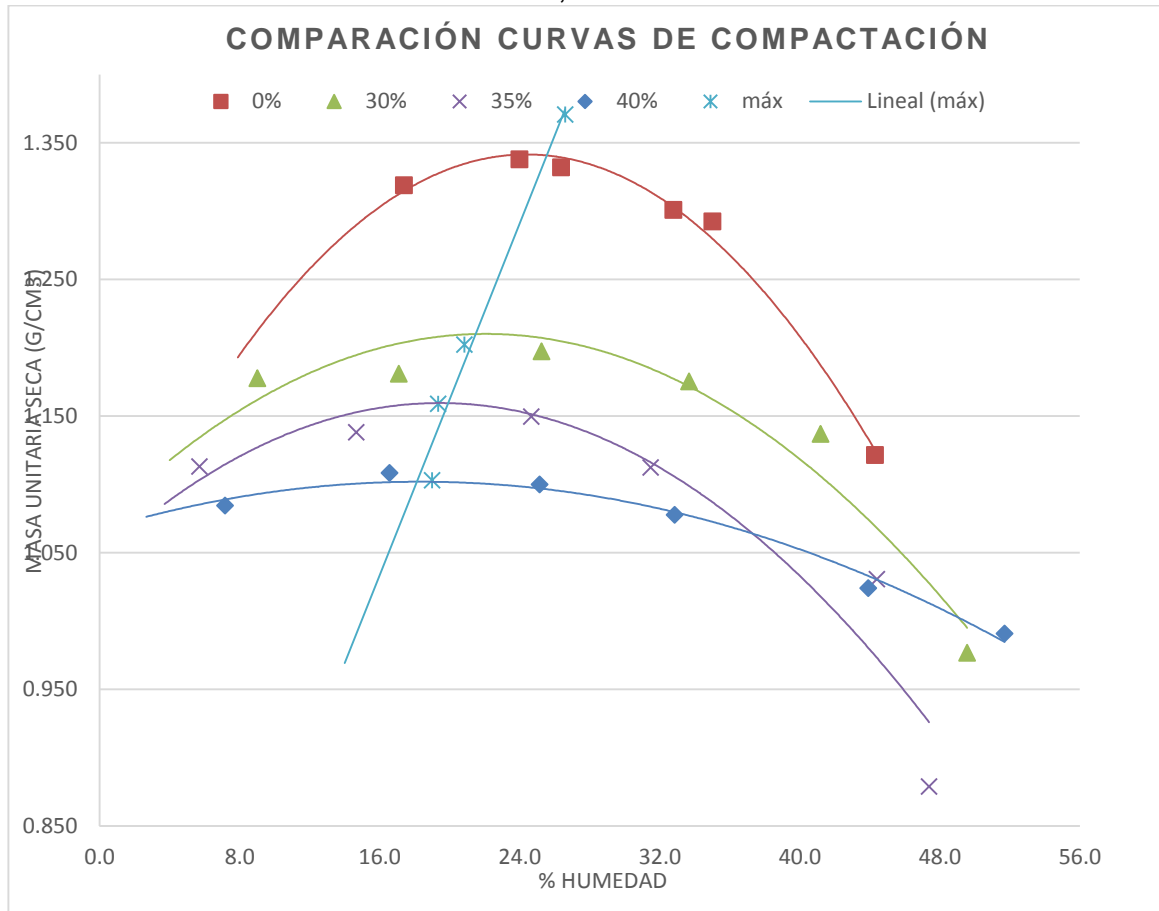


Fuente: Autores, 2016.

Si comparamos las curvas de compactación obtenidas en cada uno de los ensayos Harvard, tendremos la siguiente tendencia mostrada en la gráfica 16.

Se puede observar otra característica que adquiere el suelo cuando se mezcla con ceniza, y es que a medida que aumente el contenido de ceniza, además de disminuir los vértices de cada una de las parábolas y tener tendencias negativas, también se puede observar que a mayor porcentaje de ceniza la parábola es más abierta, lo que es mucho más notorio con el 40% de ceniza, esto indica que hay una variación pequeña de la densidad con el cambio del contenido de humedad.

Grafico 16 Curvas de compactación de suelo natural y mezclas A70/C30, A65/C35, A60/40.



Fuente: Autores, 2016.

7.2.3. Comparación de los resultados de expansión.

En las tabla 17 y en la gráfica 18 ocurre variación en el incremento de la expansión, se puede apreciar que a medida que el porcentaje de ceniza va aumentando la expansión va aumentando, por ende esto es un resultado que afecta negativamente el comportamiento de la muestra de este material fino.

Tabla 16 Resultados de expansión libre en probeta del suelo natural y las mezclas A70/C30, A65/C35 y A60/C40.

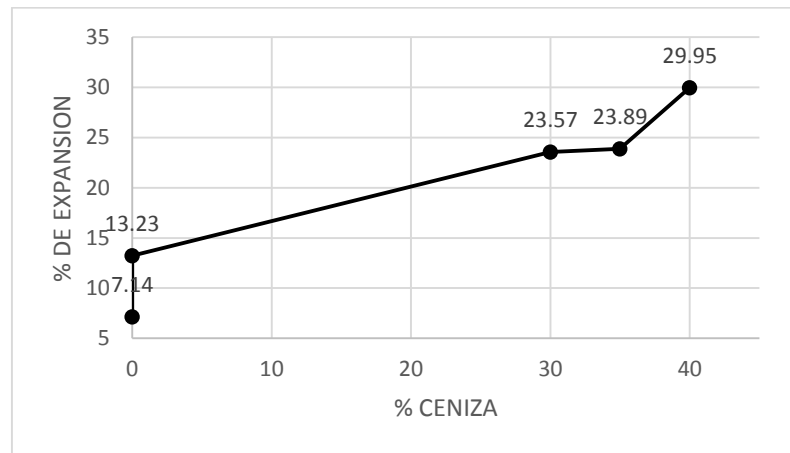
Expansión libre en probeta

% ceniza	volumen de agua cm ³	volumen de kerossene cm ³	índice de expansión libre %
0	15	14	7,14
30	16	14	14,29
35	16	14	14,29
40	16	14	14,29

Fuente: Autores, 2016.

En las tabla 16 y en la gráfica 17 ocurre variación en el incremento de la expansión, se puede apreciar que a medida que el porcentaje de ceniza va aumentando la expansión va aumentando, por ende esto es un resultado que afecta negativamente el comportamiento de la muestra de este material fino.

Gráfico 17 Comportamiento de expansión en ensayos de CBR.



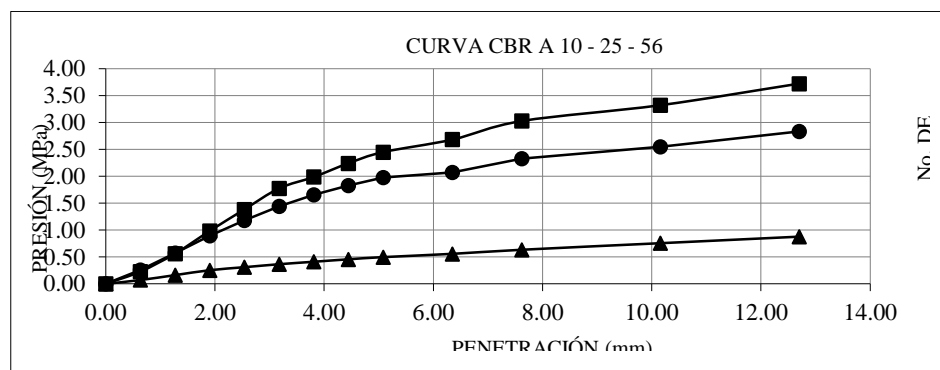
Fuente: Autores, 2016.

7.2.4. Resultados de CBR

La grafica 19 expresa el crecimiento del CBR cuando crece la densidad máxima seca, aunque sucede de esta forma no se puede afirmar que sea

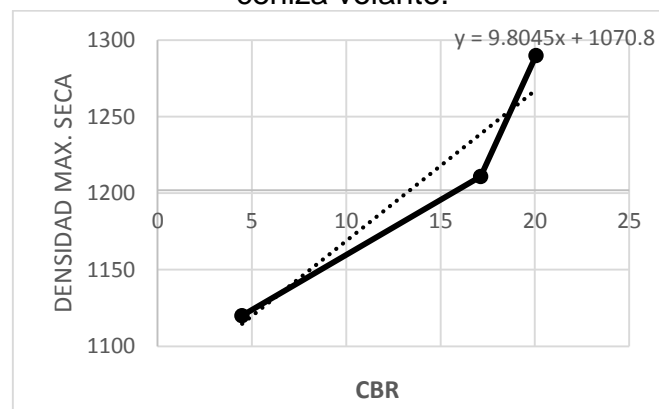
directamente proporcional, porque sus vértice no están tan alineados como lo está la línea de tendencia, además se observa que si damos como guía a la línea de tendencia esta corta la abscisa en 13.38 que representa el valor de Harvard miniatura, también se puede apreciar que hay un aumento considerable respecto al suelo sin adición de ceniza este es incremento es de 19,4%, se puede decir que este cambio es considerable y le aportaría una característica de calidad en su resistencia ,lo anterior se observa en la tabla 17. En la gráfica 18 se observa el comportamiento de la presión según el número de golpes realizados a cada espécimen.

Gráfico 18 Curva de CBR de la mezcla A70/C30.



Fuente: Autores, 2016.

Gráfico 19 Comportamiento de CBR vs densidad máxima seca para 30% de ceniza volante.



Fuente: Autores, 2016.

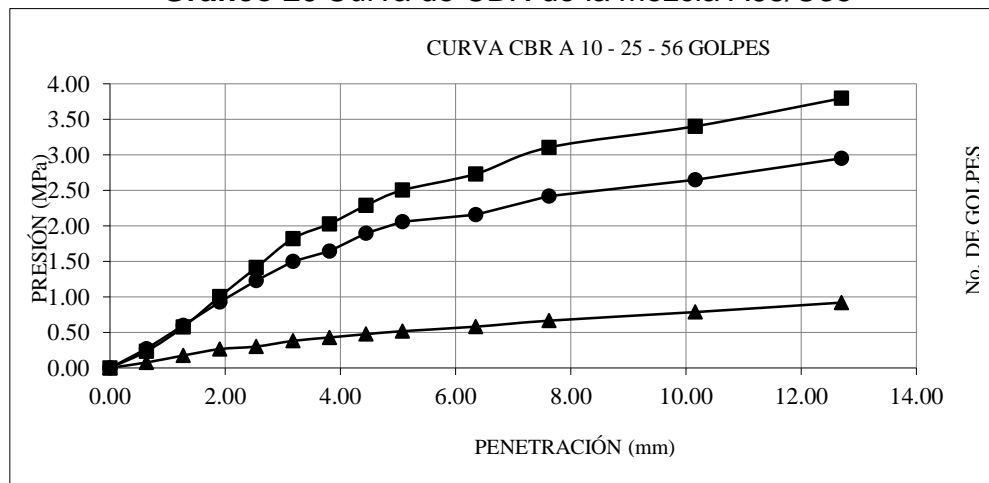
Tabla 17 Resultados de ensayos CBR para 30% de ceniza volante.

	DENSIDAD (kg/m ³)	CBR (%)
CBR al 100% de la densidad maxima proctor modificado	1290	23.7
CBR al 98% de la densidad maxima proctor modificado	1264	22.7
CBR al 95% de la densidad maxima proctor modificado	1225	18.0
CBR al % de la densidad max de harvard miniatura	1202.0	13,38

Fuente: Autores, 2016.

Para la mezcla de A65/C35 (tabla 18) hay un aumento del CBR mínimo respecto a la mezcla de A60/C30 (tabla 17), este es exactamente de 1.1%, además también se aprecia que las densidades secas de 100%, 98% y 95% incrementaron con base a la adición de ceniza. Pero no ocurrió lo mismo con la densidad máxima del ensayo de Harvard miniatura (grafica 16) puesto que este disminuyó en comparación con la mezcla que contiene 30% de ceniza, además dicha densidad no cumple con un valor favorable de CBR ya que este resultado se puede observar en la gráfica 22.

Grafico 20 Curva de CBR de la mezcla A65/C35



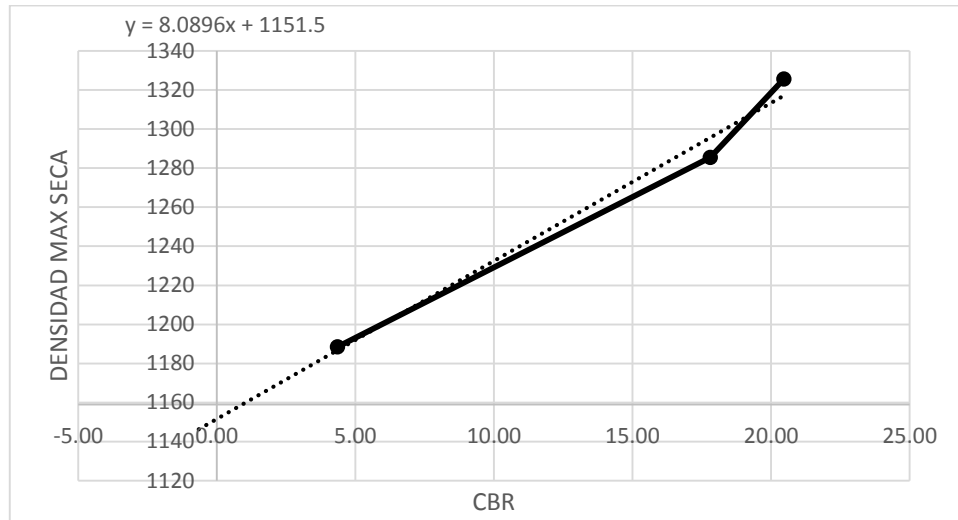
Fuente: Autores, 2016.

Tabla 18 Resultados de ensayos CBR para 35% de ceniza volante

	DENSIDAD (kg/m ³)	CBR (%)
CBR al 100% de la densidad maxima proctor modificado	1326	24,8
CBR al 98% de la densidad maxima proctor modificado	1299	21,0
CBR al 95% de la densidad maxima proctor modificado	1259	15,3
CBR al % de la densidad max de harvard miniatura	1159	0.93

Fuente: Autores, 2016.

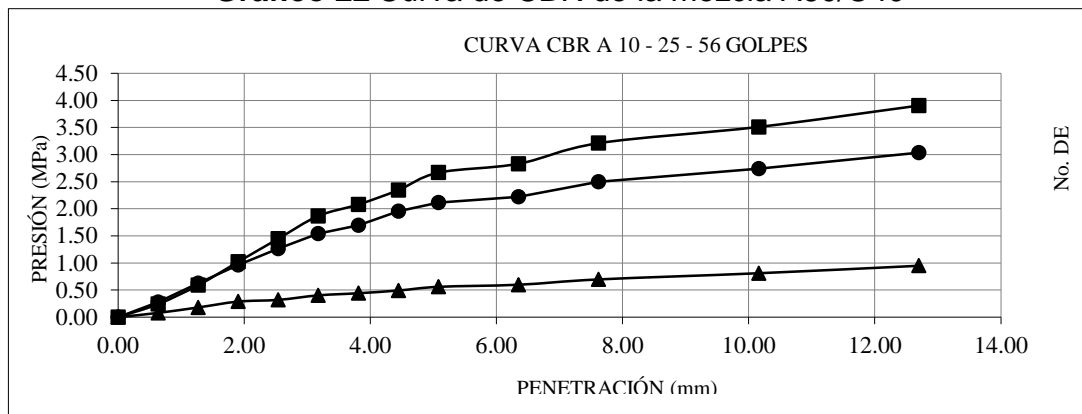
Grafico 21 Comportamiento de CBR vs densidad máxima seca para 35% de ceniza volante.



Fuente: Autores, 2016.

En la tabla 19 se aprecia como el valor de CBR disminuye respecto a las mezclas de A70/C30 y A65/C35 mostradas en las tablas 18 y 19 respectivamente, de igual forma pasa con el valor de la densidad, este decreció tanto que su valor es inferior al de la mezcla de A70/C30, en cuanto al valor CBR con la densidad máxima del ensayo de Harvard miniatura aumenta casi que en un 10% en comparación al de la mezcla de A65/C35. En la gráfica 22 se puede observar el comportamiento de los valores de CBR en cada una de sus fuerzas de compactado 10, 25 y 56 golpes, estos resultados se compararon con el contenido de humedad de la saturación mostrados en la gráfica 24, es decir la cantidad total de agua que contenía al momento de penetrar los especímenes, de lo anterior cabe decir que las variaciones en las muestras no son de gran magnitud y mantienen un comportamiento similar.

Grafico 22 Curva de CBR de la mezcla A60/C40



Fuente: Autores, 2016.

Grafico 23 Comportamiento de CBR vs densidad máxima seca para 40% de ceniza volante.



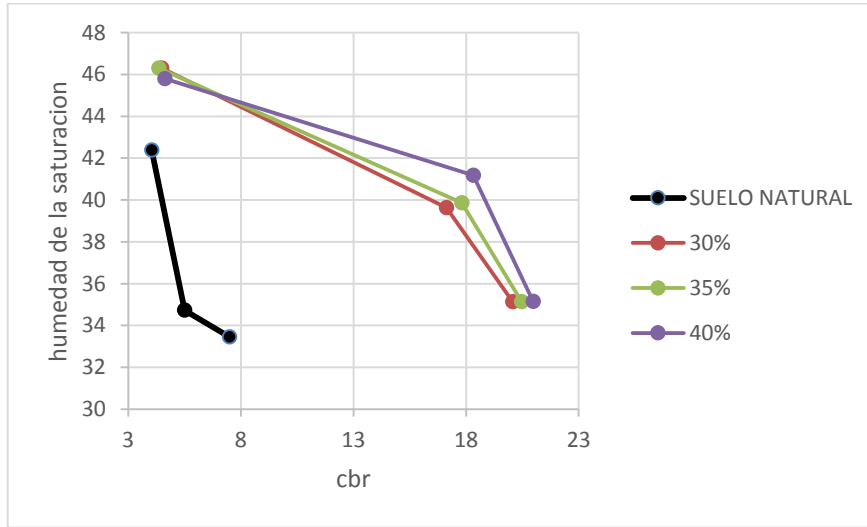
Fuente: Autores, 2016.

Tabla 19 Resultados de ensayos CBR para 40% ceniza volante.

	DENSIDAD (kg/m³)	CBR (%)
CBR al 100% de la densidad maxima	1281	18.4
CBR al 98% de la densidad maxima	1255	14.8
CBR al 95% de la densidad maxima	1217	9.3
'CBR al % de la densidad max de harvard miniatura	1103	10.92

Fuente: Autores, 2016.

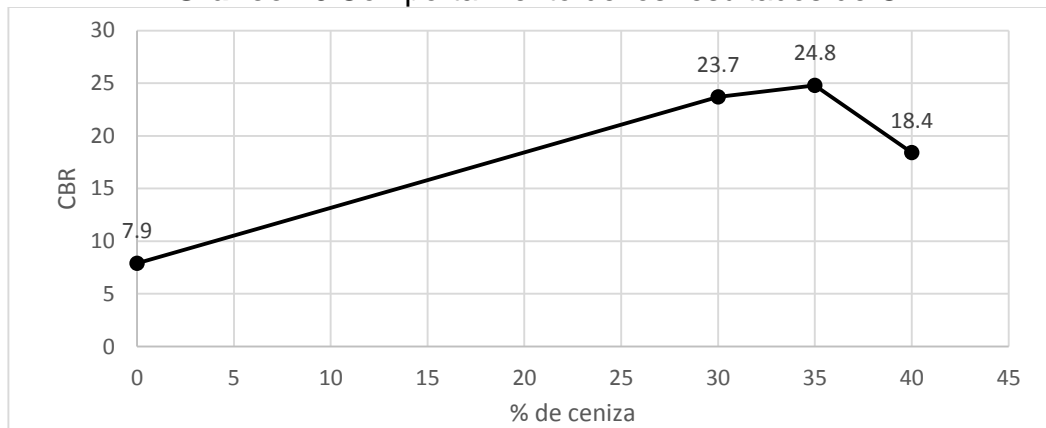
Grafico 24 Comportamiento de CBR vs humedad de la saturación para mezclas de ceniza volante



Fuente: autores, 2016.

Según la gráfica 25 se puede analizar que el resultado más destacado ocurre en la adición de 35% de ceniza volante, en relación con el suelo en estado natural aumentando en 16.9, puesto que después de este punto la gráfica muestra un decrecimiento cuando se adiciona 40% de ceniza volante.

Grafico 25 Comportamiento de los resultados de CBR



Fuente: Autores, 2016.

8. CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado se puede concluir que las muestras de suelo tomados tienen un límite líquido elevado, alta plasticidad y son altamente sensibles al cambio de volumen por contracción, además puede decirse que su capacidad de carga es de baja calidad en estado natural, teniendo en cuenta el CBR in situ, aunque tiene un aumento al ser compactado, sin embargo, este valor de capacidad de carga sigue siendo muy bajo pues en la tabla 320.1 de las especificaciones técnicas del IDU tiene como un valor mínimo de 10% de CBR⁴⁴.

Se puede apreciar que al adicionar ceniza a las muestras de suelo muestran cambios positivos, ya que aumentaron los valores de plasticidad representados en el límite líquido, límite plástico y % de expansión, pero muestra resultados negativos, puesto que la expansión aumenta directamente proporcional al adicionar ceniza, lo cual afecta a una estructura vial.

Los resultados de CBR tiene una comportamiento positivo hasta la adición del 35% de ceniza, ya que el valor del 40% de adición de ceniza, su valor de CBR vuelve a bajar, cabe mencionar que la variación entre las mezclas es mínima, pero en comparación al suelo natural si tiene una considerable proporción, esto también sucedió en los resultados obtenidos por investigadores de Perú

⁴⁴ INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO, Especificaciones técnicas de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y espacio público en Bogotá. Resolución 4880 del 5 de dic de 2011. [en línea] Colombia [citado: 30 nov 2016] disponible en: <https://www.idu.gov.co/documents/629245/736522/320-11.pdf/e78e83d9-7f4e-4a48-8096-74b8fe322bda>

⁴⁵ en donde trabajaron hasta el 20% en adición de ceniza obteniendo resultados positivos en los dos casos.

Haciendo un balance general de resultados las cenizas volantes provenientes de la termoeléctrica Termozipa en combinación con estas muestras de suelo fino no tienen un desarrollo uniforme, por lo tanto se puede concluir que lo más recomendado es no usar este material en proporciones de 30%, 35% y 45%, aunque cabe destacar que el porcentaje de 35% fue el que tuvo un mejor desarrollo además hay que tener en cuenta que a las muestras de ceniza y arcilla no se le realizaron ensayos mineralógicos, por ende tampoco hay un análisis detallado del comportamiento físico y mecánico de las mezclas realizadas.

Atendiendo a la investigación realizada por Quintero “Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización”⁴⁶ una de las conclusiones obtenidas es que dependiendo de la composición mineral así mismo es su comportamiento al adicionarles ceniza; comparando los resultados obtenidos por ellos y los de la presente investigación se evidenciaron resultados positivos en los ensayos de límites de Atterberg.

En la investigación de Lima Peru⁴⁷ los resultados fueron diferentes a los obtenidos con las muestras trabajadas en esta investigación ya que a ellos la

⁴⁵ PÉREZ Collantes Rocio del Carmen, 2012. Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos,

⁴⁶QUINTERO Lemus Leidy y Gallardo Amaya Romel Jesús Gallardo . Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Grupo de Investigación en Geotecnia y Medio Ambiente GIGMA. INGENIO UFPSO – Vol. 08 – Ene-Dic 2015 - p-ISSN 2011-642X e-ISSN 2389-864X.Pag. 89

⁴⁷ PÉREZ Collantes Rocio del Carmen, 2012. Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos,

expansión disminuyo al adicionar la ceniza lo cual es positivo mientras que en el presente trabajo la expansión aumento.

9. RECOMENDACIONES

Es recomendable tener en cuenta ensayos de caracterización para cenizas volantes, tales como difracción de rayos x, composición mineralógica, niveles de materia orgánica, gravedad específica, análisis granulométrico, entre otros aplicables, para así establecer con más certeza los fenómenos de cambios que este material le ejerce al suelo en estudio

Se recomienda que si se van a obtener curvas de compactación por amasado, el procedimiento a la hora de compactar los especímenes de CBR también se ejecuten con técnicas de la misma característica, es decir que si se utiliza Harvard miniatura modificado para obtener curvas de compactación se debería usar compactación giratoria o Harvard normal para compactar las muestras en los ensayos de CBR y no usar el método convencional de proctor modificado.

Si se quiere utilizar mezclas con los porcentajes utilizados en esta investigación se sugiere que se tengan en cuenta otros ensayos de laboratorio de expansión tales como expansión en el aparato de lambe y potencial de expansión en consolidometro para con esto hacer un comparativo con expansión que se obtiene de los ensayos de CBR y expansión libre en probeta.

No sería recomendable utilizar en obra una mezcla de ceniza con porcentaje mayor a 35 %, ya que por viabilidad del transporte y costos en general, no se llegaría a una optimización financiera de cualquier proyecto de vías en general y además la cantidad de volumen a llevar sería impráctico por la difícil trabajabilidad.

10 BIBLIOGRAFIA

ASTM C 618. Especificación estándar para las cenizas volantes de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso como un aditivo mineral en concreto. ASTM C 618-2001. En: Libro Anual de las normas ASTM, vol. 04,02; 2.001

BARBERO José A. La Infraestructura en el Desarrollo Integral de América Latina. Diagnóstico estratégico y propuesta para una agenda prioritaria. Ideal .2011. XXI Cumbre Iberoamericana de Jefes de Estado y de Gobierno celebrada en Asunción, Paraguay. Recuperado en Diciembre 5 de 2016 de <http://www19.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2012/09525.pdf>

BLANCO Prada Henry. Glosario de terminos de Ingenieria civil.

CAMACHO Javier, Oscar Reyes, Catalina Mayorga, Dolly Méndez. Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas. 2006. Vol 16 pag. 51

CAMACHO Tauta Javier Fernando y otros. Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas. Ciencia e ingeniería neogranadina. Vol 16 No 2 Diciembre de 2006 Universidad Militar Nueva Granada .Pag 48

CHICANGANA Germán y otros 2015. "La amenaza sísmica de la Sabana de Bogotá frente a un sismo de magnitud $M > 7.0$, cuyo origen esté en el Piedemonte Llanero". Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 24 (2): 73-91. DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50207

Construide (Mensaje de blog). (19 septiembre 2016). Que son las arcillas expansivas?. Recuperado de <http://construide.blogspot.com.co/>

CRIADO, Maria . Corrosión de armaduras en nuevos materiales cementantes basados en cenizas volantes, España, 2012. [En Línea] Consultado el 12 de septiembre de 2016. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=SqIUAgdEYho&nohtml5=False>

Encolombia. Situación geográfica de Colombia. <https://encolombia.com/educación-ultura/geografia/situacion-geografica-Colombiana/#sthash.nMAI5tHD.dpuf>
http://www.academia.edu/7799970/GLOSARIO_DE_TERMINOS_Ingenier%C3%ADa_civil

HUANCA Anampa, Abraham Segundo laboratorio: exploraciones geotécnicas. Mecánica de suelos aplicada a cimentaciones .Departamento académico de mecánica de suelos. Facultad de ingeniería civil Universidad Nacional de Peru,

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO, Especificaciones técnicas de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y espacio público en Bogotá. Resolución 4880 del 5 de dic de 2011. [en línea] Colombia [citado: 30 nov 2016] disponible en: <https://www.idu.gov.co/documents/629245/736522/320-11.pdf/e78e83d9-7f4e-4a48-8096-74b8fe322bda>

MONTEJO Fonseca Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Segunda edición. Bogotá D.C. Universidad Católica de Colombia. 2002. ISBN 956-96036-2-9 Consultado en www.litecsa.com.ec 2587713.

Norma INV E-124-14 .Análisis granulométrico por medio de higrómetro

Norma INV-E 125-14 Determinación del límite líquido.

Norma INV E-126-14 .Limite plástico e índice de plasticidad de suelos.

Norma INV E-127-14 .Determinación de los factores de contracción de los suelos.

Notas de pavimentos .Ingenieria del transporte.UBA Universidad de Buenos Aires –Argentina 2007.material educativo .Power point. Pag 14.Tomado de <http://materias.fi.uba.ar/6807/contenidos/Notas%20Pavimentos.pdf>

ORDOÑEZ Ruiz Jorge y otro. Caracterización del subsuelo y análisis de riesgos geotécnicos asociados a las arcillas expansivas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVI (número 3), julio-septiembre 2015: 453-470 ISSN 1405-7743 FI-UNAM (artículo arbitrado). <http://dx.doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.010>

Pavimentos, (2011) Características Suelos subrasante. Drenaje en pavimentos .Abril de 2013 .tomado de : <http://libro-pavimentos.blogspot.com.co/2013/04/drenaje-en-pavimentos.html> .Universidad en Línea.

PÉREZ Collantes Rocio, Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos, Lima – Peru 2012.

QUINTERO Lemus Leidy y Gallardo Amaya Romel Jesús Gallardo . Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Grupo de Investigación en Geotecnia y Medio Ambiente GIGMA. INGENIO UFPSO – Vol. 08 – Ene-Dic 2015 - p-ISSN 2011-642X e-ISSN 2389-864X.Pag. 89

RAMÍREZ Alonso, J.L.; Orígenes, tipos y caracterización de las cenizas volantes, MOPU-CEDEX, Cuaderno de investigación C27, Madrid 1990

RODRÍGUEZ Castiblanco ,Edgar Alexander,. Evaluación del Comportamiento Geomecánico de Arcillas en el Sector de Campoalegre – Ciudad de Barranquilla Evaluación . Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. 2014, pag 26

SANCHEZ ,Fredy, Instrucciones para hacer el ensayo CBR, Venezuela, 2011, [en línea] consultado el 19 de septiembre de 2016. 2012.Tomado de <https://www.youtube.com/watch?v=UVQvm4pUTCM&nohtml5=False>

SANCHEZ Sandoval Fernando MODULO 6.Evaluación de la subrasante. Escuela de ingenieros. Material educativo. Power Point. http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%206.pdf

SANTAELLA Valencia Luz Elena. Caracterización, física, química y mineralógica de las cenizas volantes,(2001) Universidad Militar Nueva Granada Ciencia e Ingeniería Neogranadina ISSN: 0124-8170 .