

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN SUELO BLANDO TÍPICO DE LA
FORMACIÓN SABANA DE BOGOTÁ TRATADO CON UN GEOPOLIMERO DE
BASE ARCILLOSA**

**JUAN CAMILO OSPINA VARGAS
JERSSON ANDRÉS VILLABON MARTÍNEZ**

PROYECTO DE GRADO

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2017-II**

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN SUELO BLANDO TÍPICO DE LA
FORMACIÓN SABANA DE BOGOTÁ TRATADO CON UN GEOPOLIMERO DE
BASE ARCILLOSA**

**JUAN CAMILO OSPINA VARGAS
JERSSON ANDRÉS VILLABON MARTÍNEZ**

PROYECTO DE GRADO

**ING. ANDRÉS LOTERO
ASESOR DISCIPLINAR**

**MAG.SHELLEY VELASQUEZ
ASESOR METODOLÓGICO**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2017-II**

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios primeramente, por la sabiduría, entendimiento y el esfuerzo que sólo vienen del él, en la dirección y realización de este proyecto, y por la personas que en el colocó.

Mis agradecimientos al Ingeniero Andrés Mauricio Lotero por la confianza en este trabajo, por su paciencia en cada momento de dudas, por su valiosa dirección en el transcurso de este proyecto de grado hasta la culminación de la misma.

A la Lic. Shelley Yohanna Velásquez, un especial agradecimiento por su apoyo en la metodología de este proyecto de grado, por su paciencia y apoyo en cada tutoría y acompañamiento hasta la culminación de este proyecto de grado.

A mi compañero Juan Camilo Ospina por el acompañamiento, apoyo y buen trabajo, por su dedicación en cada momento en que nos encontrábamos para ir paso a paso en este proyecto, por su paciencia en momentos de dificultad, por el trabajo en equipo y su buena disposición en cada momento.

Mis agradecimientos a mi Familia, especialmente a mi mamá por su apoyo, comprensión, esfuerzo, y amor para poder llevar a término este trabajo de grado.

A los laboratoristas de la Universidad la Gran Colombia, por su apoyo, ayuda y disponibilidad en la realización de este proyecto de grado.

A cada una de las personas que nos apoyaron y ayudaron en momentos en que lo necesitábamos, especialmente a Cesar Cantor muchas gracias.

Jersson Andres Villabon Martiez

Gracias a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad la Gran Colombia por su apoyo y patrocinio en este proyecto de grado, así como a nuestro profesor Andrés Mauricio Lotero el cual supo encaminar nuestro conocimiento para el desarrollo del mismo.

A la profesora Shelley Velásquez por su apoyo incondicional en cada momento del desarrollo de esta investigación, ya que fue una de las personas que más atenta estuvo a nuestras inquietudes.

Doy gracias a mi madre Rosa Amparo Vargas, que es la luz de mi camino llamado vida, así como a todas las personas que estuvieron que nos colaboraron en los momentos más difíciles y cuando ya pensábamos que todo estaba perdido.

Igualmente gracias a mi compañero Jersson, que fue un apoyo fundamental para desarrollar esta investigación y al cual le deseo los mejores éxitos en el camino que lleve en su vida.

Juan Camilo Ospina Vargas

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 11 |
| 2. | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 12 |
| 3. | ANTECEDENTES..... | 14 |
| 4. | JUSTIFICACIÓN..... | 18 |
| 5. | OBJETIVOS..... | 21 |
| 5.1 | OBJETIVO GENERAL | 21 |
| 5.2 | OBJETIVO ESPECÍFICOS..... | 21 |
| 6. | MARCO TEÓRICO | 22 |
| 6.1 | MARCO CONCEPTUAL: | 22 |
| 6.1.1 | FORMACIÓN DEL SUELO DE LA SABANA DE BOGOTÁ | 22 |
| 6.1.2 | POLÍMEROS INORGÁNICOS O GEOPOLÍMEROS..... | 23 |
| 6.1.3 | ESTRUCTURA QUÍMICA DE LOS GEOPOLÍMEROS..... | 24 |
| 6.1.4 | PROPIEDADES DE LOS GEOPOLIMEROS..... | 26 |
| 6.2 | MARCO GEOGRÁFICO | 28 |
| 6.3 | MARCO LEGAL | 33 |
| 7. | DISEÑO METODOLÓGICO..... | 36 |
| 7.1 | ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN | 36 |
| 7.2 | TIPO DE INVESTIGACIÓN | 36 |
| 7.3 | POBLACIÓN Y MUESTRA | 37 |
| 7.4 | DEFINICIÓN Y OPERACIÓN DE VARIABLES..... | 37 |
| 7.5 | TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN | 39 |
| 7.6 | FASES DE INVESTIGACIÓN | 39 |
| 8. | RESULTADOS Y ANÁLISIS | 41 |
| 8.1 | CARACTERIZACIÓN DEL SUELO TÍPICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ..... | 41 |
| 8.1.1 | EXPLORACIÓN PARA LA OBTENCIÓN Y MUESTREO DE UN SUELO TÍPICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ | 41 |

| | | |
|-------|--|----|
| 8.1.2 | EXTRACCIÓN INICIAL DEL MATERIAL Y DESCRIPCIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO..... | 42 |
| 8.1.3 | EXTRACCIÓN FINAL Y CONSERVACIÓN DEL SUELO | 52 |
| 8.1.4 | CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DEL SUELO..... | 52 |
| 8.2 | OBTENCIÓN DE LOS RESIDUOS DE LADRILLO DE ARCILLA (RLA), Y PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DEL RLA | 62 |
| 8.2.1 | DETERMINACIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LOS RLA MEDIANTE EL ENSAYO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX) 63 | |
| 8.3 | FABRICACIÓN DE PROBETAS CON MATERIAL DE LADRILLO ACTIVADO ALCALINAMENTE. | 65 |
| 8.3.1 | DETERMINAR LA HUMEDAD ÓPTIMA, DENSIDAD MÁXIMA Y TAMAÑO DE LA PARTÍCULA DE LADRILLO | 65 |
| 8.3.2 | DEFINICIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ALCALINA DE HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH) Y SILICATO DE SODIO (Na ₂ SiO ₃) PARA EL TRATAMIENTO DEL SUELO | 69 |
| 8.3.3 | FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS CON MATERIAL DE LADRILLO ACTIVADO ALCALINAMENTE..... | 70 |
| 8.4 | EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA SUELO-MATERIAL DE LADRILLO ACTIVADO ALCALINAMENTE. | 76 |
| 8.4.1 | EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE COMPRESIÓN EN TIEMPOS DE 3, 7, 14 Y 28 DÍAS PARA CADA PORCENTAJE DE DOSIFICACIÓN. | 76 |
| 8.4.2 | OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN DE PROBETAS MEJORADAS CON LADRILLO. | 83 |
| 9. | CONCLUSIONES | 85 |
| 10. | RECOMENDACIONES | 87 |
| 11. | REFERENCIAS | 88 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Mapa geológico de Santa Fe de Bogotá..... | 30 |
| Figura 2 Mapa de microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá. | 31 |
| Figura 3 Mapa de zonificación geotécnica de Santa Fe de Bogotá. | 32 |
| Figura 4 Localización zona de estudio Cr 24 # 50..... | 41 |
| Figura 5 Ubicación en el mapa de zonificación geotécnica, zona de extracción. | 42 |
| Figura 6 Ensayo de humedad..... | 45 |
| Figura 7 Ensayo de consistencia..... | 46 |
| Figura 8 Ensayo de resistencia seca..... | 48 |
| Figura 9 Ensayo de dilatancia..... | 49 |
| Figura 10 Ensayo de tenacidad..... | 50 |
| Figura 11 Ensayo de plasticidad..... | 51 |
| Figura 12 Ensayo de plasticidad..... | 51 |
| Figura 13 Curva de granulometría del suelo..... | 54 |
| Figura 14 Grafica de ensayo 1 de límite de consistencia. | 56 |
| Figura 15 Grafica ensayo 2 de límite de consistencia. | 57 |
| Figura 16 Ensayo 3 límite de consistencia..... | 58 |
| Figura 17 Diagrama de Casagrande..... | 59 |
| Figura 18 Curva de compactación del suelo..... | 60 |
| Figura 19 Graficas de resistencia a la compresión inconfiada del Suelo. ... | 62 |
| Figura 20 Grafica de compactación de suelo-ladrillo..... | 67 |
| Figura 21 Curva de granulometría del polvo de ladrillo..... | 69 |
| Figura 22 Resistencia a la compresión del geopolimero..... | 70 |
| Figura 23 Dosificación material seco. | 72 |
| Figura 24 Dosificación de soluciones activadoras. | 72 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 25 Mezcla material seco - soluciones activadoras y agua..... | 73 |
| Figura 26 Muestra para la obtención de humedad. | 74 |
| Figura 27 Remoldeo de muestra. | 76 |
| Figura 28 Esfuerzo vs # de días 5%..... | 78 |
| Figura 29 Esfuerzo vs # de días 8%..... | 79 |
| Figura 30 Esfuerzo vs # de días 15%..... | 80 |
| Figura 31 Esfuerzo vs # de días 30%..... | 81 |
| Figura 32 Curvas de compresión de probetas a los 28 días y de humedad natural | 82 |
| Figura 33 Esfuerzo vs # de días por porcentaje de ladrillo. | 84 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Propiedades mecánicas de los suelos de la formación sabana de Bogotá..... | 23 |
| Tabla 2 Valores de permeabilidad en cm/s. | 27 |
| Tabla 3 Disolución con soluciones acidas al 5% (% de matriz disuelta en condiciones idénticas)..... | 27 |
| Tabla 4 Ensayos básicos para la caracterización de suelos..... | 33 |
| Tabla 5 Definición y operación de variables..... | 37 |
| Tabla 6 Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual..... | 43 |
| Tabla 7 Condición de humedad | 45 |
| Tabla 8 Criterios para describir la consistencia | 46 |
| Tabla 9 Criterios para describir la resistencia seca..... | 47 |
| Tabla 10 Criterios para describir la dilatancia | 48 |
| Tabla 11. Criterios para describir la tenacidad..... | 49 |
| Tabla 12. Criterios para describir la plasticidad..... | 50 |
| Tabla 13 Ensayo 1 de hidrometría de suelo..... | 52 |
| Tabla 14 Ensayo 2 de hidrometría suelo..... | 53 |
| Tabla 15 Ensayo 3 de hidrometría de suelo..... | 53 |
| Tabla 16 Índice de plasticidad..... | 58 |
| Tabla 17 Porcentaje de humedad natural..... | 61 |
| Tabla 18 Probetas de Suelo..... | 61 |
| Tabla 19 Resultados de ensayo FRX..... | 63 |
| Tabla 20 Métodos para realizar ensayo modificado de compactación..... | 66 |
| Tabla 21 Ensayo 1 de hidrometría del ladrillo..... | 68 |
| Tabla 22 Ensayo 2 de hidrometría del ladrillo..... | 68 |
| Tabla 23 Ensayo 3 de hidrometría del ladrillo..... | 68 |
| Tabla 24 Resistencia en KPa para el 3% de ladrillo a los 28 días | 77 |
| Tabla 25 Resistencia en KPa para el 5% de ladrillo | 77 |

| | |
|--|-----------|
| Tabla 26 Resistencia en KPa para el 8% de ladrillo | 78 |
| Tabla 27 Resistencia en KPa para el 15% de ladrillo | 79 |
| Tabla 28 Resistencia en KPa para el 30% de ladrillo | 80 |
| Tabla 29 Resistencia en KPa para el 0% de ladrillo | 82 |

INTRODUCCIÓN

Los suelos arcillosos típicos de la formación sabana de Bogotá conforman los depósitos fluvio-lacustres de Bogotá, los cuales tienen bajas propiedades mecánicas que los hacen inestables para la construcción, en la actualidad se emplean métodos de estabilización química como el cemento y la cal, estos materiales en su proceso de producción emiten gran cantidad de CO₂ lo cual los convierte detonantes de contaminación al medio ambiente, es por esto que el uso de materiales alternativos y reciclados como los geopolímeros hechos de residuo de ladrillo de arcilla representan una alternativa en la estabilización y mejoramiento suelos de suelos así como la reducción en los impactos negativos al medio ambiente.

Los geopolímeros hechos de residuo de ladrillo de arcilla están conformados por un precursor (cerámica) y un activante alcalino (hidróxido de sodio y silicato de sodio) que al ser mezclados mejoran las propiedades mecánicas del material precursor, llegando a ser una alternativa contra los materiales convencionales como el cemento y la cal, los cuales son empleados en diferentes sectores de la construcción. Por lo que, la actual investigación se enfoca en la determinación de la resistencia a la compresión inconfiada de un suelo arcilloso típico de la formación sabana de Bogotá mejorado con residuo de ladrillo de arcilla; identificando su comportamiento en diferentes dosificaciones de material precursor y tiempos de curado puesto que estas variables tienen efectos influyentes en la adquisición de resistencia.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La sabana de Bogotá está conformada por diferentes tipos de unidades geológicas, de las cuales sobresalen dos tipos de unidades. La primera corresponde a una zona plana la cual conforma la llanura fluvio-lacustre del río Bogotá, caracterizada por suelos de la formación sabana de Bogotá y la segunda, por la zona montañosa al oriente donde se presentan un estrato rocoso o suelos duros¹, este trabajo se concentrará en los suelos arcillosos de Bogotá típicos de la formación sabana, ya que estos presentan resistencias y compresibilidades poco aptas para la construcción.

En muchas construcciones de ingeniería civil se estabilizan químicamente los suelos arcillosos con adiciones de cemento Portland ordinario (OPC) y cal. Los procesos de producción de estos estabilizadores tradicionales son de alto consumo energético, emiten una gran cantidad de CO₂ a la atmósfera y utilizan como materias primas materiales no renovables². Los efectos negativos al medio ambiente, debido su utilización, pueden ser controlados o mitigados mediante la utilización de materiales alternativos, que puedan llegar a ser sustituidos al OPC, como es el caso de los materiales geopoliméricos o cementos activados alcalinamente.

Los geopolímeros son materiales activados alcalinamente que se obtienen a partir de la mezcla en óptimas proporciones de un material precursor rico en aluminosilicatos (SiO₂ y Al₂O₃) y con un porcentaje de contenido de amorfos activados

¹ DELGADO, Felipe Andres, JIMENEZ. Jesus Alexander y NEIRA. Oscar Alexander. Asentamientos secundarios en los suelos de la zona el campin y su correlacion con algunos paramentros de los suelos de la zona lacustre en la ciudad de Bogota. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá. Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería. 2008. p.2.

² MUNERA, Jorge Alexander y MULFORD, Alexandra Jimena. Aprovechamiento de desechos de ladrillo para la síntesis de geopolímero. Trabajo de grado Ingeniero de Materiales. Cali. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. 2015. p.3.

químicamente con una solución altamente alcalina. La solución activadora tiene un efecto sobre las características y propiedades finales del producto obtenido³ dando lugar a la generación de un material geopolimérico. Los geopolímeros son materiales que por sus excelentes propiedades aglutinantes y alta alcalinidad pueden ser materiales sustitutivos de materiales tradicionales como el cemento portland y la cal para tratar químicamente los suelos.

Por lo tanto la presente investigación pretende resolver la siguiente pregunta:

¿Que incidencia tiene en la resistencia el tratamiento de un suelo blando típico de la formación sabana de Bogotá con un material geopolimérico obtenido a partir de residuos de ladrillo de arcilla activados alcalinamente mediante una solución de hidróxido de sodio y silicato de sodio?

³ Ibid., p. 113.

3. ANTECEDENTES

Para el caso específico de ésta investigación se han de considerar algunas investigaciones previas, Sara Ríos, Catarina Ramos, António Viana da Fonseca, Nuno Cruz y Carlos Rodríguez en su investigación titulada **Colombian soil stabilized with geopolymers for low cost roads** en la cual se estudió el mejoramiento de una arcilla colombiana con geopolímeros sinterizados a partir de cenizas volantes bajas en calcio y una solución alcalina hecha de silicato de sodio e hidróxido de sodio, esto con el fin de reducir el costo de los materiales aplicados al mejoramiento del suelo, se evaluó la mezcla geopolímero-suelo mediante un ensayo de resistencia a la compresión no confinada, obteniendo el valor de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, observando que éstos aumentan con la aplicación de geopolímeros al suelo en comparación de uno mejorado con cemento portland; por lo que para la presente investigación aporta que es necesario evaluar los parámetros de resistencia a la compresión no confinada con el fin de obtener ésta resistencia y el módulo de elasticidad⁴.

Jorge Alexander Múnera Canabal y Alexandra Jimena Mulford Carvajal de la Universidad del Valle en su investigación titulada **Aprovechamiento de desechos de ladrillo para la síntesis de geopolímero** se pudo determinar que la elaboración de geopolímeros de residuos de ladrillo aumenta sus propiedades mecánicas de compresión adicionando una fuente de calcio (cemento portland) en pequeñas dosificaciones que les permitió aumentar la manejabilidad del material geopolimérico, igualmente se determinó el comportamiento de la resistencia a la compresión de las muestras de material geopolimérico en un periodo de tiempo determinado; por lo que para la presente investigación aportará a la metodología de realización de ensayos de resistencia a la compresión de las muestras que deben evaluarse en un periodo de tiempo establecido, teniendo en cuenta las diferentes

⁴ RIOS. Sara, RAMOS. Catarina, DA FONSECA. António, CRUZ. Nuno y RODRIGUEZ. Carlos. Colombian soil stabilized with geopolymers for low cost roads. En: Procedia Engineering. 2016. vol. 143, p.1392-1400.

relaciones de precursor/suelo y dosificaciones de solución activadora para evaluar el cambio de su resistencia en un ensayo de compresión simple⁵.

Liew Yun-Ming, Heah Cheng-Yong, Mohd Mustafa Al Bakri y Kamarudin Hussin en su investigación titulada **Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review**, la cual permite conocer los compuestos químicos y la estructura de los geopolímeros de base arcillosa, su mecanismo de reacción, las materias primas que intervienen en su formación y la caracterización de los geopolímeros en términos micro-estructurales, cristalográficos y funcionales. Además, los factores importantes (tales como concentración de álcali, los parámetros de mezcla, las condiciones de curado y el contenido de agua) que afectan a las propiedades (tales como el tiempo de fraguado, densidad aparente, la fuerza, propiedades térmicas, y la estabilidad) de los geopolímeros de base arcillosa; esta investigación es importante para la presente investigación como referente para el desarrollo experimental y el análisis de resultados en la obtención y utilización del geopolímero en el suelo de estudio, dado que aporta la metodología a seguir para comprender con mayor precisión como afecta físicamente y mecánicamente en términos de resistencia del suelo y como actúa químicamente sobre el mismo, teniendo en cuenta los cambios que presentarían las propiedades del suelo no tratado.

Claudia Paulina González Cuervo, Ángela Marcela Montaña Angarita y Diana Catalina Castro Rodríguez en su investigación titulada **Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto**, la cual presenta los resultados obtenidos al adicionar un geopolímero derivado de una fase mineral (ceniza volante y piedra pómez) al concreto. La síntesis de los geopolímeros se realizó a partir de la activación alcalina de un aluminosilicatos en

⁵ MUNERA CARVAJAL, Jorge Alexander. Op.cit

cuanto a ceniza volante y piedra pómez, en el cual los agentes alcalinos empleados para la síntesis fueron el hidróxido de Sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na₂SiO₃). Posteriormente el geopolímero fue adicionado al concreto sustituyendo el agregado fino y analizando la probetas mecánicamente en las que se determinó una resistencia específica, se observaron las características cementantes de los geopolímeros los cuales afectan considerablemente la resistencia del concreto; por lo que para la presente investigación aportará de manera significativa que los geopolímeros sintetizados a partir de la activación alcalina de un precursor aluminosilicatos muestran excelentes propiedades para ser considerados materiales cementantes, lo cual puede tener gran incidencia al aplicarse a un suelo en términos de mejoramiento del mismo⁶.

Zhang Mo, Guo Hong, El-Korchi Tahar, Zhang Guoping y Tao Mingjiang titulada **Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer**, en la cual se estabilizo un suelo compuesto por arcilla magra con geopolímeros elaborados con metacaolin, se realizaron concentraciones que iban del 3-15% del peso, para examinar la viabilidad del geopolímero en la estabilización, se evaluaron las muestras mediante ensayos de resistencia a la compresión, mediciones de volumen durante el curado, microscopia electrónica de barrido (SEM), espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDX) y difracción de rayos X (XRD); se pudo observar en la investigación que con los análisis micro estructurales se forman geles geopoliméricos en el suelo estabilizado y que este tiende a formar microestructuras más homogéneas y compactas después de la estabilización; por lo que para la presente investigación se tiene como referente la metodología de relación de geopolímero-suelo, evaluado en un tiempo de curado, en esta investigación se manejaran relaciones de 3,5,8,11 y 15 % evaluados en

⁶ GONZALEZ CUERVO, Claudia Paulina. MONTAÑO ANGARITA, Ángela Marcela. CASTRO RODRÍGUEZ, Diana Catalina. Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto. [en línea]. Marzo, 2011. <<http://ingenieria.uao.edu.co/hombreymaquina/revistas/38%202012-1/38%20Articulo%2008.pdf>> [citado el 3 de octubre de 2016].

tiempos de curado de 3,7,14 y 28 días, para un total de 60 probetas, con el fin de determinar la mejor relación teniendo en cuenta la manejabilidad de la mezcla en un suelo blando (arcilloso), con el propósito de realizar su mejoramiento para la estabilidad, además aportará la evaluación de la mezcla por medio de ensayos de difracción de Rayos X (DRZ) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

4. JUSTIFICACIÓN

La sabana de Bogotá está constituida por un gran depósito de suelos, predominantemente arcilloso, de origen lacustre, formados durante la última era geológica, conformando la denominada formación sabana de Bogotá.

La formación sabana de Bogotá presenta características especiales de los suelos subyacentes a diferentes profundidades, en cuanto a resistencia y compresibilidad. Las arcillas del depósito lacustre se han catalogado como problemáticas para la construcción de cimentaciones o para llevar a cabo proyectos de excavación o rellenos, especialmente por presentar poca estabilidad, baja resistencia y alto grado de compresibilidad ⁷, y así la necesidad de implementar alternativas de mejoramiento de estos suelos más puntualmente de estabilización, con el fin de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.

Los suelos que no poseen las características adecuadas para una construcción particular pueden ser mejorados añadiendo estabilizadores de uso común como lo son el cemento Portland y la Cal, con el objetivo de modificar las propiedades del material existente, mejorando químicamente las características del suelo inalterado. Sin embargo, la utilización de materiales como lo son el cemento portland y la cal, trae consigo factores que deben ser considerados al momento de optar por su utilización, como lo es factor económico y los procesos de producción de estos estabilizadores tradicionales, caracterizados por el alto consumo energético, su emisión de CO₂ es en gran cantidad a la atmosfera y la utilización como materias primas recursos no renovables. También es un hecho que su producción representa

⁷ MONTAÑA SANABRIA, Danilo. Características de compresibilidad y resistencia de arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá. Bogotá, 2013, 159h. Trabajo de grado (Magister ingeniería). Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito. Facultad de Ingeniería Civil. Disponible en el catálogo de la Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito: <<http://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/108/1/CARACTER%C3%8DSTICAS%20DE%20COMPRESIBILIDAD%20ARCILLAS%20TIPICAS%20DE%20LA%20SABANA%20DE%20BOGOT%C3%81.pdf>>

una serie de impactos ambientales significativos, en donde dentro de las emisiones pueden aparecer compuestos de óxido de azufre (SO₂) y óxido de nitrógeno (NO₂), los cuales repercuten con fenómenos como la generación de lluvia ácida y la aparición de enfermedades principalmente de tipo respiratorio, y la potencialización del efecto invernadero dada por la presencia de Dióxido de Carbono (CO₂) en la atmosfera, incrementando la temperatura superficial de la tierra a un ritmo cada vez mayor.⁸

En medio de este panorama, la comunidad internacional ha planteado medidas tendientes a mitigar los efectos climáticos derivados de las actividades antrópicas. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos y avances obtenidos con las políticas de gestión ambiental, se hace cada vez más necesaria la investigación de forma activa, que propenda al desarrollo científico de tecnologías de apoyo para satisfacer la creciente demanda de cemento y reducir la contaminación. Durante las últimas décadas se ha impulsado una importante tecnología alternativa conocida como la geopolimerización, en donde es el proceso mediante el cual se obtienen los geopolímeros, que poseen un elevado potencial para ser usados en numerosos campos predominando su uso como sustitutos del cemento portland ordinario (OPC), los geopolímeros son una nueva clase de materiales que consisten en aluminosilicatos álcali-activados desarrollados mediante una reacción geosintética alcanzada a bajas temperaturas, sus propiedades han generado gran expectativa en la comunidad científica. Son utilizados para revestimientos y adhesivos, nuevos materiales para aglutinantes para materiales compuestos de fibra, la encapsulación de residuos y nuevo cemento para el hormigón.

⁸MARTÍNEZ LÓPEZ, Carolina. Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como alternativa potencial al cemento portland. Palmira. 2015, 140h. Tesis presentada para optar al título de magister en Ingeniería ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil y Administración. Disponible en el catálogo en línea de la biblioteca de la Universidad Nacional de Colombia: <http://www.bdigital.unal.edu.co/49278/1/Carolina_Martinez_Lopez.pdf>.

Las propiedades y usos de geopolímeros se están explorando en muchas disciplinas científicas e industriales, química inorgánica moderna, la química física, química coloidal, la mineralogía, geología, y en todos los tipos de tecnologías de procesos de ingeniería.⁹ Adicionalmente la producción de geopolímeros es además viable desde el punto de vista ambiental, ya que el nivel de contaminación que se tiene es relativamente bajo si se compara con el proceso de producción de los estabilizadores tradicionales. Con respecto a lo antes planteado se hace imprescindible una propuesta de investigación que evalué el comportamiento y la incidencia de los geopolímeros para la estabilización química de suelos arcillosos de subrasante típicos de la Sabana de Bogotá.

⁹Ibíd., p. 3.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la resistencia de un suelo blando típico de la formación sabana de Bogotá tratado con un geopolímero de base arcillosa.

5.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Caracterizar física y mecánicamente un suelo blando típico de la formación sabana de Bogotá.
- Definir la dosificación de la solución alcalina de hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3) para el tratamiento del suelo.
- Evaluar la resistencia a la compresión incofinada del suelo tratado con diferentes proporciones y tiempos de curado con el material geopolimérico a partir de la activación alcalina de residuos de ladrillo de arcilla.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 MARCO CONCEPTUAL:

6.1.1 FORMACIÓN DEL SUELO DE LA SABANA DE BOGOTÁ

La Sabana de Bogotá está localizada en la parte central de la Cordillera Oriental y en ella afloran rocas desde el Cretácico Superior al Cuaternario las cuales evidencian diferentes condiciones de sedimentación. Las rocas más antiguas están representadas en las formaciones Chipaque, La Frontera, Simijaca y Conejo (Turoniano-Santoniano); ésta sedimentación se dio en ambientes marinos con la depositación de 1.200 m aproximados de secuencia.

Se denomina formación Sabana a los depósitos lacustres que afloran en toda la zona plana y que hace parte de la Sabana de Bogotá. Helmens & Van der Hammen, hacen referencia a que esta formación está constituida principalmente por arcillas y hacia las márgenes de la cuenca se observan arcillas orgánicas, arenosas y turba-lignita. Este depósito es resultado de un antiguo lago que dejó planicies y deltas lacustres, los cuales son extensos, de aspecto aterrazado y con morfología ondulada suavemente inclinada y limitada hacia los cauces por los escarpes de estos¹⁰; Jorge Alberto Rodríguez en su investigación evaluación de las propiedades de los suelos de Bogotá para el análisis de respuesta dinámica¹¹, establece como

¹⁰ MONTOYA ARENAS, Diana María. REYES TORRES, Germán Alfonso. Geología de la Sabana de Bogotá. En: INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA INGEOMINAS [en línea]. Disponible en :<https://choconta.files.wordpress.com/2007/12/informe_geologia_sabana_bta.pdf>[citado en 12 de octubre de 2016] .

¹¹ RODRIGUEZ O, Jorge Alberto. Evaluación de las Propiedades Dinámicas de los Suelos de Bogotá para el Análisis de Respuesta Dinámica. En: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA [en línea]. Disponible en :<http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/foro/jorge_alberto_rodriguez.pdf>[citado en 31 de octubre de 2017]

referencia las propiedades mecánicas de los suelos de la formación de sabana de Bogotá en la Tabla 1.

Tabla 1 Propiedades mecánicas de los suelos de la formación sabana de Bogotá.

| # Sitio | # Muestra | Prof. (m) | Clasif. USC | LL (%) | LP (%) | ω (%) | λ (kN/m ³) | G _s | e | σ_c (KPa) | E ₀ (KPa) | E ₀ (Vs) (KPa) |
|---------|-----------|-----------|-------------|--------|--------|--------------|--------------------------------|----------------|------|------------------|----------------------|---------------------------|
| 1 | 1 | 7.9-8.6 | CH | 54.90 | 25.60 | 44.00 | 17.20 | 2.49 | 1.09 | 97.00 | 40000 | 94395 |
| 1 | 2 | 11.9-12.6 | CL | 31.80 | 19.80 | 24.10 | 19.80 | 2.61 | 0.64 | 117.00 | 60000 | 234091 |
| 1 | 3 | 18.5-19 | CL | 37.60 | 25.20 | 32.40 | 18.60 | 2.60 | 0.85 | 154.00 | 48000 | 219903 |
| 2 | 1 | 9.2-9.9 | MH | 303.50 | 242.80 | 224.90 | 12.20 | 2.40 | 5.39 | 83.00 | 8500 | 157197 |
| 2 | 2 | 24.1-24.8 | MH | 93.00 | 51.20 | 69.40 | 15.50 | 2.48 | 1.71 | 123.00 | 25000 | 221293 |
| 2 | 3 | 50.0-50.6 | CH | 92.30 | 31.70 | 50.80 | 16.50 | 2.47 | 1.26 | 147.00 | 24000 | 212602 |
| 3 | 1 | 10-10.5 | CH | 188.90 | 50.90 | 119.20 | 13.40 | 2.48 | 3.19 | 57.00 | 18000 | 123975 |
| 3 | 2 | 20-20.5 | MH | 289.00 | 98.60 | 143.30 | 12.10 | 2.18 | 3.49 | 99.00 | 19000 | 167608 |
| 4 | 1 | 15 | CH | 152.60 | 92.00 | 187.00 | 13.00 | 2.56 | 3.60 | 58.00 | 60000 | 95040 |
| 4 | 2 | 25 | CH | 152.60 | 67.00 | 110.70 | 15.00 | 2.56 | 2.20 | 128.00 | 60000 | 98093 |
| 4 | 3 | 35 | MH | 86.70 | 43.00 | 75.20 | 14.50 | 2.44 | 1.70 | 175.00 | 90000 | 153878 |
| 4 | 4 | 51 | CH | 206.10 | 52.00 | 110.70 | 15.70 | 2.34 | 2.10 | 240.00 | 70000 | 116166 |

Fuente: Rodríguez Jorge Alberto¹²

6.1.2 POLÍMEROS INORGÁNICOS O GEOPOLÍMEROS.

Los polímeros sintéticos inorgánicos o también conocidos como geopolímeros, término que fue usado por primera vez en el año 1972 por Davidovits, ya había sido descubierto por la unión Soviética en 1950 con el nombre de los cementos del suelo (Soil Cements), fueron los científicos Victor Glukhovsky y Pavel Krivenko, quienes

¹² RODRIGUEZ O, Jorge Alberto. Evaluación de las Propiedades Dinámicas de los Suelos de Bogotá para el Análisis de Respuesta Dinámica. En: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA [en línea]. Disponible en :<http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/foro/jorge_alberto_rodriguez.pdf>[citado en 31 de octubre de 2017]

preguntándose por qué las estructuras y edificios de la antigüedad, pirámides en especial, duraban tanto, los analizaron y observaron que tras la presencia de alcalinos libres en las matrices cerámicas podría estar la respuesta.

Inicialmente los geopolímeros fueron preparados hechos a partir de mezclas de caolinita en soluciones alcalinas de hidróxido de sodio o hidróxido de potasio a temperaturas entre 25 y 120° C, con el fin de lograr una mayor reactividad, la caolinita es calcinada a altas temperaturas, el resultado es metacaolín con alto contenido de aluminosilicatos amorfos y con un tamaño de partícula menor, lo que implica una mayor reactividad al contacto con la solución alcalina. Los geopolímeros a base de metacaolín han evidenciado mejores propiedades (resistencia a la compresión y resistencia al fuego) en comparación con otros ligantes inorgánicos.

6.1.3 ESTRUCTURA QUÍMICA DE LOS GEOPOLÍMEROS

El elemento básico de un geopolímero es una cadena tetraédrica de silicio y aluminio mediante un intercambio de átomos de oxígeno. La unidad básica monomérica se le conoce como sialato, este término es una abreviación de (silico-oxo-aluminato) con fórmula empírica $Mn \text{-(SiO}_2\text{)}_z \text{-AlO}_2)_n \cdot (wH_2O)$. Donde *M*, es un catión monovalente como sodio o potasio, *w*, es el número de moléculas de agua asociadas, *n*, el grado de poli condensación y *z* toma valores de 1, 2, 3, dependiendo del número de átomos de silicio sustituidos por el aluminio, basados en esto hay diferentes estructuras monoméricas que definen los geopolímeros, Davidovits los clasifico en polisialato (PS), polisialatosiloxo (PSS) y polisialatodisiloxo (PSDS).

En el efecto de los Iones Alcalinos se ha encontrado que los cationes de metales alcalinos, tales como, Na y K, tienen una influencia directa sobre todas las etapas de la geopolimerización de minerales de aluminosilicatos, especialmente la etapa

de endurecimiento. Los cationes de Na^+ favorecen la formación de oligómeros de silicatos más pequeños comparado a los cationes de K. Los resultados muestran que aunque el grado de disolución de los minerales es mayor en las soluciones de NaOH que en KOH, se han obtenido las mejores resistencias a la compresión (hasta 42% más que con NaOH) con el catión de K, mejor resistencia al ataque de HCl y menor grado de cristalinidad, aunque cabe anotar que existen resultados controvertidos. La selección del tipo de catión depende de varios factores entre ellos el tipo de material base. Además, se ha observado que la concentración óptima de activador depende del precursor, y debe ser suficiente para equilibrar las cargas de Al y Si tetraédricos, sin proporcionar un exceso de NaOH que cause la formación de sales de carbonato.

La utilización de soluciones alcalinas con silicatos solubles de sodio o potasio genera cinéticas de reacción más altas frente a soluciones con hidróxidos alcalinos, así mismo producen una estructura más compacta y de mayor estabilidad. A su vez, un mayor contenido de estos silicatos puede reducir el ordenamiento de largo alcance, por el contrario, la incorporación de bajas cantidades de silicatos solubles al sistema, favorece la obtención de estructuras zeolíticas con mayor grado de cristalinidad. De esta manera, las propiedades y características micro estructurales de sistemas geopoliméricos dependen tanto de la concentración de los silicatos solubles incorporados, así como de la alcalinidad de la solución, la cual determina el grado de polimerización. Sin embargo, si se usa un ambiente alcalino muy alto (> 30 % en moles de contenido global de Na_2O), la conectividad de los aniones de silicato se puede reducir, lo que resulta en un bajo grado de geopolimerización.¹³

¹³ Ibid., p. 12.

6.1.4 PROPIEDADES DE LOS GEOPOLIMEROS

Las propiedades y microestructura de los geopolímeros, están fuertemente asociadas a la naturaleza de los materiales de partida incluso aunque las características macroscópicas de los geopolímeros basados en aluminosilicato parezcan similares, debido a que presentan la misma fase de gel y unión Si-Al. Dicha influencia de los materiales de partida en la homogeneidad de la microestructura de los geopolímeros ha sido demostrada mediante análisis microestructurales, encontrándose además que puede afectar propiedades como la conductividad térmica, y la resistencia a la compresión. Ésta última es fundamental si se tiene en cuenta que es extensamente empleada como herramienta para evaluar el éxito de la geopolimerización, y que es un indicador de la utilidad de los materiales en diferentes aplicaciones en la industria de la construcción.

Se ha informado que los materiales minerales sintéticos pueden poseer propiedades tales como superficies duras entre 4-7 en la escala de Mohs, estabilidad térmica, suavidad de superficie y moldeabilidad, siendo útiles para moldear objetos de arte, cerámica, así como en la construcción de materiales.

La temperatura que se requiere para el proceso de geopolimerización es de alrededor de 25 a 80°C, mientras que la presión no es tan fundamental, aunque a veces se requiere, en especial en aquellos casos en los cuales la porosidad del producto final deba ser más baja de lo normal. En ocasiones y según sean las condiciones del sistema, la integridad estructural y la fuerza se desarrollan en un periodo muy corto de tiempo aproximadamente 6 minutos, sin embargo por lo general el 70% de la resistencia a la compresión final que se desarrolla ocurre en un tiempo de 4 horas de fraguado según Davidovits. De este modo, la resistencia a la compresión final a 28 días puede llegar a alcanzar entre 70 y 100 MPa en estudios previos.

La baja permeabilidad es otra propiedad de gran interés que resulta fundamental a la hora de inmovilizar metales tóxicos. Podemos verlo en la Tabla 2.

Tabla 2 Valores de permeabilidad en cm/s.

| Material | Permeabilidad |
|----------------------------|-----------------------|
| Arena | 10^{-1} a 10^{-3} |
| Arcilla | 10^{-7} |
| Granito | 10^{-10} |
| Cemento con ceniza volante | 10^{-6} |
| Cemento Portland | 10^{-10} |
| Geopolímeros | 10^{-9} |

Fuente: Davidivits y Comrie 1988¹⁴

Los geopolímeros han demostrado además una buena resistencia al ataque de ácidos comparado con el cemento portland, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Disolución con soluciones acidas al 5% (% de matriz disuelta en condiciones idénticas).

| Matriz | H₂SO₄ | HCl |
|-------------------------------------|------------------------------------|------------|
| Cemento Portland | 95 | 78 |
| Cemento Portland/mezcla con escoria | 96 | 15 |
| Cemento de aluminato de calcio | 30 | 50 |
| Geopolímero | 7 | 6 |

Fuente: Davidivits y Comrie 1988¹⁵

¹⁴ Tomado de: Davidivits y Comrie 1988.

¹⁵ Ibid.

Entre otras propiedades está la baja expansión álcali-agregado, buena resistencia a cambios en ciclos hielo-deshielo, a sulfatos y a la corrosión, así como una adecuada encapsulación de residuos peligrosos. Su comportamiento señala además un muy bajo encogimiento en aire después del secado, evitando así la formación de grietas.

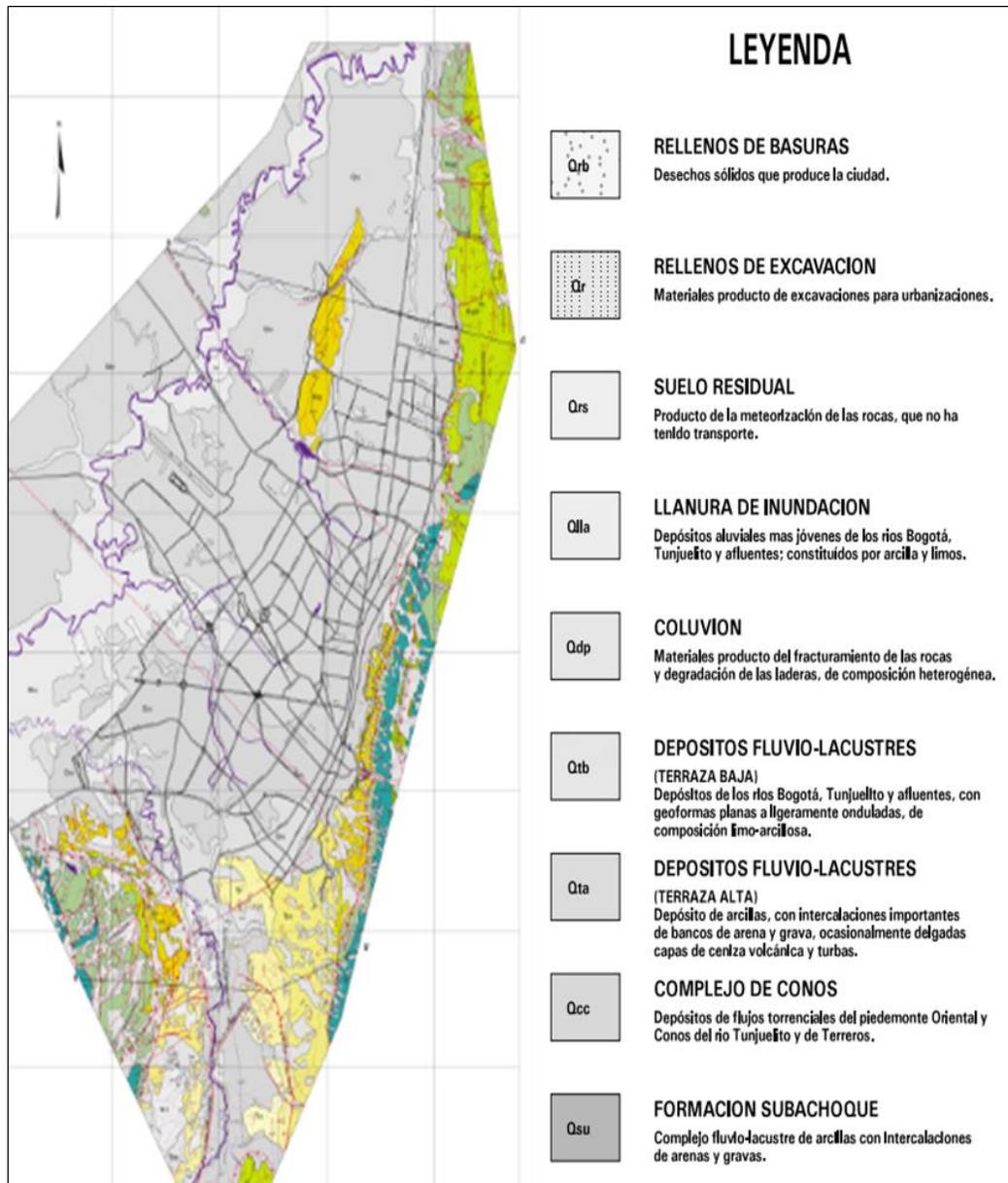
6.2 MARCO GEOGRÁFICO

El Servicio Geológico Colombiano a realizado una serie de investigaciones en la ciudad de Bogotá con el fin de ilustrar la geología, microzonificación y zonificación geotécnica del suelo de la ciudad, en la Figura 1 se puede observar como predominan los depósitos fluvio-lacustres “Qta” los cuales están compuestos por depósitos de arcillas, seguido de complejo de conos “Qcc” compuestos por depósitos de flujos torrenciales del piedemonte oriental, conos del rio Tunjuelito y de Terreros.

Se observó cómo existe una predominancia de la “Zona 1” seguido por la “Zona 3” y “Zona 4” como se muestra Figura 2 donde; la “Zona 1” está conformada por los cerros Orientales y la elevación natural del Noroccidente de la ciudad compuesto por roca arenisca y roca arcillolita cuya composición principal son las areniscas duras y arcillolitas blandas las cuales son competentes y resistentes a la meteorización y eventuales problemas de estabilidad en taludes, la “Zona 3” está conformada por suelos lacustres “A” los cuales se caracterizan por ser suelos muy blandos, cuya composición son arcillas limosas muy blandas que tienen muy baja a media capacidad portante y que son muy compresibles, la “Zona 4” está conformada por suelos lacustres “B” los cuales se caracterizan por ser suelos blandos cuya composición son arcillas limosas blandas con capacidades portantes y compresibilidades muy similares a las de la “Zona 3”.

Se observó cómo existe una predominancia de las arcillas blandas en toda la planicie de la ciudad, seguido de roca ubicada en los cerros orientales y en la elevación natural del Noroccidente de la ciudad como lo muestra Figura 3; los suelos blandos se caracterizan por la presencia de arcillas blandas que son altamente compresibles y las cuales son objeto de esta investigación.

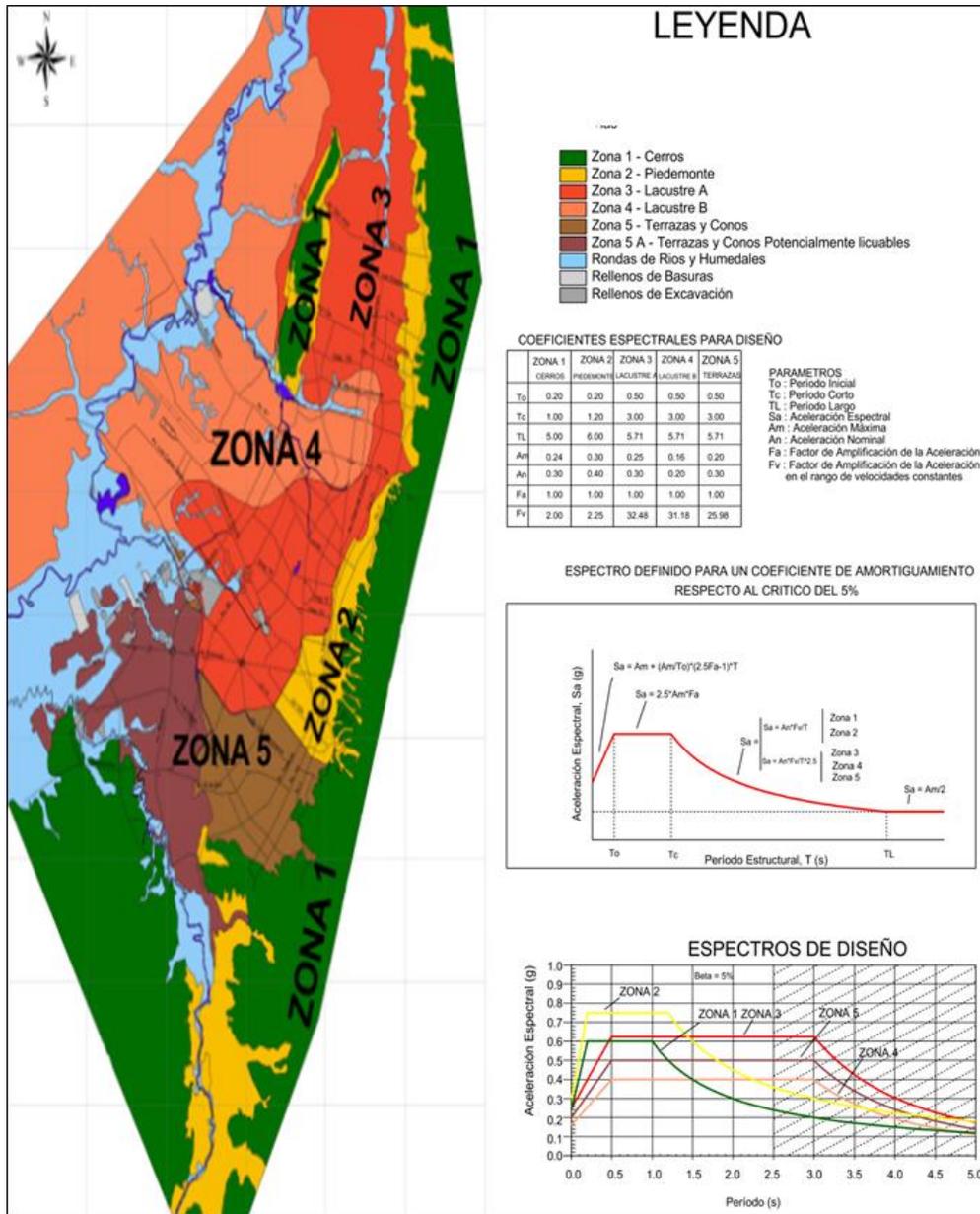
Figura 1 Mapa geológico de Santa Fe de Bogotá.



Fuente: Servicio geológico Colombiano. www.sgc.gov.co¹⁶

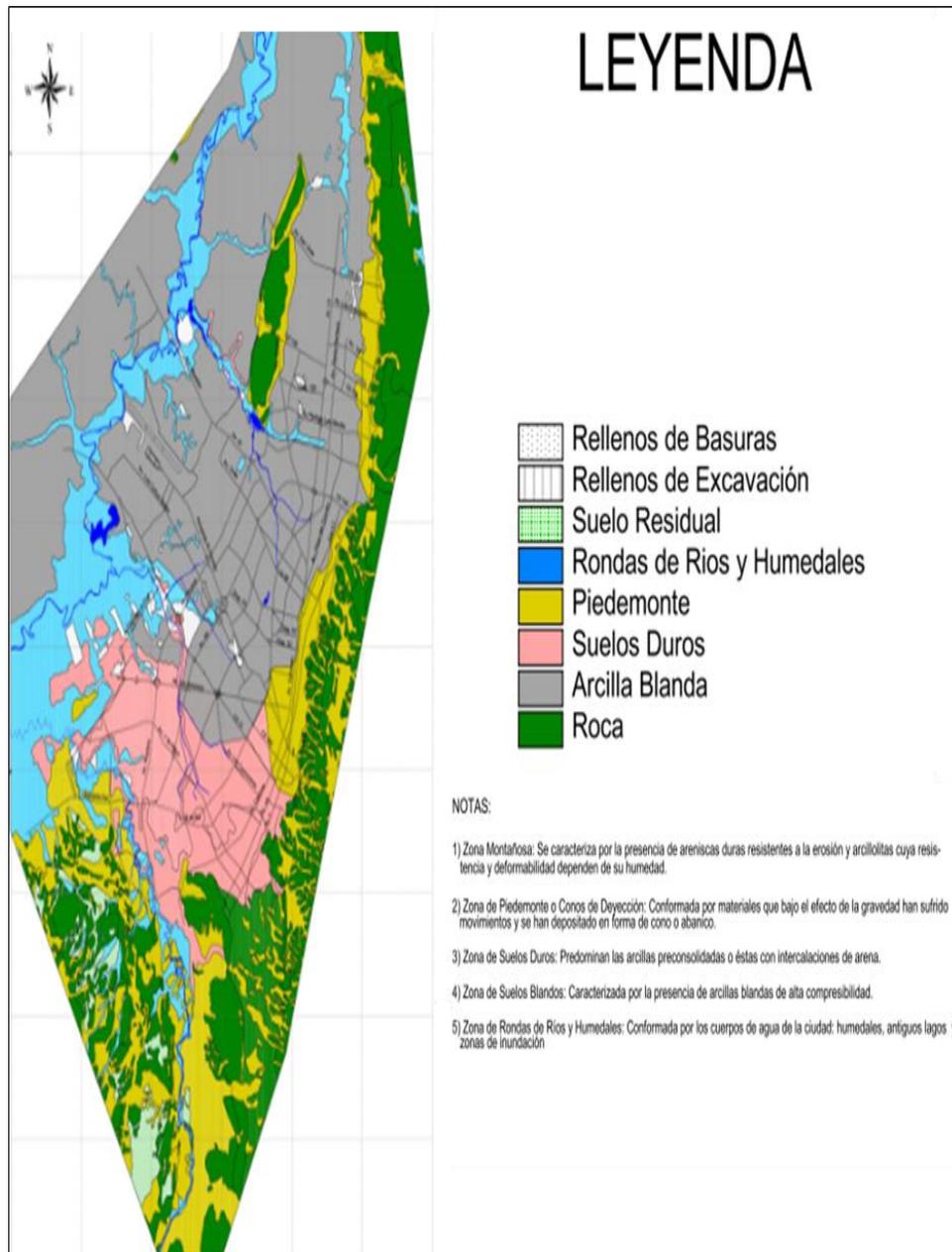
¹⁶ Servicio Geológico Colombiano. Mapa geológico de Santa Fe de Bogotá. www.sgc.gov.co. tomado 6 de abril de 2017.

Figura 2 Mapa de microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá.



Fuente: Servicio geológico Colombiano. www.sgc.gov.co¹⁷

Figura 3 Mapa de zonificación geotécnica de Santa Fe de Bogotá.



Fuente: Servicio geológico Colombiano. www.sgc.gov.co¹⁸

¹⁷ Servicio Geológico Colombiano. Mapa de microzonificación sísmica de santa fe de Bogotá. www.sgc.gov.co. tomado 6 de abril de 2017.

¹⁸ Servicio Geológico Colombiano. Mapa de zonificación geotécnica microzonificación sísmica de santa fe de Bogotá. www.sgc.gov.co. tomado 6 de abril de 2017.

6.3 MARCO LEGAL

En la Tabla 4 se encuentran los ensayos usados para la caracterización del suelo que es objeto de esta investigación, con una breve descripción general de cada uno de ellos.

Tabla 4 Ensayos básicos para la caracterización de suelos.

| Norma | Nombre de la norma | Descripción |
|------------------------|---|---|
| I.N.V. E-102-13 | Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual), para objeto de ésta investigación se identificará como procedimiento visual y manual. | Procedimiento para identificar el tipo de suelo mediante examen visual y ensayos manuales. |
| I.N.V. E-122-13 | Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado, para objeto de esta investigación se identificará como porcentaje de humedad natural. | Procedimiento para la determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de un suelo. |
| I.N.V. E-123-13 | Determinación del tamaño de las partículas de los suelos, para objeto de esta investigación se realizará e identificará como hidrómetro. | Procedimiento que determina cuantitativamente los tamaños de las partículas de suelo, en diámetros menores a 75 |

| | | |
|------------------------|---|--|
| | | µm (micrómetros), se emplea el método de hidrómetro. |
| I.N.V. E-125-13 | Determinación del límite líquido de los suelos, el cual será identificado con el mismo nombre | Procedimiento para determinar el límite líquido teniendo en cuenta el método A que requiere de un mínimo de tres tanteos sobre un rango de contenidos de agua en la cazuela de Casagrande. |
| I.N.V. E-126-13 | Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos, para objeto de esta investigación se identificará como límite plástico. | Procedimiento para determinar el límite plástico, este se realiza con el mismo material preparado para la determinación del límite líquido. |
| I.N.V. E-128-13 | Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua, para objeto de esta investigación se realizará y identificará como gravedad específica. | Procedimiento para determinar la gravedad específica de las partículas que pasan el tamiz (No 4), empleando el picnómetro con agua. |
| I.N.V. E-142-13 | Relaciones de humedad-peso unitario seco en los suelos (ensayo de compactación), para objeto de esta investigación se identificará como proctor modificado. | Procedimiento para determinar la relación entre la humedad y el peso específico seco, produciendo una curva de compactación con un peso |

| | | |
|------------------------|--|---|
| | | unitario seco máximo bien definido. |
| I.N.V. E-152-13 | Compresión inconfiada en muestras de suelos, para objeto de esta investigación de identificará como compresión no confinada, | Procedimiento para determinar la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación, este ensayo da un valor aproximado de la resistencia. |

Fuente: Propio

7. DISEÑO METODOLÓGICO

7.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo, puesto que este trabajo se basa en la medición, recolección, conteo y análisis de datos para posteriormente contestar la pregunta de investigación que explique “*¿Que incidencia tiene en la resistencia el tratamiento de un suelo blando típico de la formación sabana de Bogotá con un material geopolimérico obtenido a partir de residuos de ladrillo de arcilla activados alcalinamente mediante hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na₂SiO₃)*”

7.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo experimental, porque usa el método de comprobación y verificación de los datos de resistencias a la compresión por relaciones de 5,8,15 y 30 por ciento de ladrillo activado alcalinamente “geopolímero de residuos de ladrillo de arcilla” evaluado en tiempos de curado de 3,7,14 y 28 días y compactados a una misma densidad y humedad, para contestar la pregunta de investigación relacionada con el mejoramiento de un suelo arcilloso, mediante la manipulación de materiales por parte del investigador in-situ o en laboratorio y determinar la relación en porcentaje que mejor resistencia a la compresión tenga y pueda ser usada en el mejoramiento de suelos en campo.

7.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

Considerando que la investigación plantea el estudio de un suelo típico de la sabana de Bogotá, la población es infinita puesto que es una característica amplia e incontable de forma directa.

La muestra se define como probabilística, puesto que se escoge un tipo dentro de muchos suelos, en esta investigación se trabajará con muestras de arcillas blandas tomadas de una zona de la formación sabana de Bogotá, caracterizada geotécnicamente dentro del mapa de zonificación geotécnica de Bogotá.

7.4 DEFINICIÓN Y OPERACIÓN DE VARIABLES

Tabla 5 Definición y operación de variables.

| - | Variable | Indicador | Descripción | Medición |
|----------------------|---|-------------------------|--|----------------------------|
| Independiente | Aplicación del geopolímero en el suelo. | Cantidad de geopolímero | Se prepararán diferentes cuerpos de prueba, a una misma densidad y humedad de compactación con dosificaciones de precursor + suelo en donde solo variará la cantidad de material precursor (residuos de ladrillo de arcilla) en suelo empleado. | 3%, 5%, 8%, y 15% de peso. |

| | | | | |
|----------------------|-------------------------------------|---|--|---|
| Independiente | Curado geopolímero + suelo. | Tiempo de curado de la mezcla. | Se evaluará el curado (temperatura ambiente) en diferentes periodos de tiempo con el fin de observar su variabilidad en transcurso del mismo, para el caso de cada una de las dosificaciones. | 3,7,14 y 28 días. |
| Dependiente | Comportamiento suelo + geopolímero. | Resistencia a la compresión inconfiada. | Mediante ensayo de compresión inconfiada de cada cuerpo de prueba de diferente proporción, se escogerá la de mejor propiedad mecánica, para su posible aplicación en el mejoramiento de suelos blandos típicos de la formación sabana de Bogotá. | kPa, kg/cm ² , kN/m ² . |

Fuente: Propio

7.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Se aplicó la normativa del INVIAS-2013 para la caracterización física y mecánica del suelo siguiendo los parámetros establecidos en la misma, ver Tabla 4.

7.6 FASES DE INVESTIGACIÓN

FASE 1: Caracterizar un suelo típico de la formación sabana de Bogotá.

Actividad 1: Exploración para la obtención y muestreo de un suelo típico de la formación sabana de Bogotá en un punto específico de la ciudad donde se puedan obtener muestras o testigos de suelos blandos arcillosos de origen lacustre, esta ubicación se realizó con base en el mapa de zonificación geotécnica de la ciudad de Bogotá Figura 3, establecido en el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá, decreto 523 de diciembre 16 de 2010 y describir su especificidad para la zona de estudio.

Actividad 2: Extracción inicial del material y toma de muestras alteradas e inalteradas que permita la caracterización de una arcilla blanda típica de la formación sabana de Bogotá.

Actividad 3: Extracción final del material y toma de muestras alteradas e inalteradas que permita la caracterización física y mecánica de los suelos y la toma de los testigos representativos

Actividad 4: Elaboración de los ensayos de laboratorio para la caracterización física y mecánica de los suelos.

FASE 2: Definición de dosificación de solución activadora de hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3) que permita llevar a una humedad de compactación constante cada uno de los cuerpos de prueba.

FASE 3: Fabricación de cuerpos de prueba con diferentes proporciones de residuos de ladrillo de arcilla, compactados a una misma densidad y humedad, mediante una solución alcalina,

Actividad 1: Determinar la humedad óptima, densidad máxima y tamaño de la partícula de ladrillo para la mezcla suelo-residuos de ladrillo de arcilla para la fabricación de las probetas.

Actividad 2: Fabricación de 60 probetas con material de residuos de ladrillo de arcilla en dosificaciones de 3%, 5%, 8%, 15% y 30% y suelo, activados alcalinamente mediante solución de hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3), compactados a una densidad y humedad constante de ladrillo.

FASE 4: Evaluación de la resistencia a la compresión inconfiada de suelo-residuos de ladrillo de arcilla activados alcalinamente.

Actividad 1: Evaluación de la resistencia a la compresión inconfiada en tiempos de 3, 7, 14 y 28 días para cada uno de los porcentajes de dosificación de geopolímero-suelo, aplicando la norma E-152-13 de INVIAS respecto a la resistencia a la compresión inconfiada.

Actividad 2: Obtención de la resistencia máxima a la compresión, teniendo en cuenta la relación de geopolímero en porcentaje de peso y los tiempos de curado.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO TÍPICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ

8.1.1 EXPLORACIÓN PARA LA OBTENCIÓN Y MUESTREO DE UN SUELO TÍPICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ

Inicialmente se tomó como referencia el mapa de zonificación geotécnica de Santafé de Bogotá Figura 3. El punto de ubicación de la extracción del material usado para la primera fase de investigación, corresponde a un lote predispuesto para la construcción de una edificación de 10 pisos en la localidad de Teusaquillo UPZ Galerías. La localización de la zona de estudio se describe en la Figura 4 en la cual se señala la ubicación exacta de la edificación en cuestión.

Figura 4 Localización zona de estudio Cr 24 # 50.



Fuente: [<https://www.google.com.co/maps/@4.6393748,-74.0747864,207m/data=!3m1!1e3?hl=es>] ¹⁹.

Teniendo en cuenta la intencionalidad del estudio es necesario especificar la zonificación geotécnica de la zona de muestreo, la cual corresponde a un suelo de tipo “arcilla blanda” de acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano²⁰, se

¹⁹ Google. (s.f.). [Mapa de Bogotá, Colombia en Google maps]. Recuperado el 8 de abril de 2017, de: <https://www.google.com.co/maps/@4.6393748,-74.0747864,207m/data=!3m1!1e3?hl=es>

²⁰ Servicio Geológico Colombiano. Op. cit., p 28.

consideró como un suelo típico de la formación sabana de Bogotá como se muestra en la Figura 5.

Figura 5 Ubicación en el mapa de zonificación geotécnica, zona de extracción.



Fuente: Servicio geológico Colombiano. www.sgc.gov.co.²¹

8.1.2 EXTRACCIÓN INICIAL DEL MATERIAL Y DESCRIPCIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO

Inicialmente se obtuvo una pequeña cantidad de suelo de la zona identificada en el mapa de zonificación sísmica²², su conservación se realizó utilizando una bolsa plástica hermética con el fin de conservar las condiciones de humedad inicial del suelo. Posteriormente se realizó un primer procedimiento que consistió en una inspección visual y manual para identificar el tipo de suelo obtenido, esta identificación se realizó de acuerdo con la Norma I.N.V. E-102-13.

Los resultados de la muestra analizada en laboratorio determinaron que el tipo de suelo extraído de la zona en estudio corresponde a una arcilla magra de color grisáceo con presencia de betas amarillas y algunas marrón, olor similar a tierra

²¹ Ibid., p 38.

²² Ibid., p 38.

húmeda, condición de humedad húmeda, consistencia muy blanda, resistencia seca muy alta, tenacidad alta, plasticidad alta y dilatación nula a lenta, Tabla 6.

Tabla 6 Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual).

| NORMA INV E - 102 - 13 | | |
|---|---|---|
| DESCRIPCIÓN E IDENTIFICACION DE SUELOS (PROCEDIMIENTO VISUAL Y MANUAL) | | |
| Color | Generalmente gris con presencia de betas amarillas y algunas marrón. |  |
| Olor | Característico de un suelo orgánico, con un ligero olor a tierra húmeda. | |
| Condición de humedad | Húmeda pero sin agua visible. |  |
| Consistencia | Muy blanda: El dedo pulgar penetra en el suelo más de 25 mm. |  |
| Resistencia Seca | Muy alta: Pues la muestra no se puede romper al aprisionarla con el pulgar sobre una superficie dura. |  |

| | | |
|--------------------|---|--|
| Dilatación | Nula a lenta: Pues el agua aparece lentamente en la superficie de la muestra al sacudirla, pero no desaparece o lo hace lentamente al apretarla. |  |
| Tenacidad | Alta: Pues se requiere una presión considerable para formar rollitos cerca del límite plástico. Los rollitos y los terrones tienen muy alta tenacidad. |  |
| Plasticidad | Alta: Toma un tiempo considerable formar rollos y remodelarlos para alcanzar el límite plástico, pero la muestra se puede volver a enrollar varias veces después de alcanzar el límite plástico. Se pueden formar terrones sin que se desmoronen cuando tienen una humedad inferior al límite plástico. |  |

Fuente: Propio

8.1.2.1 CONDICIÓN DE HUMEDAD

La condición de humedad se realizó con una pequeña cantidad de la muestra de suelo, con la finalidad de realizar una inspección visual y manual, observando que el espécimen no presenta agua aparente pero tampoco se encuentra totalmente seco, por lo que se le describió como una muestra húmeda, de acuerdo a la Tabla 7.

Tabla 7 Condición de humedad

| DESCRIPCIÓN | CRITERIOS |
|-----------------|--|
| Seca | Ausencia de humedad, polvorosa, seca al tacto. |
| Húmeda | Húmeda pero sin agua visible. |
| Saturada | Agua libre visible; generalmente bajo el nivel freático. |

Fuente: norma I.N.V. E-102-13.²³

Figura 6 Ensayo de humedad



Fuente: Propio

8.1.2.2 CONSISTENCIA

Para la determinación de la consistencia se trabajó con una porción de suelo lo suficientemente grande como para penetrar el dedo pulgar en ella, observando que el dedo pulgar se introdujo más de 2.5 cm, de acuerdo a la Tabla 8 su consistencia es blanda.

²³ NORMA INVIAS. Sección 100 – suelos. I.N.V.E – 102. Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual). 2013. p. E102- 10. .

Tabla 8 Criterios para describir la consistencia

| DESCRIPCIÓN | CRITERIOS |
|-------------------|---|
| Muy blanda | El dedo pulgar penetra en el suelo más de 25 mm |
| Blanda | El dedo pulgar penetra aproximadamente 25 mm |
| Firme | El dedo pulgar deja una marca de unos 6 mm |
| Dura | El dedo pulgar no deja marca, pero sí lo penetra la uña |
| Muy dura | La uña del pulgar no hace mella en el suelo |

Fuente: norma I.N.V. E-102-13.²⁴

Figura 7 Ensayo de consistencia



Fuente: Propio

8.1.2.3 RESISTENCIA SECA

Para la determinación de la resistencia seca se escogió una porción de material que fuera lo suficientemente grande como para formar una esfera de 25 mm de diámetro de la cual se formaron tres esferas de 12.5 mm de diámetro, estas fueron secadas a temperatura ambiente por 72 horas, una vez secas se sometieron a una carga no mayor a la ejercida por la yema de los dedos, observando que esta carga era insuficiente como para romperlas, por lo que se optó por apoyar las esferas sobre

²⁴ NORMA INVIAS. Sección 100 – suelos. I.N.V.E – 102. Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual). 2013. p. E102- 11.

una superficie dura y ejerciendo carga con la palma de la mano sin evidenciar algún cambio aparente, de acuerdo a la Tabla 9 su resistencia es muy alta ya que no se rompió con la carga ejercida por la yema de los dedos.

Tabla 9 Criterios para describir la resistencia seca.

| DESCRIPCIÓN | CRITERIOS |
|--------------------|---|
| Nula | La muestra se desmorona bajo la simple manipulación. |
| Baja | La muestra seca se desmorona hasta pulverizarse con ligera presión de los dedos. |
| Mediana | La muestra seca se rompe en fragmentos o se desmorona bajo una presión considerable de los dedos. |
| Alta | La muestra seca no se rompe con la presión de los dedos, pero se romperá al aprisionarla con el pulgar sobre una superficie dura. |
| Muy alta | La muestra no se puede romper al aprisionarla con el pulgar sobre una superficie dura. |

Fuente: norma I.N.V. E-102-13²⁵.

²⁵ NORMA INVIAS. Sección 100 – suelos. I.N.V.E – 102. Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual). 2013. p. E102- 15.

Figura 8 Ensayo de resistencia seca.



Fuente: Propio

8.1.2.4 DILATANCIA

Para determinar la dilatancia se moldeó una esfera de 12.5 mm de diámetro, se le agregó a la muestra de suelo pequeñas cantidades de agua con el fin de obtener una consistencia blanda pero no pegajosa, posteriormente se aplano en la palma de la mano y se agito, observando que el agua aparecía muy lentamente y que al apretarla desaparecía igualmente muy lentamente, de acuerdo a la Tabla 10 su dilatancia está entre nula y lenta.

Tabla 10 Criterios para describir la dilatancia

| DESCRIPCIÓN | CRITERIOS |
|--------------------|---|
| Nula | No hay cambio visible en la muestra. |
| Lenta | El agua aparece lentamente en la superficie de la muestra al sacudirla, pero no desaparece o lo hace lentamente al apretarla. |
| Rápida | El agua aparece rápidamente sobre la superficie de la muestra mientras se la sacude y desaparece rápidamente al apretarla. |

Fuente: norma I.N.V. E-102-13.²⁶

²⁶ NORMA INVIAS. Sección 100 – suelos. I.N.V.E – 102. Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual). 2013. p. E102- 16.

Figura 9 Ensayo de dilatancia



Fuente: Propio

8.1.2.5 TENACIDAD Y PLASTICIDAD

Para determinar la tenacidad y la plasticidad se formaron royos de 3 mm de diámetro, en el caso de la tenacidad se debe identificar cuanta fuerza se requiere para formar dichos royos y para la plasticidad el tiempo que transcurre hasta que los royos de 3 mm se desmoronen, de acuerdo a la Tabla 11 y Tabla 12, la tenacidad y plasticidad son altas.

Tabla 11. Criterios para describir la tenacidad.

| DESCRIPCIÓN | CRITERIOS |
|--------------------|--|
| Baja | Solo se requiere ligera presión para formar rollitos cerca del límite plástico. Los rollitos y los terrones son débiles y blandos. |
| Mediana | Se requiere presión mediana para formar rollitos cerca del límite plástico. Los rollitos y los terrones tienen mediana tenacidad. |

| | |
|-------------|---|
| Alta | Se requiere una presión considerable para formar rollitos cerca del límite plástico. Los rollitos y los terrones tienen muy alta tenacidad. |
|-------------|---|

Fuente: norma I.N.V. E-102-13.²⁷

Figura 10 Ensayo de tenacidad



Fuente: Propio

Tabla 12. Criterios para describir la plasticidad.

| DESCRIPCIÓN | CRITERIOS |
|--------------------|---|
| No plástico | No se pueden formar rollitos de 3 mm de diámetro con ningún contenido de humedad. |
| Baja | Se pueden formar rollitos con dificultad y no se pueden formar terrones cuando el suelo tiene una humedad inferior al límite de plástico. |
| Media | Es fácil formar el rollito y el límite plástico se alcanza con rapidez. No se puede volver a enrollar la misma muestra después que alcanza el límite plástico. Los terrones se desmoronan cuando se secan por debajo del límite plástico. |

²⁷ NORMA INVIAS. Sección 100 – suelos. I.N.V.E – 102. Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual). 2013. p. E102- 17.

| | |
|-------------|---|
| Alta | Toma un tiempo considerable formar rollos y remodelarlos para alcanzar el límite plástico. Se pueden formar terrones sin que se desmoronen cuando tienen una humedad inferior al límite plástico. |
|-------------|---|

Fuente: norma I.N.V. E-102-13.²⁸.

Figura 11 Ensayo de plasticidad



Fuente: Propio

Figura 12 Ensayo de plasticidad



Fuente: Propio

²⁸ NORMA INVIAS. Sección 100 – suelos. I.N.V.E – 102. Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual). 2013. p. E102- 18.

8.1.3 EXTRACCIÓN FINAL Y CONSERVACIÓN DEL SUELO

La extracción del suelo se realizó por medio mecánico con maquina piloteadora a una profundidad entre 6 m- 9 m, se extrajo un total de 12 lonas de suelo, cuya conservación se realizó por medio de 2 bolsas plásticas al interior de cada una de las 12 lonas, para un total recolectado de 480 kg con promedio de 40 kg por lona.

8.1.4 CARACTERIZACIÓN FISICA Y MECANICA DEL SUELO

8.1.4.1 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LA PARTÍCULA DE SUELO, CON EL ENSAYO DE HIDROMETRÍA

La determinación del tamaño de la partícula de suelo se realizó aplicando la norma I.N.V. E-123-13, en donde el ensayo empleado para el análisis granulométrico consistió en el método del hidrómetro.

Tabla 13 Ensayo 1 de hidrometría de suelo.

| Fecha | Hora de la lectura | Tiempo transcurrido en min | Temperatura °C | Lectura real del Hidrómetro Rc | Lectura corregida del Hidrómetro Rc | % fino | Hidrómetro corregido por menisco R | L | L / t | K | D, mm |
|------------|--------------------|----------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------|------------------------------------|------|---------|--------|-------|
| - | - | - | - | - | - | 100.0 | - | - | - | - | - |
| 20/07/2017 | 15:30 | 0 | 18 | 48 | 42.5 | 94.1 | 49 | 8.3 | 83.0000 | 0.0148 | 0.135 |
| 20/07/2017 | 15:32 | 2 | 18 | 44 | 38.5 | 85.3 | 45 | 8.9 | 4.4500 | 0.0148 | 0.031 |
| 20/07/2017 | 15:35 | 5 | 18 | 41 | 35.5 | 78.6 | 42 | 9.4 | 1.8800 | 0.0148 | 0.020 |
| 20/07/2017 | 15:45 | 15 | 18 | 38 | 32.5 | 72.0 | 39 | 9.9 | 0.6600 | 0.0148 | 0.012 |
| 20/07/2017 | 16:00 | 30 | 18 | 35 | 29.5 | 65.3 | 36 | 10.4 | 0.3467 | 0.0148 | 0.009 |
| 20/07/2017 | 16:30 | 60 | 19 | 33 | 27.7 | 61.4 | 34 | 10.7 | 0.1783 | 0.0145 | 0.006 |
| 20/07/2017 | 19:45 | 250 | 19 | 24 | 18.7 | 41.4 | 25 | 12.2 | 0.0488 | 0.0145 | 0.003 |
| 21/07/2017 | 10:30 | 1440 | 18 | 17 | 11.5 | 25.5 | 18 | 13.3 | 0.0092 | 0.0148 | 0.001 |

Fuente: Propio

Tabla 14 Ensayo 2 de hidrometría suelo.

| Fecha | Hora de la lectura | Tiempo transcurrido en min | Temperatura °C | Lectura real del Hidrómetro Rc | Lectura corregida del Hidrómetro Rc | % fino | Hidrómetro corregido por menisco R | L | L / t | K | D, mm |
|------------|--------------------|----------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------|------------------------------------|------|---------|--------|-------|
| - | - | - | - | - | - | 100.0 | - | - | - | - | - |
| 20/07/2017 | 15:30 | 0 | 18 | 48 | 42.5 | 94.1 | 49 | 8.3 | 83.0000 | 0.0148 | 0.135 |
| 20/07/2017 | 15:32 | 2 | 18 | 44 | 38.5 | 85.3 | 45 | 8.9 | 4.4500 | 0.0148 | 0.031 |
| 20/07/2017 | 15:35 | 5 | 18 | 41 | 35.5 | 78.6 | 42 | 9.4 | 1.8800 | 0.0148 | 0.020 |
| 20/07/2017 | 15:45 | 15 | 18 | 38 | 32.5 | 72.0 | 39 | 9.9 | 0.6600 | 0.0148 | 0.012 |
| 20/07/2017 | 16:00 | 30 | 18 | 35 | 29.5 | 65.3 | 36 | 10.4 | 0.3467 | 0.0148 | 0.009 |
| 20/07/2017 | 16:30 | 60 | 19 | 33 | 27.7 | 61.4 | 34 | 10.7 | 0.1783 | 0.0145 | 0.006 |
| 20/07/2017 | 19:45 | 250 | 19 | 24 | 18.7 | 41.4 | 25 | 12.2 | 0.0488 | 0.0145 | 0.003 |
| 21/07/2017 | 10:30 | 1440 | 18 | 17 | 11.5 | 25.5 | 18 | 13.3 | 0.0092 | 0.0148 | 0.001 |

Fuente: Propio

Tabla 15 Ensayo 3 de hidrometría de suelo.

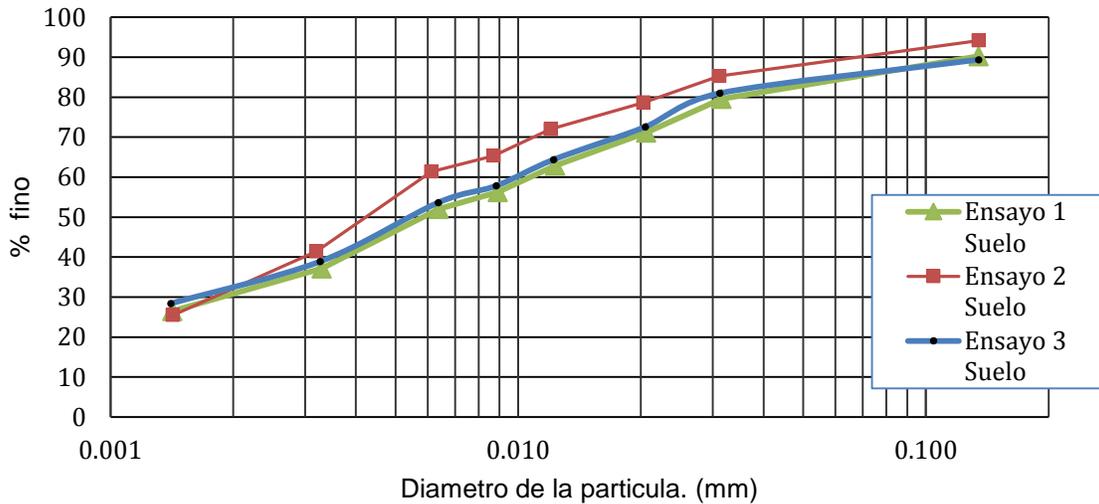
| Fecha | Hora de la lectura | Tiempo transcurrido en min | Temperatura °C | Lectura real del Hidrómetro Rc | Lectura corregida del Hidrómetro Rc | % fino | Hidrómetro corregido por menisco R | L | L / t | K | D, mm |
|------------|--------------------|----------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------|------------------------------------|------|---------|--------|-------|
| - | - | - | - | - | - | 100.0 | - | - | - | - | - |
| 20/07/2017 | 15:25 | 0 | 18 | 48 | 42.5 | 89.4 | 49 | 8.3 | 83.0000 | 0.0148 | 0.135 |
| 20/07/2017 | 15:27 | 2 | 18 | 44 | 38.5 | 81.0 | 45 | 8.9 | 4.4500 | 0.0148 | 0.031 |
| 20/07/2017 | 15:30 | 5 | 18 | 40 | 34.5 | 72.6 | 41 | 9.6 | 1.9200 | 0.0148 | 0.021 |
| 20/07/2017 | 15:40 | 15 | 18 | 36 | 30.6 | 64.4 | 37 | 10.2 | 0.6800 | 0.0148 | 0.012 |
| 20/07/2017 | 15:55 | 30 | 18 | 33 | 27.5 | 57.8 | 34 | 10.7 | 0.3567 | 0.0148 | 0.009 |
| 20/07/2017 | 16:25 | 60 | 18 | 31 | 25.5 | 53.6 | 32 | 11.1 | 0.1850 | 0.0148 | 0.006 |
| 20/07/2017 | 19:40 | 250 | 18 | 24 | 18.5 | 38.9 | 25 | 12.2 | 0.0488 | 0.0148 | 0.003 |
| 21/07/2017 | 10:25 | 1440 | 18 | 19 | 13.5 | 28.4 | 20 | 13 | 0.0090 | 0.0148 | 0.001 |

Fuente: Propio

La norma se refiere a la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de partículas del material utilizado para el ensayo por un proceso de sedimentación empleando el hidrómetro.

Se observó en la Figura 13 que la variación entre los ensayos fue mínima, el tamaño de las partículas varía entre 0.15 mm a 1.5 μm . El porcentaje de finos (partículas de diámetro menor a los 0.076 mm) se encontraba en el rango del 90% - 85%, y de partículas menores a 2 μm entre el 30% al 35%.

Figura 13 Curva de granulometría del suelo.



Fuente: Propio

8.1.4.2 DETERMINACION DEL LIMITE DE CONSISTENCIA DEL SUELO

La determinación del límite de consistencia se realizó con la norma I.N.V. E-125-13 para la presente investigación se realizaron tres ensayos para su determinación, se trabajó con una muestra de 200 g para realizar el límite líquido y límite plástico; la determinación del límite líquido se realizó graficando tres puntos como se observa en la Figura 14, Figura 15 y Figura 16, el primer punto superior, el segundo igual y

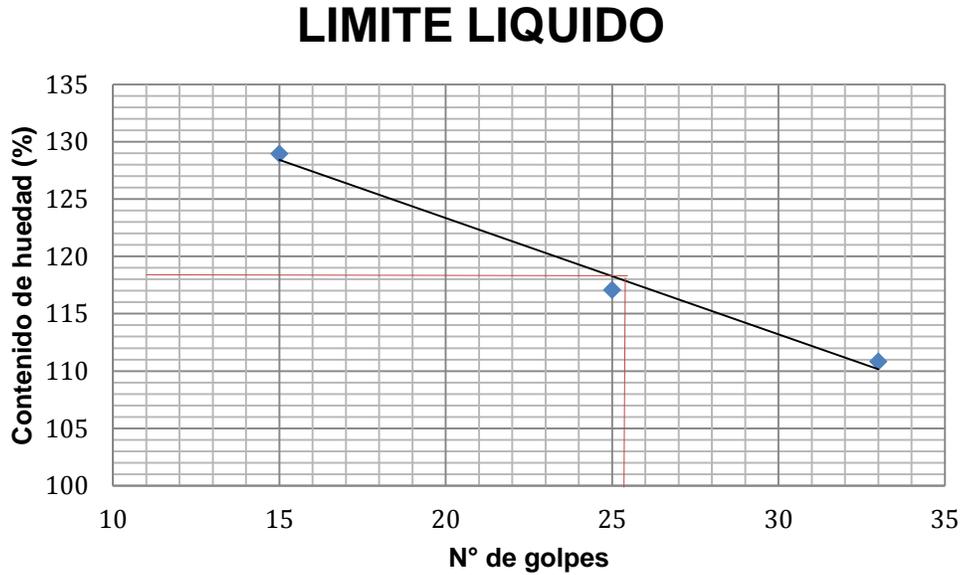
el tercero inferior a los 25 golpes, el límite líquido es considerado como el porcentaje de humedad de la muestra de suelo a los 25 golpes; el límite plástico es considerado como el porcentaje de humedad de la muestra, cuando se forman royos de 3 mm de diámetro hasta el punto de que los mismos se quiebren.

Tabla 16 Ensayo 1 de límite de consistencia.

| - | LÍMITE LÍQUIDO | | | LÍMITE PLÁSTICO | |
|-------------------------------------|----------------|--------|--------|-----------------|-------|
| | | | | | |
| Tara | 5 | L71 | L54 | L86 | L91 |
| N de golpes | 15 | 25 | 33 | 0 | 0 |
| Peso tara (g) | 19.50 | 18.80 | 11.40 | 18.80 | 17.70 |
| Peso Tara + Suelo Húmedo (g) | 28.20 | 27.70 | 27.00 | 29.00 | 26.80 |
| Peso Tara + Muestra Seca (g) | 23.30 | 22.90 | 18.80 | 26.60 | 24.70 |
| Peso del Agua (g) | 4.90 | 4.80 | 8.20 | 2.40 | 2.10 |
| Peso Suelo Seco (g) | 3.80 | 4.10 | 7.40 | 7.80 | 7.00 |
| Contenido de Humedad (%) | 128.95 | 117.07 | 110.81 | 30.77 | 30.00 |

Fuente: Propio

Figura 14 Grafica de ensayo 1 de límite de consistencia.



Fuente: Propio

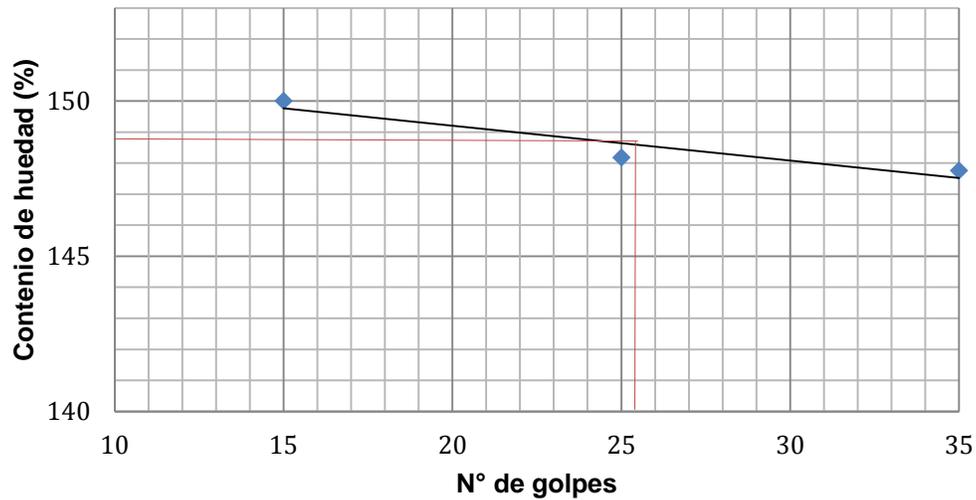
Tabla 17 Ensayo 2 de límite de consistencia.

| - | LÍMITE LÍQUIDO | | | LÍMITE PLÁSTICO | |
|------------------------------|----------------|--------|--------|-----------------|-------|
| | L83 | L46 | L67 | 3 | L49 |
| Tara | | | | | |
| N de golpes | 15 | 25 | 35 | 0 | 0 |
| Peso tara (g) | 18.30 | 18.80 | 19.01 | 11.20 | 19.10 |
| Peso Tara + Suelo Húmedo (g) | 29.30 | 32.40 | 28.40 | 22.30 | 30.80 |
| Peso Tara + Muestra Seca (g) | 22.70 | 24.28 | 22.80 | 19.20 | 27.70 |
| Peso del Agua (g) | 6.60 | 8.12 | 5.60 | 3.10 | 3.10 |
| Peso Suelo Seco (g) | 4.40 | 5.48 | 3.79 | 8.00 | 8.60 |
| Contenido de Humedad (%) | 150.00 | 148.18 | 147.76 | 38.75 | 36.05 |

Fuente: Propio

Figura 15 Grafica ensayo 2 de límite de consistencia.

LÍMITE LÍQUIDO



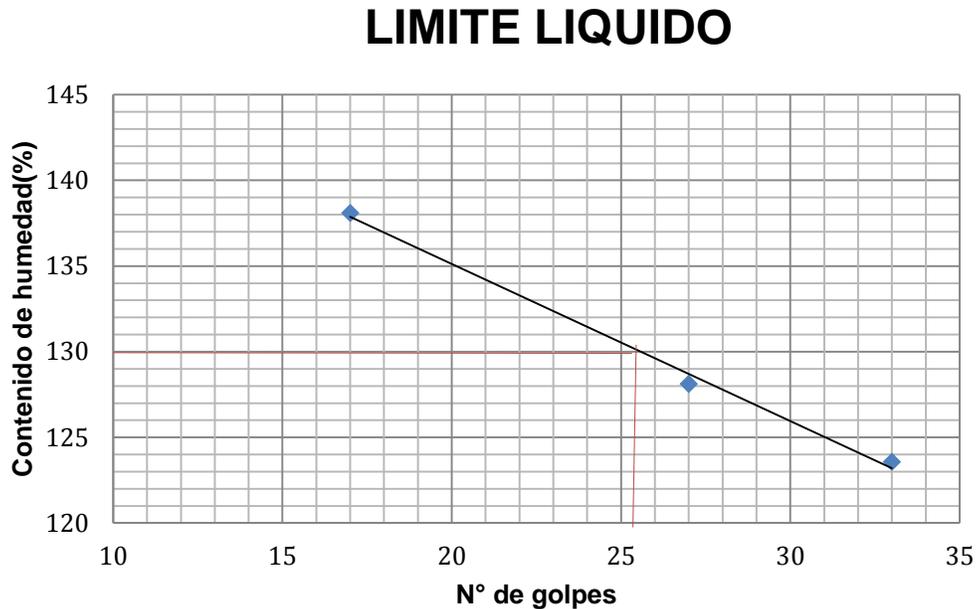
Fuente: Propio

Tabla 18 Ensayo 3 de límite de consistencia.

| | LÍMITE LÍQUIDO | | | LÍMITE PLÁSTICO | |
|------------------------------|----------------|--------|--------|-----------------|-------|
| | L12 | 31 | 198 | 12 | 43 |
| Tara | 17 | 27 | 33 | 0 | 0 |
| N de golpes | 20.01 | 19.40 | 18.30 | 14.50 | 17.80 |
| Peso tara (g) | 27.01 | 26.70 | 23.80 | 20.70 | 24.30 |
| Peso Tara + Suelo Húmedo (g) | 22.95 | 22.60 | 20.76 | 19.20 | 22.84 |
| Peso Tara + Muestra Seca (g) | 4.06 | 4.10 | 3.04 | 1.50 | 1.46 |
| Peso del Agua (g) | 2.94 | 3.20 | 2.46 | 4.70 | 5.04 |
| Peso Suelo Seco (g) | 138.10 | 128.13 | 123.58 | 31.91 | 28.97 |
| Contenido de Humedad (%) | | | | | |

Fuente: Propio

Figura 16 Grafica ensayo 3 límite de consistencia.



Fuente: Propio

La Tabla 19 muestra el porcentaje de humedad del límite líquido (LL) a los 25 golpes de cada uno de los ensayos y el límite plástico (LP) como el promedio del porcentaje de humedad del mismo, el índice de plasticidad es la resta directa de LL y LP.

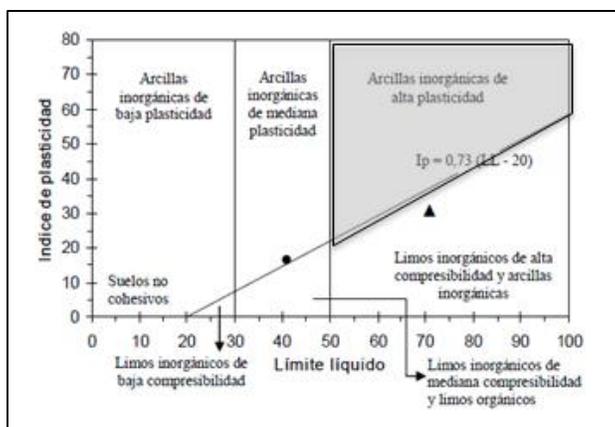
Tabla 19 Índice de plasticidad

| LIMITE LIQUIDO | | LIMITE PLASTICO | | INDICE PLASTICO | |
|----------------|------|-----------------|-----|-----------------|------|
| LL: | 130% | LP: | 30% | IP: | 100% |

Fuente: Archivo propio

De acuerdo a la Figura 17 se puede observar que el suelo estudiado corresponde a una arcilla de alta plasticidad (CH) ya que posee valores de LL superiores al 50% y un índice de plasticidad superior al 20% de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Figura 17 Diagrama de Casagrande



Fuente: T. William Lambe, *Mecánica de Suelos*²⁹

8.1.4.3 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y DENSIDAD MÁXIMA POR ENSAYO DE COMPACTACIÓN “PROCTOR MODIFICADO” DEL SUELO

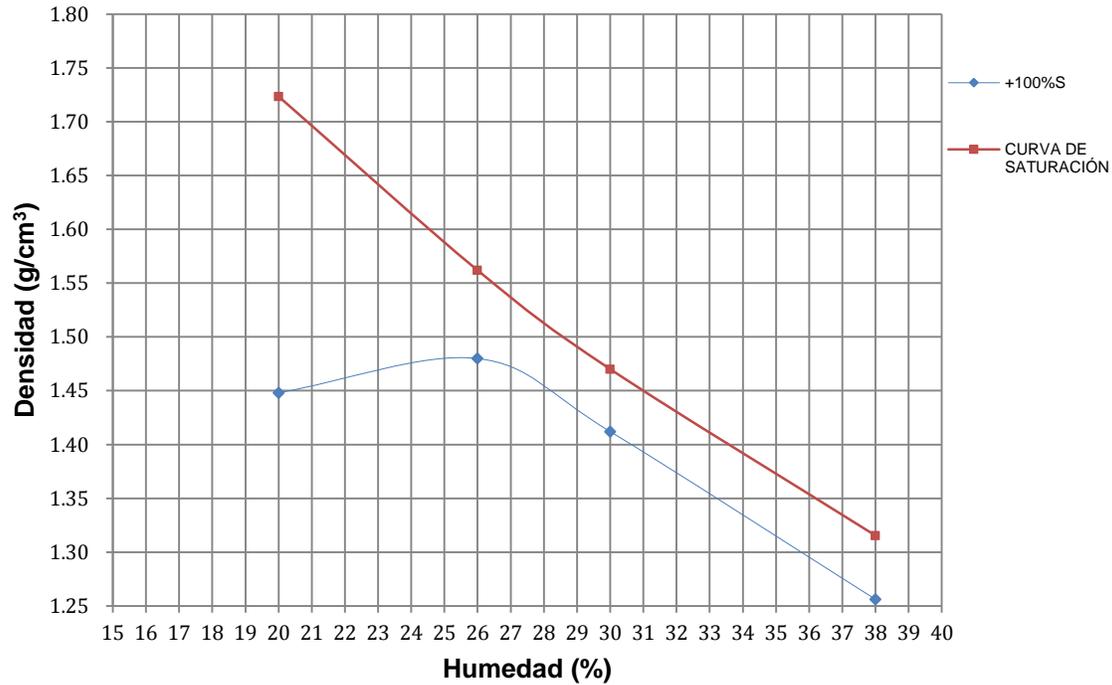
La norma I.N.V. E-142-13 se emplea para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de un suelo mediante una curva de compactación, se emplearon 4 puntos como se muestra en la Figura 18.

El suelo fue almacenado dentro de bolsas herméticas con cada uno de los porcentajes de humedad teórica durante un periodo de 24 horas para que el agua fuera absorbida por el suelo; posterior a esto se inició con el ensayo compactando el suelo con un martillo en tres diferentes capas dentro del mismo molde, este proceso se realizó para cada una de las bolsas las cuales representan un punto en la curva de compactación Figura 18.

²⁹ T. William Lambe, *Mecánica de Suelos. Naturaleza del suelo. En: Mecánica suelos*. Editorial Limusa S.A. De C.V., 2004. p. 39-109.

Figura 18 Curva de compactación del suelo.

COMPACTACIÓN PROCTOR



Fuente: Propio

La curva de compactación muestra un punto máximo en el eje Y amarrado a un valor en el eje X, Y es igual a la densidad máxima y X es igual a la humedad óptima cuyos valores corresponden a 26% de humedad óptima y 1.48 g/cm³ de densidad máxima.

8.1.4.4 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SUELO

La determinación de la resistencia del suelo se realizó siguiendo los parámetros de la norma I.N.V. E-152-13 ensayo para la determinación de la resistencia por compresión inconfiada, se evaluaron tres muestras de suelo, extraídas en campo

por medio de un tubo de 3 pulgadas de diámetro con la finalidad de mantener inalterada la muestra.

La muestra fue envuelta con papel vinipel y conservada dentro del tubo para conservar su humedad natural y mantenerla intacta hasta el momento de realizar el ensayo, la Tabla 20 muestra el porcentaje de humedad de las muestras estudiadas para el presente ensayo.

Tabla 20 Porcentaje de humedad natural

| Humedad Natural | |
|-----------------|---------|
| Muestra | Humedad |
| 1 | 130% |
| 2 | 136% |
| 3 | 139% |

Fuente: Propio

La determinación de la resistencia se realiza con la gráfica esfuerzo vs deformación en donde la deformación se da en % de deformación y el esfuerzo igual a la carga aplicada sobre el área superior de la probeta de suelo extraída inalteradamente; la Tabla 21 muestra las características de cada una de las probetas empleadas para determinación de resistencia del suelo.

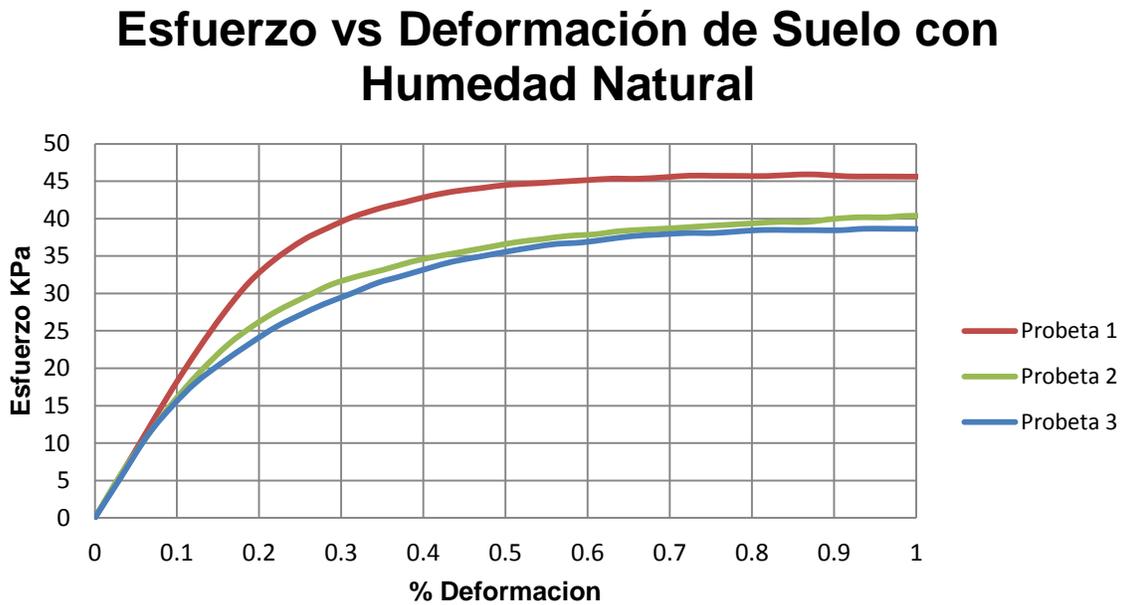
Tabla 21 Probetas de Suelo

| Probetas de suelo | | | |
|-------------------|---------------|-------------|----------|
| Muestra | Diametro (cm) | Altura (cm) | Peso (g) |
| 1 | 7.60 | 15.90 | 1,206.60 |
| 2 | 7.60 | 15.60 | 1,176.01 |
| 3 | 7.60 | 16.00 | 1,190.30 |

Fuente: Propio

La Figura 19 muestra los tres ensayos de resistencia de cada una de las probetas extraídas del terreno, en la cual se pudo observar que el valor de la resistencia se encuentra entre 38 KPa – 48 KPa.

Figura 19 Graficas de resistencia a la compresión inconfiada del Suelo.



Fuente: Propio

8.2 OBTENCIÓN DE LOS RESIDUOS DE LADRILLO DE ARCILLA (RLA), Y PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DEL RLA

El material de residuo de ladrillo de arcilla (RLA), fue tomado de la ladrillera La Sabana, junto con los residuos se encontró contenido de material orgánico. El RLA fue sometido a un proceso de lavado para eliminar la presencia del material orgánico.

Posterior al lavado del material, este fue llevado a un secado en horno a una temperatura de 60°C considerando la posible alteración de las propiedades del material sí es sometido a una temperatura mayor a esta. Luego del secado se realizó una selección y acumulación del material, después de lo cual, el material fue llevado a un proceso de trituración en la máquina de los ángeles, con el propósito de llevar la partícula del RLA a un tamaño de 0.074 mm o menor a este, dado a la dosificación necesaria para la realización del ensayo modificado de compactación I.N.V.E-142-13 (Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación)) al material Suelo – RLA y los respectivos ensayos de caracterización, la determinación del tamaño de partículas por el ensayo de hidrometría I.N.V.E-123-13 (determinación del tamaño de partículas de los suelos), como la realización de los ensayos de caracterización mineralógica de los RLA mediante el ensayo de fluorescencia de Rayos X (FRX).

8.2.1 DETERMINACIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LOS RLA MEDIANTE EL ENSAYO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)

Se realizó el ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX) para el material de RLA, desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia, en uno de los laboratorios en el área de Geociencias, los datos proporcionados por el laboratorio se encuentran en la tabla 22.

Tabla 22 Resultados de ensayo FRX.

| Elemento y/o compuesto | RLA (% en peso) |
|---|------------------------|
| <i>SiO₂</i> | 68,08% |
| <i>Al₂O₃</i> | 21,73% |
| <i>Fe₂O₃</i> | 6,03% |
| <i>K₂O</i> | 1,59% |

| | |
|-----------------------------------|---------|
| TiO₂ | 0,93% |
| MgO | 0,66% |
| Na₂O | 0,27% |
| CaO | 0,21% |
| P₂O₅ | 0,14% |
| Ba | 0,10% |
| SO₃ | 0,06% |
| V | 0,03% |
| MnO | 0,03% |
| Zn | 0,03% |
| Zr | 0,03% |
| Ce | 0,02% |
| Cr | 139 ppm |
| Cl | 129 ppm |
| Sr | 113 ppm |
| Rb | 90 ppm |
| Pb | 63 ppm |
| Y | 51 ppm |
| Cu | 45 ppm |
| Nb | 13 ppm |

Fuente: Universidad Nacional de Colombia. Resultados Ensayo de fluorescencia de Rayos X.

Con base a los resultados obtenidos en el ensayo de fluorescencia de Rayos X, proporcionados por la universidad Nacional de Colombia, se encontró un alto contenido de Aluminio - silicatos en un % del 89,81.

8.3 FABRICACIÓN DE PROBETAS CON MATERIAL DE LADRILLO ACTIVADO ALCALINAMENTE.

8.3.1 DETERMINAR LA HUMEDAD ÓPTIMA, DENSIDAD MÁXIMA Y TAMAÑO DE LA PARTÍCULA DE LADRILLO

8.3.1.1 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD ÓPTIMA Y DENSIDAD MAXIMA MEZCLA SUELO - RLA POR ENSAYO DE COMPACTACIÓN (PROCTOR MODIFICADO).

Inicialmente se realizó el ensayo modificado de compactación I.N.V.E–142–13 (Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación)), al material suelo – ladrillo, cabe agregar que la mezcla de los dos materiales suelo – ladrillo se realizó con el objetivo de encontrar la humedad óptima y la densidad máxima de dicho material, dado que es el material inicial para la fabricación de las muestras que fueron empleadas para la evaluación de la resistencia suelo – geopolímero.

La norma I.N.V.–142–13 cuenta con 3 métodos de ensayo empleados para la determinación de la relación entre la humedad-peso unitario seco del material³⁰ como se muestra en la Tabla 23, obteniendo una curva de compactación, que facilita la obtención del valor según el método gráfico (humedad óptima vs peso unitario seco), el procedimiento, así mismo, cuenta con ciertos parámetros para la buena y correcta aplicación del ensayo que se realiza a la muestra, en el caso del material suelo–ladrillo fue empleado el molde de 152,4 mm (6”) de diámetro junto con el martillo de 44,48N (10lbf), el cual cae libremente desde una altura de 457,2 mm (18”), produciendo una energía de compactación aproximada de 2700kN – m/m³ (56000 lbf – pie/pie³)³¹.

³⁰ NORMA INVIAS. Sección 100 – suelos. I.N.V.E – 142. Relaciones humedad – Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación). 2013. p. E 142 – 1.

³¹ *Ibíd.*, p. 4.

El método empleado se escogió en función de la granulometría del material suelo – RLA, optando por el método C para realizar el ensayo modificado de compactación, ya que el tamaño de la partícula del material es inferior a los $\frac{3}{4}$.

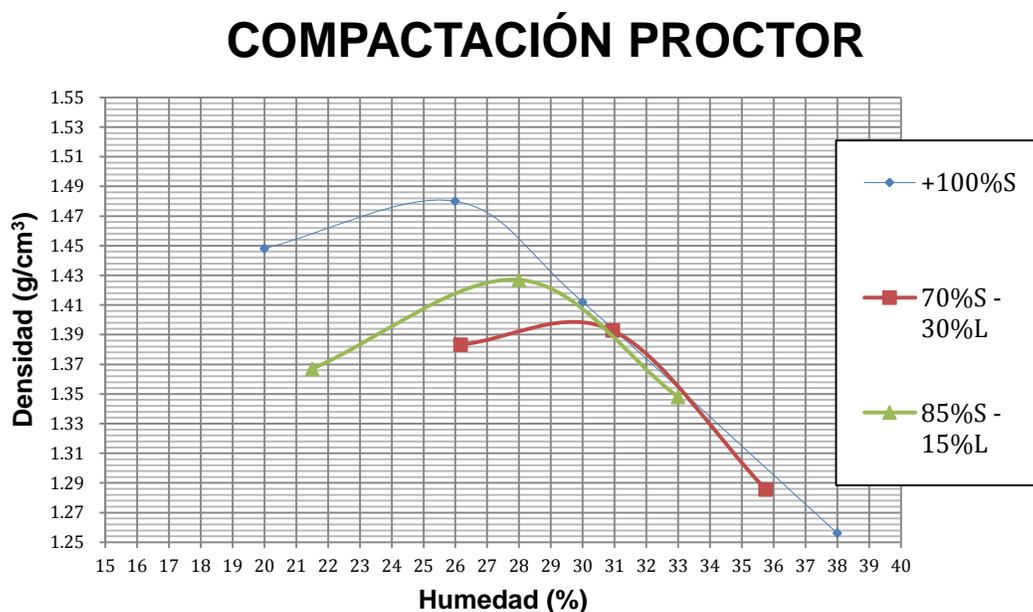
Tabla 23 Métodos para realizar ensayo modificado de compactación.

| METODO | A | B | C |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| DIAMETRO DEL MOLDE | 101.6mm(4") | 101,6mm(4") | 152,4 mm (6") |
| MATERIAL | Pasa tamiz de 4.75mm (N°4) | Pasa tamiz de 9.5 mm(3/8") | Pasa tamiz de 19,0mm (3/4") |
| CAPAS | 5 | 5 | 5 |

Fuente: Norma I.N.V.E – 142 – 13. Tabla 142 -1. Métodos para realizar el ensayo modificado de compactación.

La Figura 20 permitió observar y analizar los valores obtenidos de humedad optima y peso unitario seco máximo, dando como resultado una humedad óptima 30% con un aumento del 4% de humedad en comparación al ensayo modificado de compactación del suelo (arcilla) realizado bajo los mismos parámetro y peso unitario seco de 1,4 gr/cm³.

Figura 20 Grafica de compactación de suelo-ladrillo



Fuente: Propio

8.3.1.2 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LA PARTICULA DE LADRILLO POR ENSAYO DE HIDROMETRIA

La realización del ensayo de granulometría para las partículas del material de ladrillo utilizado en el remoldeo de muestras para la evaluación de la resistencia de un suelo blando típico de la sabana de Bogotá tratado con un geopolímero de base arcillosa, se realiza a través del ensayo de hidrometría I.N.V.E–123-13 (determinación del tamaño de partículas de los suelos), ya que el tamaño de su partícula es menor a 75 micrómetros, según se ha citado, la norma se refiere a la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de partículas del material utilizado para el ensayo por un proceso de sedimentación empleando un hidrómetro³² como se muestra en la Tabla 24, Tabla 25 y Tabla 26.

³² NORMA INVIAS. Sección 100 – suelos. I.N.V.E – 123. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. 2013. p. E 123- 1.

Tabla 24 Ensayo 1 de hidrometría del ladrillo.

| Fecha | Hora de la lectura | Tiempo transcurrido en min | temperatura °C | Lectura real del Hidrometro R_o | Lectura corregida del Hidrometro R_c | % mas fino | Hidrometro corregido por menisco R | L de la tabla 6-5 | L / t | K de la tabla 6-4 | D, mm |
|------------|--------------------|----------------------------|----------------|-----------------------------------|--|------------|------------------------------------|-------------------|--------|-------------------|-------|
| 20/07/2017 | 15:25 | 0.1 | 18 | 47 | 46.5 | 87.1 | 48 | 8.6 | 86.000 | 0.014 | 0.128 |
| 20/07/2017 | 15:27 | 2 | 18 | 35 | 34.5 | 61.9 | 36 | 10.6 | 5.300 | 0.014 | 0.032 |
| 20/07/2017 | 15:32 | 5 | 18 | 31 | 30.5 | 53.5 | 32 | 11.2 | 2.240 | 0.014 | 0.021 |
| 20/07/2017 | 15:47 | 15 | 18 | 25 | 24.5 | 40.9 | 26 | 12.2 | 0.813 | 0.014 | 0.012 |
| 20/07/2017 | 16:17 | 30 | 18 | 22 | 21.5 | 34.6 | 23 | 12.7 | 0.423 | 0.014 | 0.009 |
| 20/07/2017 | 17:17 | 60 | 18 | 19 | 18.7 | 28.7 | 20 | 13.2 | 0.220 | 0.014 | 0.006 |
| 20/07/2017 | 21:27 | 250 | 18 | 14 | 13.7 | 18.3 | 15 | 7.8 | 0.031 | 0.014 | 0.002 |
| 20/07/2017 | 15:25 | 1440 | 18 | 9 | 8.5 | 7.3 | 10 | 14.8 | 0.010 | 0.014 | 0.001 |

Fuente: Propio

Tabla 25 Ensayo 2 de hidrometría del ladrillo.

| Fecha | Hora de la lectura | Tiempo transcurrido en min | temperatura °C | Lectura real del Hidrometro R_o | Lectura corregida del Hidrometro R_c | % mas fino | Hidrometro corregido por menisco | L de la tabla 6-5 | L / t | K de la tabla 6-4 | D, mm |
|------------|--------------------|----------------------------|----------------|-----------------------------------|--|------------|----------------------------------|-------------------|--------|-------------------|-------|
| 20/07/2017 | 15:25 | 0.1 | 19 | 48 | 42.7 | 88.9 | 49 | 8.4 | 84.000 | 0.014 | 0.125 |
| 20/07/2017 | 15:27 | 2 | 19 | 37 | 31.7 | 66.0 | 38 | 10.2 | 5.100 | 0.014 | 0.031 |
| 20/07/2017 | 15:32 | 5 | 19 | 34 | 28.7 | 59.8 | 35 | 10.7 | 2.140 | 0.014 | 0.020 |
| 20/07/2017 | 15:47 | 15 | 18 | 29 | 23.5 | 48.9 | 30 | 11.5 | 0.767 | 0.014 | 0.012 |
| 20/07/2017 | 16:17 | 30 | 18 | 25 | 19.5 | 40.6 | 26 | 12.2 | 0.407 | 0.014 | 0.009 |
| 20/07/2017 | 17:17 | 60 | 19 | 22 | 16.7 | 34.8 | 23 | 12.7 | 0.212 | 0.014 | 0.006 |
| 20/07/2017 | 21:27 | 250 | 19 | 16 | 10.7 | 22.3 | 17 | 7.8 | 0.031 | 0.014 | 0.002 |
| 20/07/2017 | 15:25 | 1440 | 19 | 10 | 4.5 | 9.4 | 11 | 14.7 | 0.010 | 0.014 | 0.001 |

Fuente: Propio

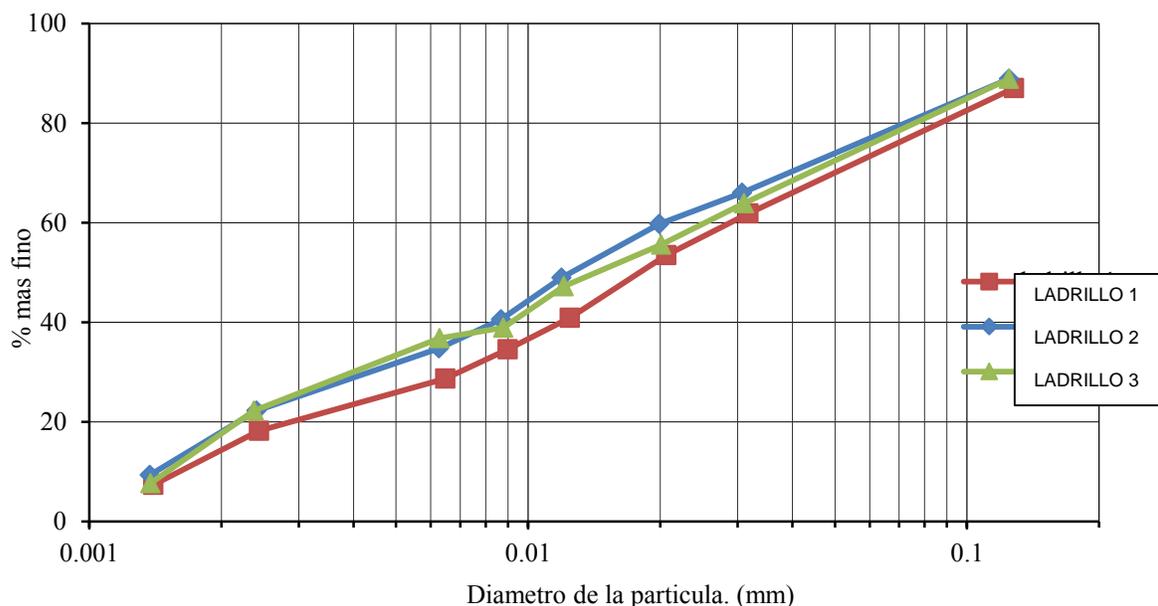
Tabla 26 Ensayo 3 de hidrometría del ladrillo.

| Fecha | Hora de la lectura | Tiempo transcurrido en min | temperatura °C | Lectura real del Hidrometro R_o | Lectura corregida del Hidrometro R_c | % mas fino | Hidrometro corregido por menisco R | L de la tabla 6-5 | L / t | K de la tabla 6-4 | D, mm |
|------------|--------------------|----------------------------|----------------|-----------------------------------|--|------------|------------------------------------|-------------------|--------|-------------------|-------|
| 20/07/2017 | 15:35 | 0.1 | 19 | 48 | 42.7 | 88.9 | 49 | 8.4 | 84.000 | 0.014 | 0.125 |
| 20/07/2017 | 15:37 | 2 | 19 | 36 | 30.7 | 63.9 | 37 | 10.4 | 5.200 | 0.014 | 0.031 |
| 20/07/2017 | 15:42 | 5 | 19 | 32 | 26.7 | 55.6 | 33 | 10.9 | 2.180 | 0.014 | 0.020 |
| 20/07/2017 | 15:57 | 15 | 18 | 28 | 22.7 | 47.3 | 29 | 11.8 | 0.787 | 0.014 | 0.012 |
| 20/07/2017 | 16:27 | 30 | 18 | 24 | 18.7 | 38.9 | 25 | 12.5 | 0.417 | 0.014 | 0.009 |
| 20/07/2017 | 17:27 | 60 | 18 | 23 | 17.7 | 36.9 | 24 | 12.8 | 0.213 | 0.014 | 0.006 |
| 20/07/2017 | 21:37 | 250 | 19 | 16 | 10.7 | 22.3 | 17 | 7.6 | 0.030 | 0.014 | 0.002 |
| 20/07/2017 | 15:35 | 1440 | 19 | 9 | 3.7 | 7.7 | 10 | 14.8 | 0.010 | 0.014 | 0.001 |

Fuente: Propio

Se observó en la Figura 21 que la variación entre los ensayos fue mínima, el tamaño de las partículas varía entre 40 μ m a 1.5 μ m.

Figura 21 Curva de granulometría del polvo de ladrillo.



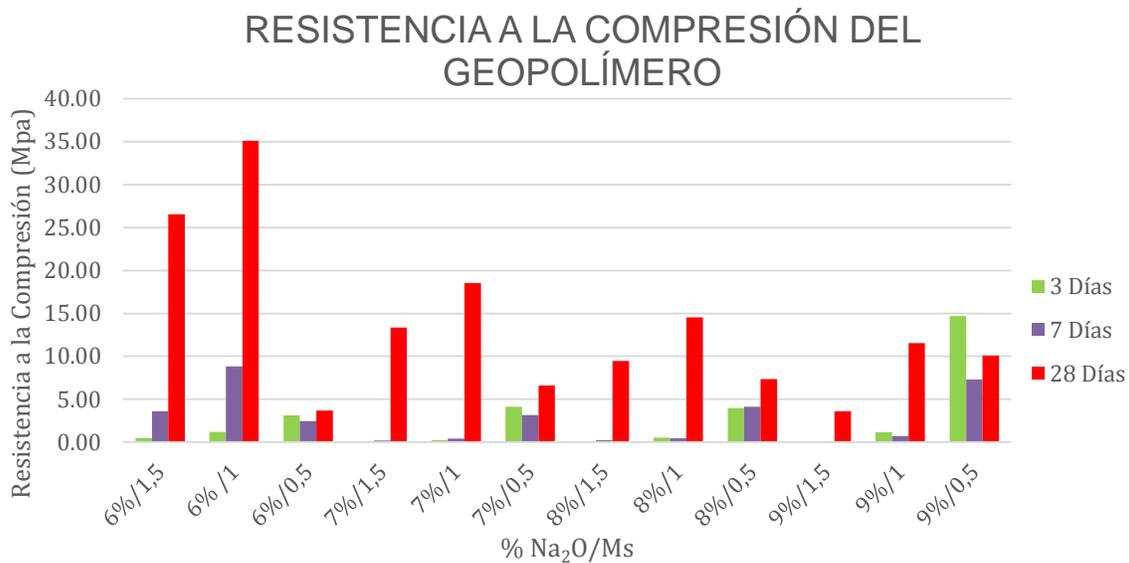
Fuente: Propio

8.3.2 DEFINICIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ALCALINA DE HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH) Y SILICATO DE SODIO (Na₂SiO₃) PARA EL TRATAMIENTO DEL SUELO

La dosificación de las soluciones activantes de hidróxido de sodio Na₂O y silicato de sodio (Na₂SiO₃) se definen a partir de la preparación de una solución de Na₂O correspondiente a 10 M (Molar), se realizó una matriz delimitada por la realización de 20 muestras iniciales, en rangos de concentración para solución para Na₂O entre el 6% y 9% y módulo de silicato entre el 0,5 y 1,5, con una relación de agua precursor (RLA) con un valor de 0,4³³.

³³ GONZALEZ VAZQUES, Diana Carolina, LÓPEZ CAMACHO, Anyul Yinneth, BONILLA CHIRIVÍ, Catherine Alexandra. Sintetización del material Geopolimérico. Bogotá, 2017, 39h. trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad La Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil.

Figura 22 Resistencia a la compresión del geopolimero.



Fuente: Gonzalez, Lopez y Bonilla.

Según la investigación se determinó que las dosificaciones que mejores resultados dieron con respecto a la resistencia a la compresión fueron la concentración de Na₂O del 6% y una activación alcalina de módulo de silicato de 1,0, con un valor de 35 MPa. Estos valores definen la dosificación de los activantes hidróxido de sodio Na₂O y silicato de sodio (Na₂SiO₃) para la fabricación de las probetas de suelo – RLA activados alcalinamente.

8.3.3 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS CON MATERIAL DE LADRILLO ACTIVADO ALCALINAMENTE

La fabricación de probetas de suelo tratado con un geopolímero de base arcillosa se realizó con dosificaciones de material precursor en un rango del 3%, 5%, 8%, 15%, 30% en función del peso del material de suelo requerido para la fabricación de la muestra con una densidad controlada de 1,40 g/cm³ y una humedad del 30 %

obtenida en el ensayo modificado de compactación suelo – ladrillo como la óptima del material ensayado (ver ilustración 19. Grafica de compactación suelo – ladrillo).

Las soluciones activadoras Hidróxido de sodio, manejado a una molaridad de 10 y Silicato de sodio, fueron utilizadas como activante en la mezcla solución – material de suelo - ladrillo, estas se dosificaban en función del peso total del material que fue empleado en la fabricación de la probeta, no obstante, cada valor de dosificación de la solución cambiaba dada la variación del peso de material seco dosificado en diferentes porcentajes.

El agua utilizada en la mezcla del material solución – material de suelo – ladrillo, fue dosificada en función del peso total de la mezcla del material utilizado para la fabricación de una probeta, con el fin de llevar el material seco a la humedad optima con un valor del 30% para el remoldeo de la muestra, dicho porcentaje se relacionó con la cantidad de humedad que proporciona las soluciones activantes al contacto con material suelo-ladrillo, sustituyendo el 30% de la adición de agua.

La fabricación de las probetas se realizó siguiendo pasos detallados para la aceptable manejabilidad del material al momento de su fabricación, estos pasos son nombrados a continuación:

1. Dosificación y pesaje de los materiales secos utilizados en la fabricación de la probeta:

Inicialmente se tomaron recipientes de aluminio para el respectivo pesaje de la muestra de material suelo y ladrillo utilizados para la fabricación de la probeta, esta se realizaba bajo los peso establecidos en los cálculos realizados para la dosificación de cada muestra.

Figura 23 Dosificación material seco.



Fuente: Propio

2. Dosificación y pesaje de las soluciones activantes para la mezcla del material utilizados en la fabricación de la probeta:

Posterior al pesaje del material seco se realizó la dosificación y pesaje de las soluciones de Hidróxido de sodio y Silicato de sodio, siguiendo los valores establecidos en el cálculo de dichas dosificaciones para cada remoldeo de muestra. Luego, la dosificación de hidróxido de sodio era mezclada con el silicato de sodio en un recipiente plástico, considerando la reacción térmica generada en esta mezcla.

Figura 24 Dosificación de soluciones activadoras.



Fuente: Propio

3. Mezcla de material suelo – ladrillo y soluciones activantes hidróxido de sodio y silicato de sodio y adición de agua:

La mezcla del material seco y las soluciones activantes hidróxido de sodio y silicato de sodio, y la adición de agua se realiza en un recipiente de aluminio proporcionado en el laboratorio, este procedimiento se realiza en un tiempo mínimo posible, dado a la reacción que se genera al contacto de los activantes con el material seco además de la adición de agua en el material. Posterior a proporción de las soluciones y el agua al material seco se lleva a una mezcla manual con espátula o una cuchara de acero, homogeneizando toda la muestra evitando acumulaciones de humedad y aglutinamiento de partículas en diferentes tamaños.

Figura 25 Mezcla material seco - soluciones activadoras y agua.



Fuente: Propio

4. Pesaje del material por capa para posteriormente realizar el remoldeo de la muestra:

Se realiza el pesaje del material por capa para el remoldeo de la muestra, esta se realiza en tres capas, se toman tres recipientes y en ella se pesa el valor estandarizado, este valor se calculó en función del peso total de la muestra húmeda manteniendo la densidad deseada. Pesado el material para cada capa, el material sobrante es tomado para el ensayo de humedad de este material, para este ensayo se tomaron tres muestras representativas y fueron llevadas al horno del laboratorio, y son sometidas a un secado acelerado a una temperatura de 60°C, reduciendo la alteración del material al ser sometido en altas temperaturas.

Figura 26 Muestra para la obtención de humedad.



Fuente: Propio

5. Procedimiento para el remoldeo de muestras:

Realizado el pesaje de cada capa para la fabricación de la probeta, se toma el recipiente en el cual el material será compactado para la fabricación de la

probeta, este recipiente es revestido en su interior con una capa delgada de vaselina para facilitar la extracción de la muestra del recipiente. Los tres recipientes con el material ya pesado son llevados a la maquina universal, utilizada para la compactación por capas de la probeta. Mediante la utilización de un embudo el material contenido en cada recipiente es colocado en el recipiente para el remoldeo de la muestra, se inicia con una primera capa compactada con una carga controlada, cada capa tiene una altura de 3,33 cm para una altura total de 10 cm, esta medida es referenciada en el cilindro de acero utilizado para la compactación del material, finalizada la compactación de la primera capa se procedió a la escarificación de la parte superior de la capa, con el objeto de una mayor adhesión entre partículas de las tres capas, evitando la separación de las capas al momento de la extracción de la muestra del recipiente de remoldeo.

Este procedimiento es realizado para las dos capas siguientes. Por último, se retiró la carga ejercida en la maquina universal, se apartó el recipiente de remoldeo y fue girado 180°, vuelve a ser colocado el recipiente en la maquina universal, en este punto es colocado un tubo de PVC con un diámetro de 11 cm, y una altura de 13 cm en la parte superior del recipiente de remoldeo, para facilitar la extracción de la muestra. Fue colocada la carga nuevamente, pasado unos 5 minutos aproximadamente la muestra se extrajo del recipiente de remoldeo, finalmente se tomaron las dimensiones de la muestra y su peso, es comparada con los valores establecido en el cálculo que está en función de la densidad deseada, por lo tanto esta muestras son guardadas en una caja de icopor evitando la pérdida de humedad de la probeta.

Este procedimiento es realizado para cada probeta en diferentes dosificaciones.

Figura 27 Remoldeo de muestra.



Fuente: Propio

8.4 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA SUELO-MATERIAL DE LADRILLO ACTIVADO ALCALINAMENTE.

8.4.1 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE COMPRESIÓN EN TIEMPOS DE 3, 7, 14 Y 28 DÍAS PARA CADA PORCENTAJE DE DOSIFICACIÓN.

La determinación de la resistencia a la compresión se obtuvo manejando dosificaciones de 3%, 5%, 8%, 15% y 30% de ladrillo en la mezcla de suelo-ladrillo, solamente la dosificación del 3% se evaluó a un periodo de 28 días exclusivamente, los periodos de 3, 7, 14 y 28 días fueron empleados para las dosificaciones restantes, igualmente se elaboraron probetas con un contenido de 0% de ladrillo con finalidad de comparar su comportamiento con las probetas de porcentaje de contenido de ladrillo.

La humedad óptima trabajada para las probetas de suelo-ladrillo fue de 30% como se muestra en la Figura 20 curva de compactación de suelo-ladrillo, este porcentaje de agua se reemplazó por el material activador hidróxido de sodio y silicato de sodio.

En la Tabla 27 se observan los resultados del ensayo de compresión para las probetas de 3% de ladrillo a los 28 días, se optó determinar el promedio de las probetas, observando que la mayor resistencia corresponde a 162 KPa a los 28 días.

Tabla 27 Resistencia en KPa para el 3% de ladrillo a los 28 días

| 3% | |
|-----------------|--------------------|
| Días/Probeta | 28 |
| 1 | 162.6536001 |
| 2 | 67.7889894 |
| 3 | 148.0793570 |
| Promedio | 126.1739822 |

Fuente: Propio

En la Tabla 28 se observan los resultados del ensayo de compresión para las probetas de 5% de ladrillo en los periodos de 3, 7, 14 y 28 días, se optó determinar el promedio de las probetas por periodo de falla, observando que la mayor resistencia corresponde a 210 KPa a los 14 días.

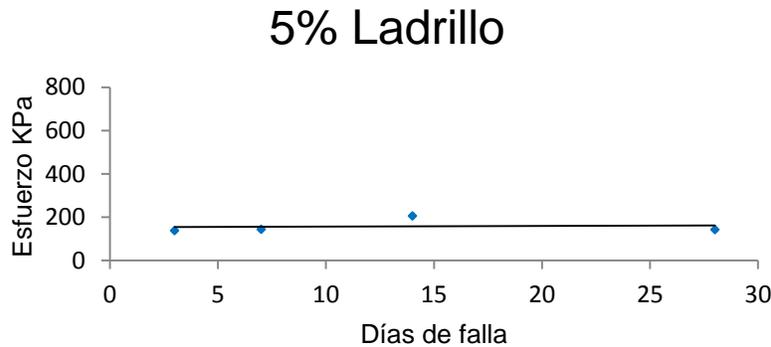
Tabla 28 Resistencia en KPa para el 5% de ladrillo

| 5% | | | | |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Días/Probeta | 3 | 7 | 14 | 28 |
| 1 | 137.9773472 | 144.4514102 | 122.2102145 | 142.7256247 |
| 2 | 137.1621716 | 141.5898947 | 200.9301128 | 143.7318882 |
| 3 | 138.3652411 | 145.7917784 | 210.7849222 | 126.2194677 |
| Promedio | 137.8349200 | 143.9443611 | 205.8575175 | 143.2287564 |

Fuente: Propio

La Figura 28 se realizó con los datos de la Tabla 28, se graficó el esfuerzo (resistencia) vs # de días de falla, y se analizó por medio de la línea de tendencia que a medida que el periodo de días de falla aumenta el esfuerzo lo hace igualmente, con valores que inician en los 137 KPa hasta 150 KPa.

Figura 28 Esfuerzo vs # de días 5%



Fuente: Propio

En la Tabla 29 se observan los resultados del ensayo de compresión para las probetas de 8% de ladrillo en los periodos de 3, 7, 14 y 28 días, se optó determinar el promedio de las probetas por periodo de falla, observando que la mayor resistencia corresponde a 235 KPa a los 28 días, los ensayos de a los 3 días de falla fueron descartados ya que sus resultados no son lógicos respecto a los otros periodos..

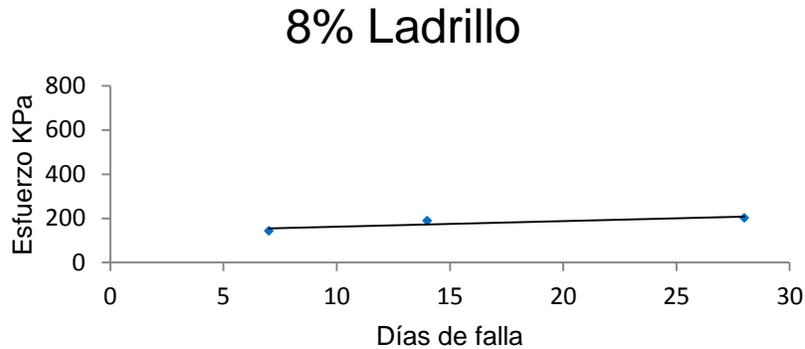
Tabla 29 Resistencia en KPa para el 8% de ladrillo

| 8% | | | | |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Días/Probeta | 3 | 7 | 14 | 28 |
| 1 | 280.9195342 | 125.7002473 | 168.9428881 | 182.0282613 |
| 2 | 382.2871351 | 143.1801118 | 182.8614269 | 191.1367056 |
| 3 | 386.6608802 | 144.6044536 | 195.6162547 | 235.2193192 |
| Promedio | 349.9558498 | 143.8922827 | 182.4735232 | 202.7947620 |

Fuente: Propio

La Figura 29 se realizó con los datos de la Tabla 29, se graficó el esfuerzo (resistencia) vs # de días de falla, y se analizó por medio de la línea de tendencia que a medida que el periodo de días de falla aumenta el esfuerzo lo hace igualmente, con valores que inician en los 144 KPa hasta 210 KPa.

Figura 29 Esfuerzo vs # de días 8%



Fuente: Propio

En la Tabla 30 se observan los resultados del ensayo de compresión para las probetas de 15% de ladrillo en los periodos de 3, 7, 14 y 28 días, se optó determinar el promedio de las probetas por periodo de falla, observando que la mayor resistencia corresponde a 237 KPa a los 28 días.

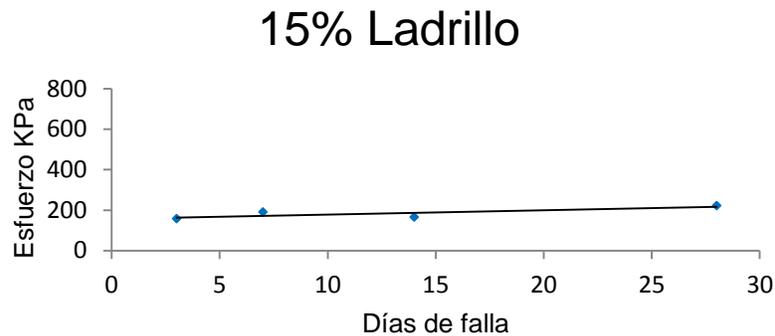
Tabla 30 Resistencia en KPa para el 15% de ladrillo

| 15% | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Días/Probeta | 3 | 7 | 14 | 28 |
| 1 | 157.1470840 | 174.2425552 | 171.9977116 | 209.1940962 |
| 2 | 158.7185548 | 207.8327839 | 161.2377195 | 133.7072951 |
| 3 | 161.9427686 | 101.8770863 | 131.2307450 | 237.7874627 |
| Promedio | 159.2694691 | 191.0376695 | 166.6177155 | 223.4907794 |

Fuente: Propio

La Figura 30 se realizó con los datos de la Tabla 30, se graficó el esfuerzo (resistencia) vs # de días de falla, y se analizó por medio de la línea de tendencia que a medida que el periodo de días de falla aumenta el esfuerzo lo hace igualmente, con valores que inician en los 160 KPa hasta 224 KPa.

Figura 30 Esfuerzo vs # de días 15%



Fuente: Propio

En la Tabla 31 se observan los resultados del ensayo de compresión para las probetas de 30% de ladrillo en los periodos de 3, 7, 14 y 28 días, se optó determinar el promedio de las probetas por periodo de falla, observando que la mayor resistencia corresponde a 766 KPa a los 28 días.

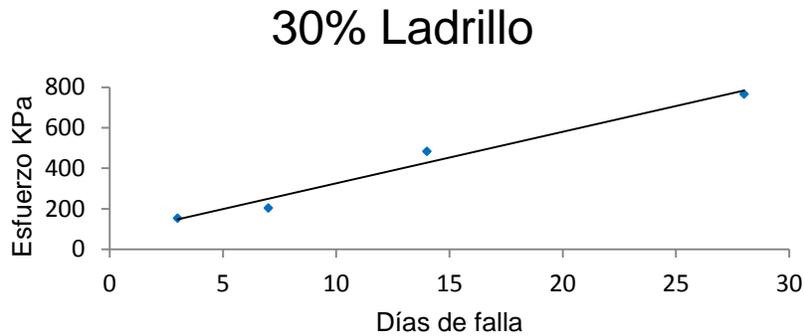
Tabla 31 Resistencia en KPa para el 30% de ladrillo

| 30% | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Días/Probeta | 3 | 7 | 14 | 28 |
| 1 | 157.7799630 | 154.1267614 | 310.9631019 | 271.6633554 |
| 2 | 149.6906513 | 126.8766696 | 419.5030836 | 326.3681023 |
| 3 | 153.0651376 | 203.5525037 | 548.2688127 | 766.6603696 |
| Promedio | 153.5119173 | 203.5525037 | 483.8859482 | 766.6603696 |

Fuente: Propio

La Figura 31 se realizó con los datos de la Tabla 31, se graficó el esfuerzo (resistencia) vs # de días de falla, y se analizó por medio de la línea de tendencia que a medida que el periodo de días de falla aumenta el esfuerzo lo hace igualmente, con valores que inician en los 154 KPa hasta 767 KPa.

Figura 31 Esfuerzo vs # de días 30%



Fuente: Propio

En la Tabla 32 se observan los resultados del ensayo de compresión para las probetas de 0% de ladrillo en los periodos de 3, 14 y 28 días, se optó determinar el promedio de las probetas por periodo de falla, observando que a medida que el tiempo de falla aumenta la resistencia a la deformación lo hace igualmente, este fenómeno es conocido como succión la cual se define como la presión negativa que debe aplicarse al agua que tiene una composición idéntica a la del suelo, para que alcance el equilibrio con ésta a través de una membrana semipermeable. Esta succión depende de las fuerzas de atracción entre el agua y los cationes del suelo, de las fuerzas de tensión superficial y de las cargas externas³⁴ lo cual provoca que a medida que el tiempo transcurre la succión aumente por la pérdida de agua y esto se vea reflejado en el aumento de la resistencia a la deformación; dado este fenómeno los únicos valores que se van a adoptar para este ensayo son los fallados en el periodo de 3 día, observando que la mayor resistencia corresponde a 130 KPa a los 3 días.

³⁴ INVIAS 157

Tabla 32 Resistencia en KPa para el 0% de ladrillo

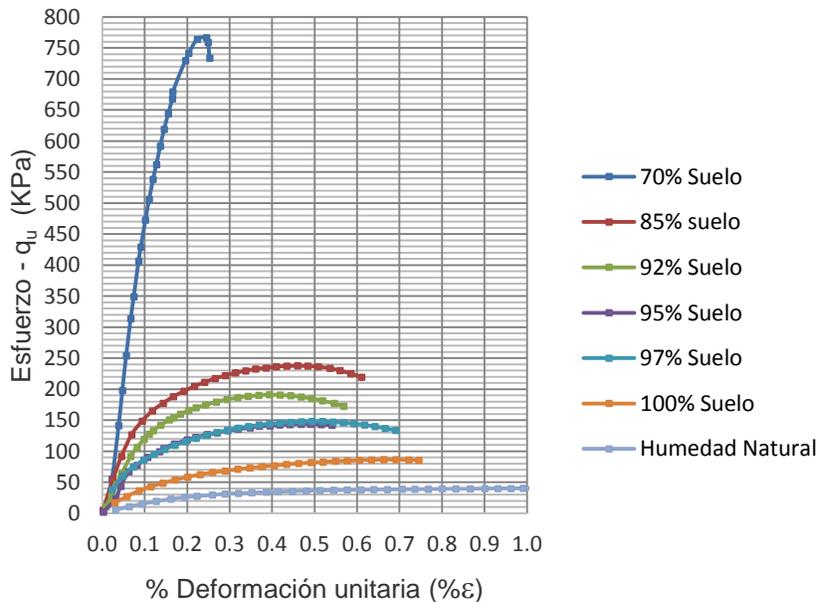
| 0% | |
|--------------|-------------|
| Días/Probeta | 3 |
| 1 | 129.8026429 |
| 2 | 86.5567495 |
| 3 | 128.4957164 |
| Promedio | 129.1491797 |

Fuente: Propio

De acuerdo a los ensayos de compresión realizados se pudo observar que la resistencia máxima en la mayoría de las probetas se presentó a los 28 días; la Figura 32 muestra las curvas de compresión de las probetas con porcentaje de ladrillo y la probeta con humedad natural de 130%.

Figura 32 Curvas de compresión de probetas a los 28 días y de humedad natural

Esfuerzo vs Deformación - 28 días,
densidad 1,4 y %w=30%



Fuente: Propio

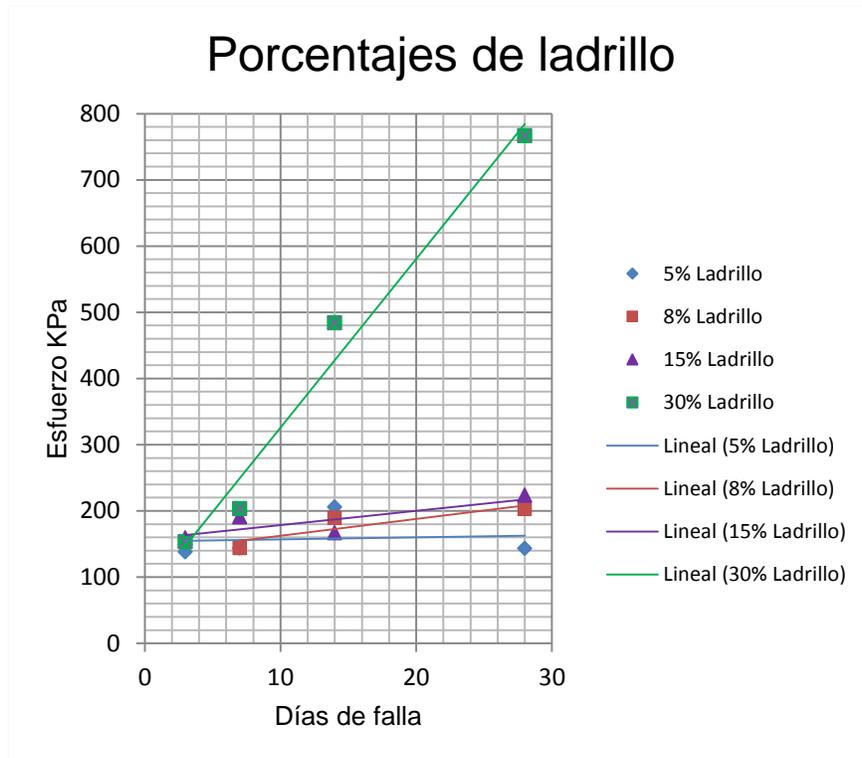
Se evidencio que con bajos porcentajes de ladrillo < 30% las probetas de suelo tienden a presentar una mayor deformación a medida que el porcentaje de ladrillo se reduce, esto acompañado igualmente de la reducción de resistencia máxima a la deformación; se observó que las probetas mejoradas con ladrillo presentaron un aumento mayor a 4 veces de la resistencia obtenida en la muestra extraída insitu.

Igualmente se pudo evidenciar como varió el comportamiento de la curva de compresión al aumentar el porcentaje de contenido de ladrillo, las curvas para porcentajes de 3%, 5%, 8% y 15% se caracterizaron por una gran deformación y una baja resistencia a la deformación, siendo similar al resultado de la Figura 19 de las curvas de compresión con humedad natural; por el contrario el porcentaje 30% de contenido de ladrillo su deformación fue baja y su resistencia a la deformación alta con respecto a las otras probetas ensayadas, con un valor máximo de 767 KPa de resistencia a la deformación, 17 veces mayor a la resistencia presentada en la probeta con humedad natural.

8.4.2 OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN DE PROBETAS MEJORADAS CON LADRILLO.

La determinación de la resistencia máxima a la compresión de las probetas mejoradas con ladrillo se realizó graficando la resistencia a la deformación (esfuerzo) por porcentaje de ladrillo activado alcalinamente (geopolímero) vs tiempos de curado, como se observa en la Figura 33.

Figura 33 Esfuerzo vs # de días por porcentaje de ladrillo.



Fuente: Propio

De acuerdo a lo observado en la Figura 33 se evidencio que la adición de porcentaje de ladrillo tiene influencia positiva en la resistencia a la deformación de las probetas de suelo mejorado, su crecimiento se presenta progresivamente con 5%, 8% y 15%, pero al llegar al 30% de adición de ladrillo su resistencia a la deformación crece significativamente con valores que llegan a los 767KPa, por lo que el porcentaje de 30% con tiempo de curado de 28 días se consideró como como la resistencia máxima de los cuerpos evaluados.

9. CONCLUSIONES

1. Se caracterizó física y mecánicamente el suelo típico de la formación sabana de Bogotá, como un suelo tipo CH (Arcilla de Alta Plasticidad), obteniendo valores de resistencia a la compresión inconfiada entre 39 KPa y 48 KPa, un tamaño de la partícula de suelo que varía entre 0.15 mm a 1.5 μm ; con un porcentaje de partículas menores a los 0.076 mm entre 90% y 85% y partículas menores a 2 μm entre el 30% y 35%, una densidad máxima 1.48 g/cm^3 y humedad optima del 26%, estos parámetros fueron tomados como referencia para el mejoramiento del suelo con residuo de ladrillo de arcilla (RLA).
2. Se definió la dosificación de los activantes hidróxido de sodio Na_2O y silicato de sodio (Na_2SiO_3) para la fabricación de las probetas de suelo – RLA activados alcalinamente, con un porcentaje de concentración para el Na_2O del 6% y una activación alcalina 1,0 para el módulo de silicato, siendo el valor con mayor resistencia a la compresión, con un valor de 35 MPa.
3. Se definió el tamaño de partículas del RLA entre 0,04 mm-1.5 μm , con una densidad máxima de 1,40 g/cm^3 , humedad optima del 30%, obtenidos con el ensayo de compactación para una dosificación del 70% suelo y 30% RLA.
4. Se evaluó la resistencia a la compresión inconfiada del suelo tratado con diferentes proporciones de material de RLA y la soluciones activantes de hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3) y tiempos de curado a partir de la activación alcalina del RLA. De acuerdo a los datos obtenidos en los ensayos de compresión inconfiada, a los cuales fueron sometidas las muestras realizadas, se evidenció que la mezcla del material de RLA y la activación alcalina a partir de las soluciones activantes, tiene una influencia

positiva en la resistencia a la deformación de los cuerpos de prueba, por consiguiente el aumento de material de RLA en los porcentajes establecidos de 5%, 8%, 15%, 30% presentan un crecimiento progresivo en su resistencia, siendo el valor de 30% de RLA el valor más significativo con respecto a la resistencia a la compresión del suelo, legando a un valor de 767 KPa, por lo que el porcentaje de 30% con tiempo de curado de 28 días se consideró como como la resistencia máxima de los cuerpos evaluados.

10. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda evaluar el mejoramiento del suelo blando típico de la sabana de Bogotá con residuo de polvo ladrillo activado alcalinamente en proporciones de superiores al 30 % con la finalidad de verificar su comportamiento.
2. Se recomienda realizar el curado de las diferentes probetas sumergidas en agua con la finalidad de corroborar su comportamiento.
3. Se recomienda evaluar la durabilidad de las diferentes probetas en condiciones de extrema humedad así como en condiciones extremadamente secas (secadas al horno) con la finalidad de corroborar su comportamiento.
4. Evaluar la resistencia a la compresión de las diferentes probetas en tiempos de curado superiores a los 28 días con la finalidad de verificar si se adquiere una resistencia a la compresión en dichos periodos de tiempo.
5. Evaluar la resistencia a la compresión de las diferentes probetas; acelerando su secado mediante horno, con la finalidad de verificar su comportamiento en esta condición de secado.

11. REFERENCIAS

- DELGADO, Felipe Andres, JIMENEZ. Jesus Alexander y NEIRA. Oscar Alexander. Asentamientos secundarios en los suelos de la zona el campin y su correlacion con algunos paramentros de los suelos de la zona lacustre en la ciudad de Bogota. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá. Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería. 2008. 139 p.
- MUNERA, Jorge Alexander y MULFORD, Alexandra Jimena. Aprovechamiento de desechos de ladrillo para la síntesis de geopolímero. Trabajo de grado Ingeniero de Materiales. Cali. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. 2015. 51 p.
- VILLAQUIRAN-CAICEDO. Mónica, RODRIGUEZ. Erich y MEJIA. Ruby. Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas. En: Ingeniería investigación y tecnología. Noviembre, 2013, vol. 16 no.1, p.113-122.
- RIOS. Sara, RAMOS. Catarina, DA FONSECA. António, CRUZ. Nuno y RODRIGUEZ. Carlos. Colombian soil stabilized with geopolymers for low cost roads. En: Procedia Engineering. 2016. vol. 143, p.1392-1400.
- GONZALEZ CUERVO, Claudia Paulina. MONTAÑO ANGARITA, Ángela Marcela. CASTRO RODRÍGUEZ, Diana Catalina. Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto. [en línea]. Marzo, 2011. <<http://ingenieria.uao.edu.co/hombreymaquina/revistas/38%202012-1/38%20Articulo%2008.pdf>> [citado el 3 de octubre de 2016].
- MONTAÑA SANABRIA, Danilo. Características de compresibilidad y resistencia de arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá. Bogotá, 2013, 159h. Trabajo de grado (Magister ingeniería). Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito. Facultad de Ingeniería Civil. Disponible en el catálogo de la Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito: <<http://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/108/1/CARACTER%C3%8DSTICAS%20DE%20COMPRESIBILIDAD%20ARCILLAS%20TIPICAS%20DE%20LA%20SABANA%20DE%20BOGOT%C3%81.pdf>>
- MARTÍNEZ LÓPEZ, Carolina. Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas cómo alternativa potencial al cemento portland. Palmira. 2015, 140h. Tesis presentada para optar al título de magister en Ingeniería ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil y Administración. Disponible en el catálogo en línea de la biblioteca de la Universidad Nacional de Colombia: <http://www.bdigital.unal.edu.co/49278/1/Carolina_Martinez_Lopez.pdf>.

- MONTOYA ARENAS, Diana María. REYES TORRES, Germán Alfonso. Geología de la Sabana de Bogotá. En: INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA INGEOMINAS [en línea]. Disponible en :<https://choconta.files.wordpress.com/2007/12/informe_geologia_sabana_bta.pdf>[citado en 12 de octubre de 2016] .
- SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. www.sgc.gov.co