

Evaluación de propiedades de resistencia y rigidez en granulares remanentes de estructuras de pavimentos al tratarlos con cal, en Bogotá.

Alejandro Sepúlveda Ángel

Edwar Sneyder Jiménez Bautista

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Dirigido por:

Ing. Juan Miguel Sánchez Durán

Ingeniero Civil

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

Bogotá

2021

Dedicatoria

A Dios y a la vida por brindarnos salud, sabiduría e inteligencia. A nuestros padres, que son una bendición y el cimiento más importante de esta etapa de aprendizaje, desde el primer día lo apostaron todo por nuestra pasión y no renunciaron en su apoyo durante este hermoso proceso de formación como ingenieros civiles, siempre desde la comprensión y el amor, nos llenaron de fortaleza para seguir adelante en conquista de nuestros sueños. A nuestros hermanos y hermanas, y a todos aquellos que lo creyeron posible y siempre estuvieron a disposición para enseñar y colaborar.

Agradecimientos

En primer lugar, deseamos expresar nuestro agradecimiento a Dios, nuestro creador y a nuestros padres, por hacer posible la materialización de este sueño de ser Ingenieros civiles, brindando amor, fortaleza y las herramientas necesarias para culminar esta etapa de la vida.

Asimismo, expresamos nuestra gratitud al director de esta tesis, por la orientación y apoyo brindado a este trabajo. A los jurados por su atención a las consultas y sus valiosas sugerencias. A la Universidad Santo Tomás, por facilitar el aprendizaje a través de su equipo de profesionales que con esfuerzo, paciencia y dedicación indujeron sus conocimientos y habilidades para prepararnos para la vida profesional.

Finalmente, gracias a las personas que nos estiman, nuestros amigos y familiares por haber sido un gran apoyo moral y humano, por brindarnos la fortaleza y la energía que nos impulsó a seguir adelante.

CONTENIDO

1.	9
2.	10
3.	11
4.	12
4.1.	12
4.2.	12
5.	13
5.1.	13
5.2.	13
6.	13
7.	14
8.	15
8.1.	15
8.1.1.	15
8.1.2.	15
8.1.3.	15
8.1.4.	15
8.1.5.	16
8.1.6.	16
8.1.7.	16
8.1.8.	16
8.1.9.	16
8.1.10.	16
9.	17
10.	18
10.1.	18
10.2.	18
10.3.	18
10.4.	18
10.5.	19
10.6.	19
11.	20

11.1.	20	
11.2.	20	
11.3.	22	
11.3.1.	22	
11.3.2.	23	
11.3.3.	23	
11.3.4.	24	
11.3.5.	24	
11.3.6.	25	
11.4.	26	
12.	27	
12.1.	27	
12.2.	27	
12.3.	30	
12.4.	31	
12.5.	35	
12.6.	38	
12.7.		38
12.8.	40	
13.	41	
14.	43	
15.	44	
16.	47	
16.1.	47	
16.2.	50	
16.3.	53	
16.4.	56	
16.5.	59	
16.6.	62	

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2. Localización del tramo vial de la segunda muestra tomada	16
Ilustración 3. Localización del tramo vial de la tercera muestra tomada	17
Ilustración 4. Muestra 1 tomada en la calle 92 en la ciudad de Bogotá	18
Ilustración 5. Muestra 2 tomada en la carrera 95 G en la ciudad de Bogotá	19
Ilustración 6. Muestra 3 tomada en la calle 18 sur en la ciudad de Bogotá	19
Ilustración 7. Lavado de la muestra para eliminar finos	20
Ilustración 8. Tamizado.	20
Ilustración 9. Determinación del Límite Líquido	21
Ilustración 10. Determinación del Límite Plástico	21
Ilustración 11. Porcentajes de Cal para el Ensayo	21
Ilustración 12. Elemento para el Ensayo Proctor	22
Ilustración 13. Probetas con Diferentes Porcentajes de Cal	22
Ilustración 14. Proceso de del Fallo de las Probetas	23

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Límites y Límites con 4% de Cal de las tres muestras	26
Tabla 2. Tabla de Porcentajes Muestra #1	26
Tabla 3. Tabla de Porcentajes Muestra #2	27
Tabla 4. Tabla de Porcentajes Muestra #3	27
Tabla 5. Ensayo Eades & Grim Muestra 1.	29
Tabla 6. Ensayo Eades & Grim Muestra 2.	30

Tabla 7. Ensayo Eades & Grim Muestra 3.	30
Tabla 8. Datos Proctor Modificado Muestra 1.	31
Tabla 9. Datos Proctor Modificado Muestra 2.	31
Tabla 10. Datos Proctor Modificado Muestra 3.	32
Tabla 11. Datos Probetas Con Cal Muestra 1.	34
Tabla 12. Datos Probetas Con Cal Muestra 2.	34
Tabla 13. Datos Probetas Con Cal Muestra 3.	35
Tabla 14. APU	38

TABLA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva Granulométrica Muestra 1.	29
Gráfica 2. Curva Granulométrica Muestra 2.	29
Gráfica 3. Curva Granulométrica Muestra 3.	30
Gráfica 4. Gráfica Proctor Modificado Muestra 1.	33
Gráfica 5. Gráfica Proctor Modificado Muestra 2.	34
Gráfica 6. Gráfica Proctor Modificado Muestra 3.	34

Gráfica 7. Gráfica Esfuerzo Vs Porcentaje de Cal Muestra 1.	36
Gráfica 8. Gráfica Esfuerzo Vs Porcentaje de Cal Muestra 2.	37
Gráfica 9. Gráfica Esfuerzo Vs Porcentaje de Cal Muestra 3.	37
Gráfica 10. Gráfica Esfuerzo Vs Deformación Muestra 1.	38
Gráfica 11. Gráfica Esfuerzo Vs Deformación Muestra 2.	38
Gráfica 12. Gráfica Esfuerzo Vs Deformación Muestra 3.	39

1. Resumen

En el documento se presentan los resultados obtenidos del análisis realizado a tres muestras de material granular remanente (MGR) tratado con cal, extraído de vías en rehabilitación en diferentes localidades de la ciudad de Bogotá.

El proyecto de investigación se desarrolló en tres etapas, la primera etapa consistió en la recolecta del material granular remanente (MGR) existente en vías en servicio en la ciudad de

Bogotá, en esta etapa se planteó un análisis de factibilidad que permitió determinar las condiciones del proyecto (objetivo, alcance y metodología).

La segunda etapa se realizó mediante ensayos de laboratorios que permitieron establecer la caracterización del material a través del ensayo de determinación de los tamaños de partículas de los suelos (granulometría), índice de plasticidad mediante el ensayo de Límites de Atterberg, contenido óptimo de cal mediante el ensayo de Eades & Grim y resistencia a la compresión en diferentes muestras de material granular con variación en el contenido de cal entre el 1% y 6%. La variación en el contenido de cal agregado a los granulares tratados, se hizo con el fin de determinar la resistencia del material con las diferentes cantidades de cal. De lo anterior, los ensayos permitieron establecer que el contenido óptimo de cal para lograr un resultado satisfactorio que cumpla los parámetros de calidad exigidos por el Instituto de desarrollo urbano IDU es equivalente al 4%, con este porcentaje el granular remanente logra reducir la plasticidad en la porción fina del suelo y aumentar las propiedades de resistencia.

Por último, se desarrolló la tercera etapa del proyecto, en esta se evaluaron los resultados obtenidos, y se pudo establecer que el material granular remanente (MGR) se puede utilizar como agregado reciclado (AR) de residuos de construcción y demolición (RCD) en vías vehiculares, vías peatonales y ciclo-rutas de acuerdo a lo establecido en las especificaciones técnicas del IDU 500-18; 511-18 y 513-18 versión 4 del año 2019.

Palabras clave: Material granular remanente, cal, agregado reciclado, residuos de construcción y demolición.

2. Abstract

The document presents the results of analysis performed to three samples of remaining granular material (RGM) treated with limescale, extracted from roads in rehabilitation in different localities of Bogota City.

The project of investigation developed in three stages, the first stage consisted in the collect of remaining granular material (RGM) existed in roads of service in Bogota City, in this phase was proposed an analysis of feasibility which allowed to determine the conditions of the project (objective, scope and methodology)

The second stage has been made through laboratory tests that allowed established the characterization of material via through of soil particle size determination test (granulometry),

plasticity index through the Atterberg limit test, optimal limescale content by Eades & Grim test and compressive strength in different samples of granular material with variation in limescale content between 1% and 6%. The variation on the limescale content added to treated granules has been made with the goal of determining the material strength with different amounts of limescale. From the previous, the tests allowed establish that the optimum content of limescale to make a satisfactory result that meets the quality parameters required for the Urban Development Institute (IDU), is equal to 4%, and with this percentage the remaining granular reduces plasticity in the final portion of soil and increase the resistance properties.

Finally, it has been developed the third stage of the project, in this has evaluated the obtained results, and it has been established that the remaining granular material (RGM) can be used as recycled aggregate (RA) from construction and demolition waste (CDW) in vehicular roads, pedestrian paths and cycle paths in accordance with the provisions of the IDU 500-18 technical specifications; 511-18 and 513-18 version 4 of the 2019.

Keywords: Remaining granular material (RGM), limescale, recycled aggregate (RA), construction and demolition waste (CDW).

3. Introducción

Las obras civiles tienen un impacto ambiental alto, por lo general cuando se realiza una intervención, los materiales granulares remanentes (MGR) presentes en estructuras de pavimentos en Bogotá, son puestos en un lugar de disposición final, y en muchos escenarios no son tratados correctamente. Esto incrementa la explotación de canteras vírgenes y genera un mayor costo ambiental. Por esta razón se considera el aprovechamiento de residuos de construcción y demolición RCD tratados con cal, esta técnica, permite beneficios en el comportamiento mecánico del granular, disminuye su humedad y plasticidad, aumenta su resistencia y permite la reutilización de este material para usarse como material de relleno en vías, andenes y ciclo-rutas.

Actualmente, se producen en Bogotá, cerca de 15 millones de ton/año de RCD. De este gran volumen de RCD que se producen en Bogotá, los mayores productores son el IDU y las construcciones privadas y en muchos casos, van a parar a sitios no autorizados, alterando el paisaje, contaminando suelos y acuíferos. Esto también representa una pérdida de recursos

potenciales, pues el hecho de que se desechen como residuos ciertos elementos provenientes de las obras, que poseen aún capacidad de ser valorizados, además de que obliga a consumir recursos naturales, acentúa más el efecto negativo de la actividad constructora en Bogotá. (Castaño, Rodríguez, Lasso, & Ocampo, 2013)

La demanda de materiales para construcción en la ciudad de Bogotá es equivalente a 12 millones 402 mil toneladas actualmente. para el año 2023 se espera que la ciudad de Bogotá demande 19 millones 955 mil toneladas, lo cual representa un consumo de 2.3 toneladas por persona en ese año, esta proyección se realiza teniendo en cuentas las obras de construcción del metro de Bogotá, la complementación de la red de Transmilenio con las troncales de la Boyacá y la av. calle 68 y el desarrollo del metro ligero (Consorcio proyección, 2014)

La evaluación presente se fundamenta en la recolección de tres muestras de material granular de forma aleatoria en diferentes localidades de Bogotá, los granulares son sometidos a ensayos de caracterización, evaluación y determinación del porcentaje óptimo de cal necesario para lograr su estabilización. La estabilización se define como un proceso que mejora de manera positiva las propiedades de resistencia, plasticidad y estabilidad del material granular remanente (MGR) sometido al tratamiento con cal (CaO). De lo anterior, se debe tener presente que esta reacción química en el material granular es posible debido a la porción de agregado fino presente.

La estabilización con cal en materiales granulares puede proporcionar propiedades de ingeniería significativas. Estas se dan principalmente debido al intercambio de cationes de calcio suministrados por la cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH}_2)$) por el catión normalmente presente absorbido en la porción de arcilla presente en el granular, la mineralogía de arcilla se altera ya que reacciona en los iones de calcio para formar un producto cementante. Los resultados de esta modificación con cal a materiales granulares son: reducción de la plasticidad, reducción de la capacidad de retención de humedad, reducción de hinchamiento, estabilidad y mejora. (Little, 1999).

Para finalizar, la evaluación de propiedades de resistencia y rigidez en granulares remanentes busca establecer una técnica de construcción sostenible, que permita la reutilización de estos agregados reciclados a partir de RCD de vías en la ciudad de Bogotá para la construcción de vías, andenes y ciclorutas. Para ello se debe tratar el material granular remanente con una adición de cal, que para este caso es equivalente al 4%.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Evaluar las mejoras en reducción de plasticidad y aumento de rigidez en materiales granulares remanentes MGR provenientes de RCD al tratarlos con cal, con el fin de evitar que estos sean desechados y así establecer si pueden reutilizarse como material de relleno en estructuras de pavimento, andenes y ciclorutas.

4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar los materiales existentes en tres estructuras de pavimentos existentes en la ciudad de Bogotá.

- Estimar los contenidos óptimos de cal para tratar y mejorar el comportamiento mecánico del suelo remanente que conforma la estructura del pavimento.
- Analizar la disminución de la plasticidad en la porción fina del suelo y las propiedades de resistencia y rigidez del material granular remanente al ser modificado con cal.

5. Formulación del Problema

5.1. Descripción del problema

Las obras civiles generan residuos de construcción y demolición (RCD) que no son tratados adecuadamente, muchas veces terminan en los sitios de disposición final y se desprecia la alternativa de reutilización. Lo anterior genera preocupación en los sectores de la construcción a nivel mundial, debido a que los recursos son finitos y la alta demanda de infraestructura, aumenta la explotación de materiales pétreos provenientes de canteras vírgenes.

5.2. Formulación del Problema

Según lo expuesto anteriormente en la **Descripción del problema**, surgen las siguientes preguntas:

¿Es posible tratar con cal, materiales granulares remanentes (MGR) extraídos de RCD de pavimentos existentes en Bogotá para lograr que puedan reutilizarse como material de relleno en vías, andenes y ciclorutas? Y si es así, ¿cuál es el procedimiento para determinar el porcentaje óptimo de cal?

6. Justificación

Las vías en buen estado facilitan la transitabilidad, el acceso a salud, comercio, educación y el crecimiento de la economía del país. Para lograr resultados eficientes, la estructura de un pavimento en la ciudad de Bogotá, debe construirse de acuerdo a la guía anexo técnico para la recuperación de espacio público intervenido bajo licencias de excavación emitida por el IDU, donde se especifica el tipo de cimentación que esta debe tener en función del servicio y el tipo de pavimento.

Para la intervención de vías, se necesitan materiales pétreos que por lo general son extraídos de canteras vírgenes y generan un impacto ambiental negativo, debido a que la demanda de obras civiles trae como consecuencia disminución en los recursos naturales. Por lo anterior se han planteado mecanismos que permitan mitigar el impacto generado, en Bogotá en el año 2012, secretaría de ambiente emitió la resolución 1115, por medio de la cual se adoptan los lineamientos Técnico - Ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital. Esta resolución permite la reutilización del material granular, el cual debe cumplir con unas especificaciones técnicas establecidas por el instituto de desarrollo urbano IDU, el cual indica los parámetros que deben cumplir los materiales para reutilizarse como base y sub base en vías y sub base en andenes o ciclorutas.

Según lo anterior, la propuesta de tratar con cal materiales granulares remanentes (MGR) provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) que conforman las bases y subbases de los pavimentos existentes de Bogotá, es apropiada porque se reduce su humedad y plasticidad a la vez que se mejora la resistencia y la rigidez de la estructura del pavimento y aporta a la ingeniería sostenible porque permite la reutilización del material. Para el desarrollo del proyecto, se realiza la recolección de tres (3) muestras diferentes de material granular en diferentes vías de tres (3) localidades de Bogotá (Chapinero, Engativá y Puente Aranda), para determinar cuál es el porcentaje mínimo óptimo de cal para tratar los granulares a reutilizar.

7. Estado del Arte

A lo largo de la historia, el uso de cal como agregado ha permitido la construcción de muchas obras de ingeniería, entre ellas se destaca la construcción de la vía Appia, la calzada más importante de la antigua Roma. Fue construida en el año 312 A.C, para su construcción fue necesario el uso de agregado grueso y cal para lograr como resultado una buena superficie de rodadura.

A finales de 1940 en EE. UU las mezclas de cal y suelo fueron sometidas a ensayos de mecánica de suelos de la época, en 1950 con la reconstrucción e iniciación de infraestructuras de transporte, la estabilización de suelos con cal era una técnica moderna establecida. Esta técnica tomó popularidad rápidamente y ha permitido la construcción de carreteras, infraestructura aeroportuaria y ferroviaria. La estabilización de suelos arcillosos con cal también se practica extensamente en países como, Australia, Alemania, Suecia y Francia. (Maldonado & Martinez, 2009).

La acción y cantidad necesaria de cal sobre el suelo depende de su naturaleza y la humedad natural de este. En suelos con alto contenido de humedad la adición de cal viva en polvo produce una disminución de la humedad existente, mejorando la trabajabilidad. Para disminuir el contenido de humedad entre un 3% y 5% se debe añadir 1% de cal viva. (Ancade, 2008).

Las propiedades mineralógicas de los suelos establecerán el grado de reactividad con la cal. Los suelos de grano fino que tengan un contenido de arcilla mínimo del 7%, índice de plasticidad mayor de 10 ($IP > 10$) y porcentaje mínimo que pasa el tamiz N°200, sea del 25% reaccionara satisfactoriamente con cal. El tratamiento de cal mejora la trabajabilidad y la resistencia del suelo, normalmente se utiliza entre el 1 y 4 por ciento de cal en peso con respecto al suelo para la modificación. (Little, 2004).

Como norma general, para la estabilización de suelos con cal se debe considerar que los suelos sean plásticos, es decir $IP > 10$, si cumple con esto proporcionará mejoras en las. propiedades del suelo de forma inmediata y a largo plazo, se debe tener en cuenta que el suelo no contenga más del 1% de materia orgánica para que su reacción sea satisfactoria, en caso de que el porcentaje de materia orgánica sea mayor al 1% se deben considerar procedimientos de construcción especiales y adición considerable de cal, de lo anterior se puede decir que la utilidad de la cal es adecuada cuando no se necesite pronta resistencia y se necesite bajar la plasticidad de los suelos o contrarrestar el alto contenido de humedad de bases, subbases o sub rasantes. (Maldonado & Martinez, 2009).

En Colombia se han realizado ensayos para determinar una normativa para la aplicación de cal a los suelos, la norma INVÍAS 2013, artículo 236 especifica que la estabilización se hace efectiva en suelos arcillosos, finos y limo plásticos, adicionalmente se deben realizar ensayos de laboratorio para identificar si el suelo es apropiado, la prueba de Eades & Grim permite conocer la cantidad de cal necesaria para lograr un pH de 12,4 que garantizara el incremento a la resistencia mecánica (ASTM 6276), ensayos de identificación de suelos, límites de Atterberg, granulometría, humedad natural y ensayos de comportamiento, Proctor normal o modificado y capacidad portante CBR o resistencia a compresión simple, una vez la capa de suelo sea estabilizada con cal debe dejarse curar por siete días. (Cadavid, 2019).

8. Marco de Referencia

8.1. Marco Conceptual

8.1.1. Subbase Granular

Es un material de grano grueso, compuesto básicamente por arena, triturado y partículas gruesas, es una capa importante en una estructura de pavimentos ya que dicha capa es la que debe resistir la tensión de la carga del vehículo transmitida a través de la capa superior y transferida a la subrasante a un nivel apropiado. (Montejo, 1997)

8.1.2. Base Granular

Al igual que la subbase granular es un material de grano grueso, compuesto por arena, triturado, sin embargo, tiene la diferencia de poseer partículas finas, esta capa se encuentra entre la carpeta asfáltica y la subbase, su función consiste en proporcionar un elemento de resistencia para transferir a la subbase y a la subrasante la intensidad idónea. (Montejo, 1997)

8.1.3. Recebo Común

Es un material el cual se puede encontrar en dos tipos, el recebo común o el clasificado, está compuesto por materiales pétreos granulares de diferentes tamaños de partícula.

Según Cemex “son materiales con curva granulométrica uniforme, cumpliendo una dureza, limpieza y resistencia asimismo se utilizan como relleno para la instalación de estructuras de pavimento rígido o flexible” (Cemex, 2021).

8.1.4. Residuos de construcción y demolición (RCD)

Son Materiales generados de las actividades de construcción, estos materiales pueden ser aprovechados como material de relleno para la conformación de bases y subbases en pavimentos o sub bases en andenes y ciclorutas.

8.1.5. Agregado reciclado (AR)

Son materiales provenientes de RCD que se pueden reutilizar siempre y cuando cumplan con los parámetros de calidad establecidos por la normativa.

8.1.6. Compactación

La compactación de un suelo consiste en comprimir cada una de las partículas entre sí con un procedimiento mecánico. Dicho proceso ayuda a que el aire salga y se rellene con más material logrando una mayor densidad de masa, la compactación se realiza para obtener una mejora en las propiedades físicas del suelo, se requiere compactación del suelo para la construcción de presas, terraplenes, autopistas, pistas de aterrizajes, etc. (Cotecno, 2021).

8.1.7. Cal Hidratada

La Cal hidratada es según Calco Cales de Colombia “un compuesto inorgánico con la fórmula química $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Se trata de un polvo blanco, que resulta de la hidratación de la cal viva con agua para satisfacer su afinidad química” (Calco, 2021).

8.1.8. Clasificación de Pavimentos:

Los pavimentos se conocen y se clasifican principalmente por su funcionalidad, que se refiere al tipo de tránsito que circulará por determinada vía, se clasifican principalmente en pavimentos flexible, pavimentos rígidos y articulados, según Montejó:

8.1.1.1. Pavimento Flexible: “Este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase” (Montejó, 2002, P. 2).

8.1.1.2. Pavimento Rígido: “Son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina subbase” (Montejó, 2002, P. 5).

8.1.1.3. Pavimento Articulado: “Están compuesto por una capa de rodadura que está elaborada en bloques de concreto prefabricado, llamados adoquines de espesor uniforme e iguales entre sí” (Montejó, 2002, P. 7).

8.1.9. Lechada de Cal

Es un fluido de hidróxido de calcio con agua que según Intical “Se puede producir con diferentes porcentajes de sólidos y adaptarse a diferentes necesidades. Las condiciones para la obtención de la lechada tienen un gran impacto. El rendimiento es determinante, por lo que hay que controlar sus parámetros de producción” (Intical, 2021).

8.1.10. Resistencia

La rigidez de un elemento estructural según Argos “es la característica que debe cumplir un elemento a oponerse a la deformación, es decir la capacidad de soportar una carga sin deformación o movimiento excesivo, y está en función del módulo de elasticidad” (Argos, 2021)

8.1.11. Rigidez

La resistencia según Argos “es la capacidad que tiene un elemento estructural para soportar fuerzas sin romperse, y depende de las propiedades mecánicas (resistencia mecánica, módulo de elasticidad, etc.) y del tamaño de la sección transversal del material que lo compone” (Argos, 2021)

8.1.12. Suelos Tratados con Cal

La estabilización con cal se realiza en diferentes tipos de suelo, particularmente en los suelos arcillosos, finos y limos plásticos. Se hace este proceso para modificar sus características físicas y dar a los usuarios de las vías una estructura de pavimentos más resistente, con una vida útil mayor y un costo de rehabilitación más bajo, según Caltek “Colombia se encuentra conformada por diferentes tipos de suelos, debido a que contamos con todos los pisos térmicos, una gran diversidad climática y geográfica con la que cuenta el territorio colombiano proporciona una oportunidad para tratar los suelos arcillosos y limosos con cal” (Caltek, 2019).

9. Marco Geográfico

Para el proyecto se tomaron tres (3) muestras granulares de vías existentes en diferentes estructuras de pavimento, dichas vías se encuentran en la ciudad de Bogotá, la primera muestra se encuentra en la calle 92 # 13A-1 en la localidad de Chapinero (ver Figura 1), la segunda en la carrera 95G 86A-17 en la localidad de Engativá (ver Figura 2) y finalmente, la tercera en calle 18 sur # 36 - 2a36 60 en la localidad de Puente Aranda (ver Figura 3).

Ilustración 1. Localización del tramo vial de la primera muestra tomada



Fuente: propia tomado de Google Earth

Ilustración 2. Localización del tramo vial de la segunda muestra tomada



Fuente: propia tomado de Google Earth

Ilustración 3. Localización del tramo vial de la tercera muestra tomada



Fuente: propia tomado de Google Earth

10. Marco Normativo

En este apartado se mostrará la normativa que se utilizará para la ejecución del proyecto, para la elaboración de los ensayos como lo son, los documentos de las normas técnicas y especificaciones de Invias.

10.1. Estimación de la proporción de cal necesaria para estabilizar un suelo a partir de la medida del pH (I.N.V.E – 601 – 13)

Mediante este ensayo se determinará el porcentaje de cal necesaria para la estabilización de los suelos, estableciendo el porcentaje de cal mínimo, que según Invias “da a lugar un pH de 12.4 en la mezcla de suelo-cal” (Invias, 2013).

10.2. Determinación de los tamaños de partículas de los suelos (I.N.V.E – 123 – 13).

Para clasificar un suelo se necesita saber su distribución granulométrica para esto, según invias “se necesita la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de partícula mayores de 75 μ m (retenidas en el tamiz No. 200), se determina por tamizado” (Invias, 2013).

10.3. Determinación del límite líquido de los suelos (I.N.V.E – 125 – 13).

A través de este laboratorio se calculará el límite líquido del suelo, que según Invias “es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado al horno, el cual se encuentra entre el estado líquido y el estado plástico” (Invias, 2013).

10.4. Límite plástico e índice de plasticidad de suelos (I.N.V.E – 126 – 13).

Consiste en hallar el límite plástico del suelo y su índice de plasticidad que según Invias “es el contenido más bajo de agua y el índice es el intervalo de tamaño de contenido de agua, expresado en un porcentaje de la masa seca del suelo. Este índice corresponde a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo” (Invias, 2013).

10.5. Determinación de los valores de equilibrio de la masa unitaria (Densidad) seca y de la humedad de un suelo de subrasante (I.N.V.E – 146 – 13).

Con ayuda de este ensayo se podrán determinar los parámetros para una buena compactación de suelo en estructuras de pavimentos, según Invias “por medio de esta norma se establecen los procedimientos para determinar la masa unitaria seca (densidad seca) de equilibrio y la humedad de equilibrio” (Invias, 2013).

10.6. Compresión inconfiada en muestras de suelo (I.N.V.E – 152 – 13).

Por medio de esta prueba se estimará la resistencia a la compresión inconfiada del suelo, que según Invias “es la carga por unidad de área a la cual una probeta de suelo falla en el ensayo de compresión simple” (Invias, 2013).

10.7. Generalidades para bases y sub bases granulares (ET-IDU 500-18)

Esta norma establece las características que debe tener un material granular usado como base o sub base, conformado a partir de agregados reciclados. (IDU, 2019)

10.8. Base y subbase granular para vías vehiculares con agregados reciclados obtenidos de residuos de construcción y demolición RCD (ET-IDU 511-18)

Se establecen los requisitos que deben cumplir los agregados recilcados (AR) para bases y subbases granulares. (IDU, 2019)

10.9. Subbase granular para vías peatonales y ciclorutas con agregados reciclados obtenidos de residuos de construcción y demolición RCD (ET-IDU 513-18)

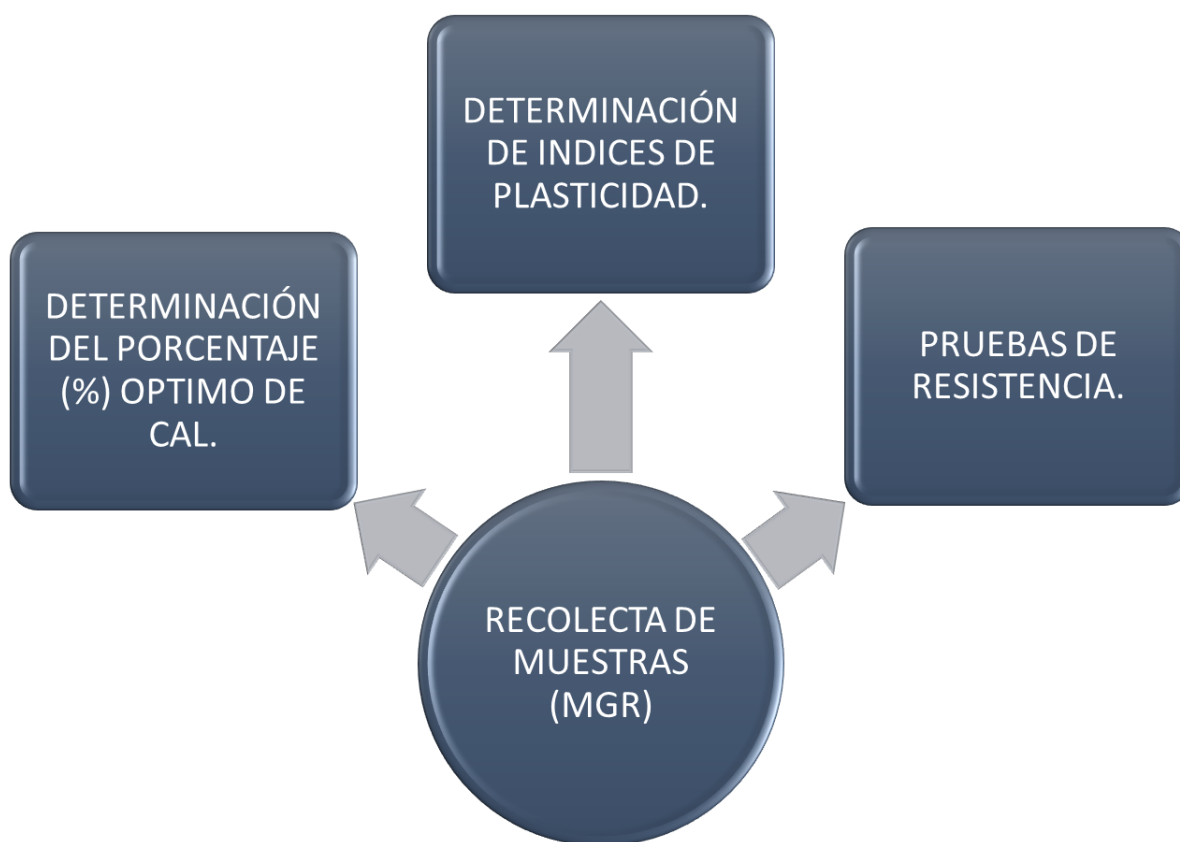
En el documento técnico se indica los requisitos de calidad que deben cumplir los agregados reciclados (AR) para subbases. (IDU, 2019)

11. Metodología

11.1. Tipo de Metodología

La metodología que se utilizará para el desarrollo del proyecto es de tipo cuantitativo, debido a que el objetivo del proyecto es determinar el porcentaje óptimo de cal para estabilizar materiales granulares remanentes MGR extraídos a partir de RCD de vías a rehabilitar en Bogotá.

Ilustración 4. Metodología



Fuente: propia 2021

La metodología tendrá las siguientes etapas, mostradas a continuación.

11.2. Etapa Preliminar (Recolección de Muestras)

Se realizaron tres recolectas de material granular existente en estructuras de pavimento en diferentes vías de localidades de la ciudad de Bogotá, la primera muestra se tomó en la localidad de chapinero, (Ver ilustración 5). La segunda muestra se tomó en la localidad de Engativá (Ver ilustración 6) la tercera muestra se tomó en la localidad de Puente Aranda (Ver ilustración 7). Los granulares recolectados en campo fueron sometidos a diferentes ensayos de laboratorio que buscaban determinar el porcentaje óptimo de cal para estabilizar los granulares remanentes con

cal, los ensayos realizados son: (Granulometría, Límites de Atterberg, Eades & Grim, Proctor Modificado, Probetas con Cal y Compresión Incofinada).

Ilustración 5. Muestra 1 tomada en la calle 92 en la ciudad de Bogotá



Fuente: propia 2021

Ilustración 6. Muestra 2 tomada en la carrera 95 G en la ciudad de Bogotá



Fuente: propia 2021

Ilustración 7. Muestra 3 tomada en la calle 18 sur en la ciudad de Bogotá



Fuente: propia 2021

11.3. Etapa de Estudio y Ensayos de laboratorio

11.3.1. Granulometría de los materiales recolectados

Para la ejecución de los ensayos de laboratorio, se hizo uso de las especificaciones que incluye la Norma de Invias (I.N.V.E – 123-013), en donde se determinará la distribución de tamaño de partículas de las diferentes muestras tomadas y donde se determinará el porcentaje retenido en cada tamiz. Se tomó una muestra representativa de cada uno de los materiales granulares, seguido se procede con lavado del material con el fin de eliminar la mayor cantidad de porción fina (Ver ilustración 8). Una vez realizado el lavado del material, este debe dejarse secar durante 24 horas en el horno a una temperatura de $100 \pm 5^\circ$ para así permitir al material ser sometido al ensayo de granulometría mediante el tamizado en mallas de diferentes diámetros, al estar seco no presenta errores durante el procedimiento porque el material no se adhiere a las paredes del tamiz (Ver ilustración 9).

Ilustración 8. Lavado de la muestra para eliminar finos



Fuente: propia 2021

Ilustración 9. Tamizado.



Fuente: propia 2021

11.3.2. Límites de Atterbeg de los materiales recolectados

Para la ejecución de este ensayo se utilizó las especificaciones técnicas de la Norma Invias la (I.N.V.E-125 – 13), para determinar el límite líquido de cada uno de los materiales granulares recolectados, a través de la Cazuela de Casagrande (Ver ilustración 10). También se utilizó las especificaciones técnicas del ensayo (I.N.V.E- 126 – 13), para así determinar el límite plástico de los materiales recolectados (Ver ilustración 11).

Ilustración 10. Determinación del Límite Líquido



Fuente: propia 2021

Ilustración 11. Determinación del Límite Plástico



Fuente: propia 2021

11.3.3. Eades & Grim Materiales 1, 2 y 3

Para este ensayo se utilizó las especificaciones técnicas establecidas en la sección 600 (Estabilización de suelos) de Invias, exactamente (I.N.V.E-601), La presente, permite determinar el contenido de cal necesario para estabilizar un suelo, de modo que se establece el porcentaje mínimo óptimo de cal cuando el pH del material tratado es igual a 12.4, para este proceso se utilizaran diferentes contenidos de cal, establecidos entre el 1% y el 6%(Ver ilustración 12), seguido se realiza la mezcla del material con el porcentaje de cal para precisar con que contenido se logra como resultado la estabilización del material tratado, la precisión se toma mediante un pH metro.

Ilustración 12. Porcentajes de Cal para el Ensayo



Fuente: Propia 2021

11.3.4. Proctor Modificado con Cal Muestra 1, 2 y 3

Con ayuda de las especificaciones técnicas de la norma Invias (I.N.V. E- 146-13) se determinará la densidad y el porcentaje de humedad óptimo para cada una de los granulares remanentes recolectados, se empleará el ensayo Proctor modificado el cual por norma nos indica que deben ser cinco (5) capas y cada una con veinticinco (25) golpes, adicional a esto cada Proctor se hizo con el contenido de cal óptimo (4%), para cada muestra.

Ilustración 13. Elemento para el Ensayo Proctor



Fuente: Propia 2021

11.3.5. Probetas con Cal Muestra 1, 2 y 3

Con el fin de comprobar la resistencia que gana cada una de las muestras de granulares remanentes al ser tratados con cal se realizarán dos ensayos más, el primero consiste en hacer seis (6) probetas de la misma forma en la que se hace Proctor Modificado rigiéndonos con las especificaciones técnicas (I.N.V. E-146-13), con diferentes porcentajes de cal, dichas probetas se dejaron en inmersión durante ocho (8) días para después proceder a fallarlas.

Ilustración 14. Probetas con Diferentes Porcentajes de Cal



Fuente: Propia 2021

11.3.6. Fallo de Probetas Muestra 1, 2 y 3

Pasados los ocho (8) días en inmersión se procede a refrentar con azufre cada probeta para lograr así un fallo correcto, este proceso se determinó como una compresión inconfiada y con ayuda de la máquina de compresión inconfiada como se muestra en la figura 15 (Ver ilustración 14), se fallaron cada una de las muestras realizadas en el ensayo anterior, obteniendo así la resistencia que gana cada una con un porcentaje de cal diferente.

Ilustración 15. Proceso de del Fallo de las Probetas



Fuente: Propia 2021

11.4. Etapa de resultados

Cada uno de los resultados, tablas y graficas de los ensayos realizados se evidencian en los anexos adjuntos en el presente documentos:

- Límites **(I.N.V E 125-13 e I.N.V E 126-13)** Muestra 1, 2 y 3 (Ver Anexo 1)
- Límites con cal **(I.N.V E 125-13 e I.N.V E 126-13)** Muestra 1, 2 y 3 (Ver Anexo 2)
- Granulometría **(INV E-123-13)** Muestra 1, 2 y 3 (Ver Anexo 3)
- Eades & Grim **(INV E – 601-13)** Muestra 1, 2 y 3 (Ver Anexo 4)
- Proctor Modificado **(INV E-146-13)** Muestra 1, 2 y 3 (Ver Anexo 5)
- Probetas con cal **(INV E-146-13)** Muestra 1, 2 y 3 (Ver Anexo 6)

12. Resultados

12.1. ENSAYO DE DETERMINACIÓN LÍMITES DE CONSISTENCIA EN SUELOS Y AGREGADOS (INV E 125-13 e INV E 126-13).

Se tomó de cada una de las muestras una porción representativa para realizar el ensayo de límites y límites con un 4% de cal, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1 (Ver. Tabla 1), en donde podemos observar que se cumplió con el objetivo de reducir la plasticidad.

Tabla 1. Límites y Límites con 4% de Cal de las tres muestras

ENSAYO DE DERTMINACIÓN LÍMITES DE CONSISTENCIA EN SUELOS Y AGREGADOS (INV E 125- 13 e INV E 126-13)						
	MUESTRA #1	MUESTRA #1 CON CAL	MUESTRA #2	MUESTRA #2 CON CAL	MUESTRA #3	MUESTRA #3 CON CAL
LL	24%	22%	36%	29%	23%	20%
LP	16%	16%	21%	17%	17%	17%
IP	8%	6%	15%	12%	6%	3%

Fuente: Propia 2021

12.2. ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULA POR TAMIZADO (INV E-123-13)

Para cada una de las muestras se realizó el ensayo de granulometría según la normativa, los resultados obtenidos se encuentran en las siguientes tablas (Ver tabla 2, 3 y 4).

Tabla 2. Tabla de Porcentajes Muestra #1

DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTICULA POR TAMIZADO (INV E-123-13) Muestra #1					
Denominación	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	%Retenido acumulado	% Pasa
3"	75	0	0,0%	0,0%	100,0%
2"	50	0	0,0%	0,0%	100,0%
1 1/2"	37,5	200	3,2%	3,2%	96,8%
1 "	25	530	8,5%	11,7%	88,3%
3/4"	19	225	3,6%	15,2%	84,8%
3/8"	9,5	1060	16,9%	32,2%	67,8%
No. 4	4,75	970	15,5%	47,6%	52,4%
No.10	2,00	685	10,9%	58,6%	41,4%
No.20	0,841	340	5,4%	64,0%	36,0%
No.40	0,420	170	2,7%	66,7%	33,3%
No.60	0,250	220	3,5%	70,2%	29,8%
100	0,150	345	5,5%	75,7%	24,3%
200	0,075	370	5,9%	81,6%	18,4%
Fondo		1150	18,4%	100,0%	0,0%
Total, Muestra		6265	100,0%		

Fuente: Propia 2021

Tabla 3. Tabla de Porcentajes Muestra #2

DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTICULA POR TAMIZADO (INV E-123-13) Muestra #2					
Denominación	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	%Retenido acumulado	% Pasa
3"	75	0	0,0%	0,0%	100,0%
2"	50	0	0,0%	0,0%	100,0%
1 1/2"	37,5	97	1,5%	1,5%	98,5%
1 "	25	710	11,3%	12,8%	87,2%
3/4"	19	337	5,4%	18,2%	81,8%
3/8"	9,5	1177	18,7%	36,9%	63,1%
No. 4	4,75	845	13,4%	50,4%	49,6%
No.10	2,00	691	11,0%	61,4%	38,6%
No.20	0,841	377	6,0%	67,4%	32,6%
No.40	0,420	231	3,7%	71,1%	28,9%
No.80	0,177	205	3,3%	74,3%	25,7%
100	0,150	150	2,4%	76,7%	23,3%
200	0,075	337	5,4%	82,1%	17,9%
Fondo		1126	17,9%	100,0%	0,0%
Total, Muestra		6283	100,0%		

Fuente: Propia 2021

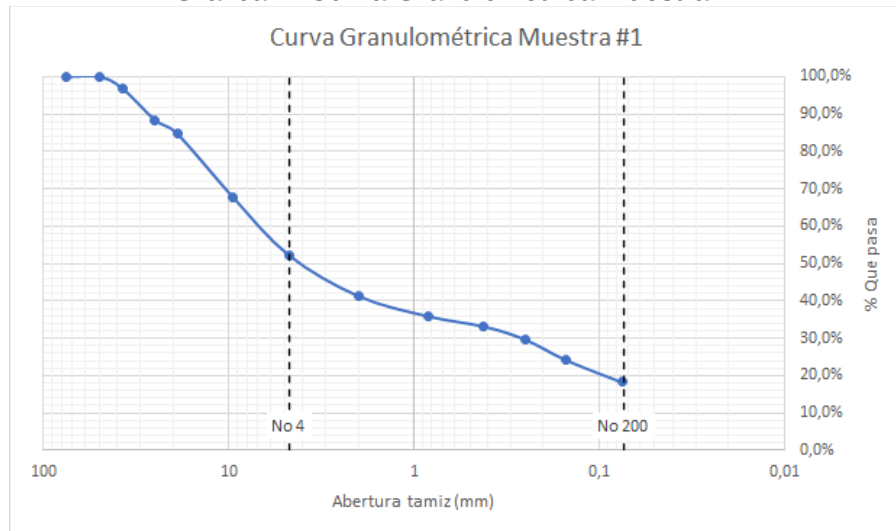
Tabla 4. Tabla de Porcentajes Muestra #3

DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTICULA POR TAMIZADO (INV E-123-13) Muestra #3					
Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	%Retenido acumulado	% Pasa
3"	80	0	0,0%	0,0%	100,0%
2"	50	269	4,8%	4,8%	95,2%
1 1/2"	40	234	4,1%	8,9%	91,1%
1 "	25	254	4,5%	13,4%	86,6%
3/4"	20	179	3,2%	16,6%	83,4%
3/8"	10	245	4,3%	20,9%	79,1%
No. 4	5	280	5,0%	25,8%	74,2%
No.10	2	253	4,5%	30,3%	69,7%
No.20	0,841	139	2,5%	32,8%	67,2%
No.40	0,42	149	2,6%	35,4%	64,6%
No.80	0,25	1727	30,5%	66,0%	34,0%
100	0,16	543	9,6%	75,6%	24,4%
200	0,08	422	7,5%	83,0%	17,0%
Fondo		960	17,0%	100,0%	0,0%
Total, Muestra		5654	100,0%		

Fuente: Propia 2021

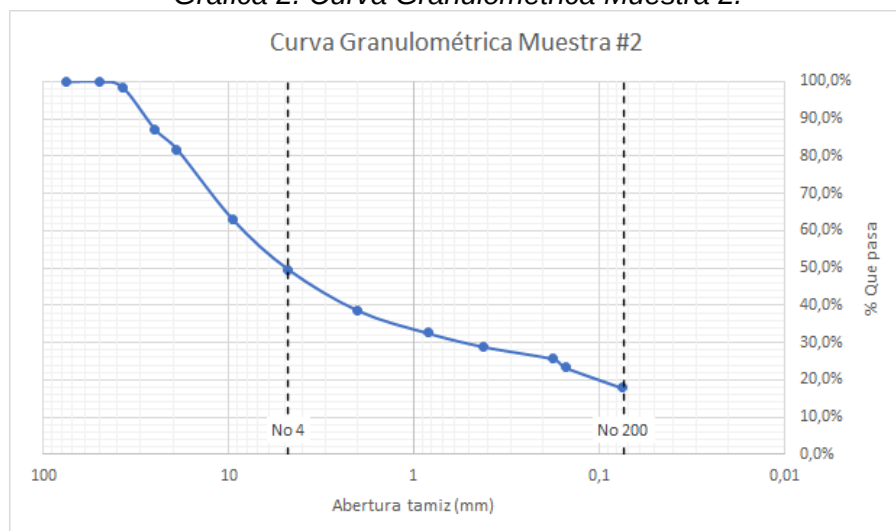
Con los datos obtenidos de las anteriores tablas, se obtuvo para cada muestra su curva granulométrica y así de este modo poder clasificar y nombrar cada una. Para la primer muestra se puede observar en la gráfica 1 (Ver gráfica 1), qué es un material uniforme, es decir tiene diferentes tamaños de partícula, por lo que se dice que es una grava bien graduada (GW), para la segunda muestra se evidencia en la gráfica 2 (Ver gráfica 2), que es un material que tiene diferentes tamaños de partícula, por ello se denomina que es una grava bien graduada (GW), y así mismo para la tercer muestra se evidencia en la gráfica 3 (Ver gráfica 3), que tiene muchas partículas de arena por lo que dicha muestra es llamada arena pobremente graduada (SP).

Gráfica 1. Curva Granulométrica Muestra 1.



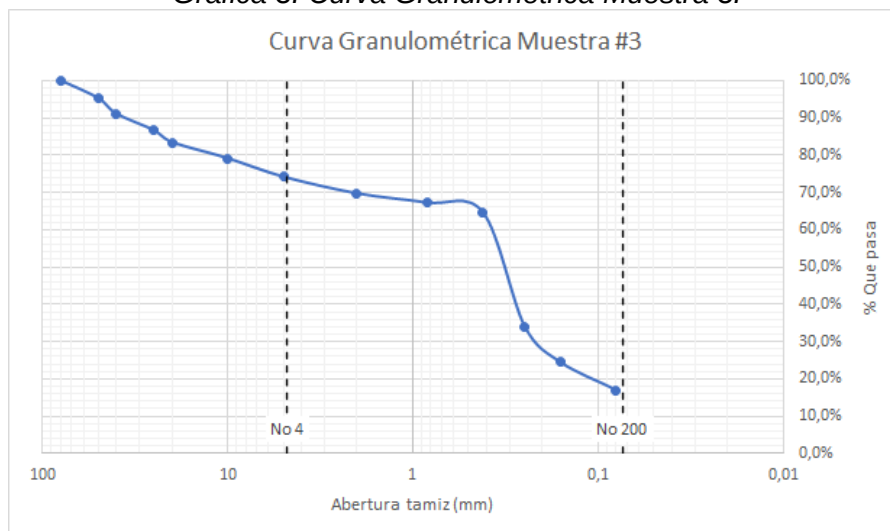
Fuente: Propia 2021

Gráfica 2. Curva Granulométrica Muestra 2.



Fuente: Propia 2021

Gráfica 3. Curva Granulométrica Muestra 3.



Fuente: Propia 2021

12.3. ESTIMACIÓN DE LA PORCIÓN DE CAL NECESARIA PARA ESTABILIZAR UN SUELO A PARTIR DE LA MEDIDA DEL pH (INV E – 601-13).

Se aplicó el ensayo de Eades & Grim para determinar el contenido mínimo óptimo de cal para las tres muestras y los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas (Ver tabla 5, 6 y 7). Se puede constatar que el contenido mínimo óptimo de cal para las tres muestras es del 4%, pues el pH según la norma debe ser de 12,40.

Tabla 5. Ensayo Eades & Grim Muestra 1.

Eades & Grim Muestra #1				
Muestra	Peso (g)	Cal (%)	Cal (g)	PH
Muestra 1	25	1	0,25	12,06
Muestra 2	25	2	0,5	12,27
Muestra 3	25	3	0,75	12,35
Muestra 4	25	4	1	12,40
Muestra 5	25	5	1,25	12,46
Muestra 6	25	6	1,5	12,69
Muestra 7	2.0 g de cal			12,76

Fuente: Propia 2021

Tabla 6. Ensayo Eades & Grim Muestra 2.

Eades & Grim Muestra #2				
Muestra	Peso (g)	Cal (%)	Cal (g)	PH
Muestra 1	25	1	0,25	12,00
Muestra 2	25	2	0,5	12,30
Muestra 3	25	3	0,75	12,36
Muestra 4	25	4	1	12,40
Muestra 5	25	5	1,25	12,49
Muestra 6	25	6	1,5	12,54
Muestra 7	2.0 g de cal			12,66

Fuente: Propia 2021

Tabla 7. Ensayo Eades & Grim Muestra 3.

Eades & Grim Muestra #3				
Muestra	Peso (g)	Cal (%)	Cal (g)	PH
Muestra 1	25	1	0,25	12,09
Muestra 2	25	2	0,5	12,29
Muestra 3	25	3	0,75	12,34
Muestra 4	25	4	1	12,40
Muestra 5	25	5	1,25	12,43
Muestra 6	25	6	1,5	12,65
Muestra 7	2.0 g de cal			12,77

Fuente: Propia 2021

12.4. DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE EQUILIBRIO DE LA MASA UNITARIA (DENSIDAD) SECA Y DE LA HUMEDAD EN UN SUELO (INV E-146-13)

Se realizó el ensayo de Proctor Modificado para cada una de las muestras, según lo estipulado en la norma y así obtener los resultados como se muestra en las siguientes tablas, (Ver Tablas 8, 9 y 10).

Tabla 8. Datos Proctor Modificado Muestra 1.

PROCTOR MODIFICADO MUESTRA #1					
Wo	0%				
Wdeseada	6%	8%	10%	12%	14%
ΔW	6%	8%	10%	12%	14%
Ws (g)	2000	2000	2000	2000	2000
ΔWw (g)	120	160	200	240	280
Wm (g)	1778,5	1778,5	1778,5	1778,5	1778,5
Wm+Sc (g)	3700	3795	3885	3860	3790
WSc (g)	1921,5	2016,5	2106,5	2081,5	2011,5
Vm (cm ³)	935,47	935,47	935,47	935,47	935,47
γT (g/cm ³)	2,05	2,16	2,25	2,23	2,15
γd (g/cm ³)	1,94	2,00	2,05	1,99	1,89
Recipiente	9	cp	5	11	w
Wr (g)	39,82	43,60	43,02	45,53	48,75
Wr+mh (g)	361,62	304,58	376,26	388,44	359,51
Wr+ms (g)	343,6	285,44	346,85	352,69	322,19
Wagua (g)	18,02	19,14	29,41	35,75	37,32
Wsuelo (g)	303,78	241,84	303,83	307,16	273,44
W%	5,93	7,91	9,68	11,64	13,65

Fuente: Propia 2021

Tabla 9. Datos Proctor Modificado Muestra 2.

PROCTOR MODIFICADO MUESTRA #2					
Cal	4%	4%	4%	4%	4%
Wcal (g)	80	80	80	80	80
Wdeseada	8%	10%	12%	14%	16%
ΔW	8%	10%	12%	14%	16%
Ws	2000	2000	2000	2000	2000
ΔWw	160	200	240	280	320
Wm	1778,5	1778,5	1778,5	1778,5	1778,5
Wm+sc	3815	3830	3835	3810	3720
Wsc	2036,5	2051,5	2056,5	2031,5	1941,5
Vm	935,47	935,47	935,47	935,47	935,47
γT (g/cm ³)	2,18	2,19	2,20	2,17	2,08
γd (g/cm ³)	1,70	1,89	1,96	1,90	1,79
Recipiente	#10	#5	#2	15	5
Wr (g)	39,80	40,20	44,00	39,00	43,00
Wr+mh (g)	99,9	170,5	202,7	159,4	265,5
Wr+ms (g)	94,23	158,10	187,34	145,59	234,55
Wagua (g)	5,67	12,40	15,36	13,81	30,95
Wsuelo (g)	54,43	117,9	143,34	106,59	191,55
W%	10,42	10,52	10,72	12,96	16,16

Fuente: Propia 2021

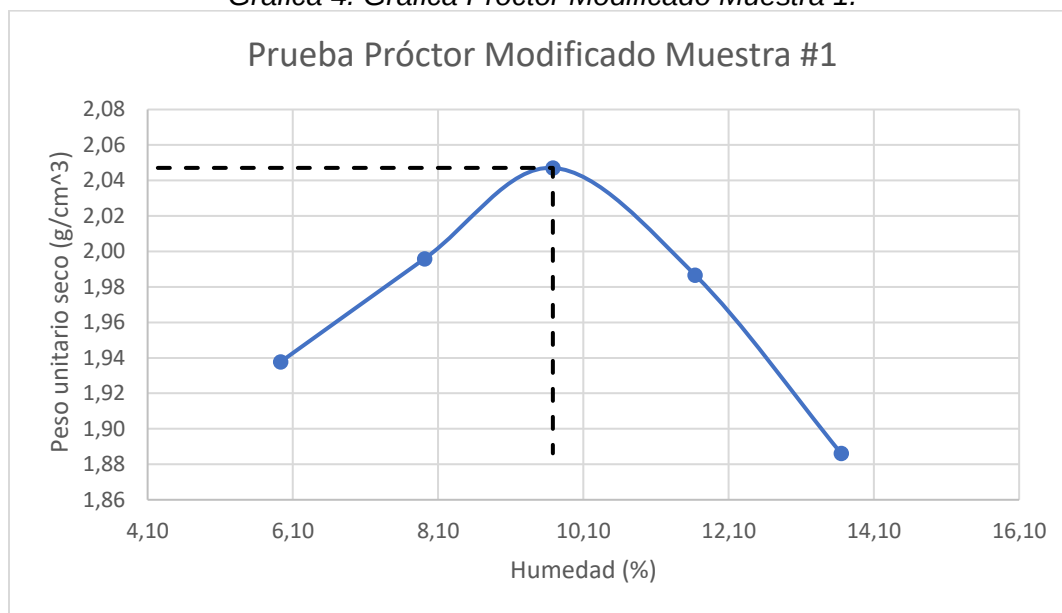
Tabla 10. Datos Proctor Modificado Muestra 3.

PROCTOR MODIFICADO MUESTRA #3					
Cal	4%	4%	4%	4%	4%
Wcal (g)	80	80	80	80	80
Wdeseada	8%	10%	12%	14%	16%
ΔW	8%	10%	12%	14%	16%
Ws	2000	2000	2000	2000	2000
ΔWw	160	200	240	280	320
Wm	1778,5	1778,5	1778,5	1778,5	1778,5
Wm+sc	3740	3805	3855	3820	3760
Wsc	1961,5	2026,5	2076,5	2041,5	1981,5
Vm	935,47	935,47	935,47	935,47	935,47
γ_T (g/cm ³)	2,10	2,17	2,22	2,18	2,12
γ_d (g/cm ³)	1,94	1,97	1,98	1,91	1,83
Recipiente	P11	CP	W	9	11
Wr (g)	47,79	43,57	48,71	39,89	45,54
Wr+mh (g)	163,6	200,13	226,64	200,16	281,64
Wr+ms (g)	155,03	187,13	208,74	181,77	250,62
Wagua (g)	8,57	13,00	17,9	18,39	31,02
Wsuelo (g)	107,24	143,56	160,03	141,88	205,08
W%	7,99	9,06	11,19	12,96	15,13

Fuente: Propia 2021

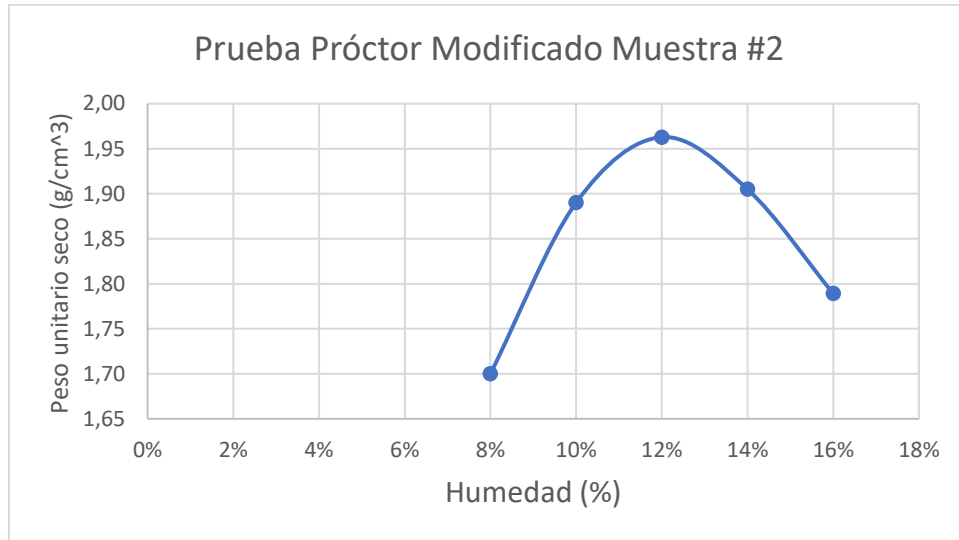
Para cada ensayo se calcularon cinco puntos para así obtener la humedad óptima de compactación con un 4% de cal, para la primer muestra se puede evidenciar en la gráfica 4 (Ver gráfica 4), que la humedad óptima es del 12%, para la segunda muestra se puede observar en la gráfica 5 (Ver Gráfica 5), que la humedad óptima es al igual que la primera del 12%, y así mismo para la tercer muestra se evidencia en la gráfica #6 (Ver gráfica 6), que la humedad al igual que en las dos primeras muestras es del 12%.

Gráfica 4. Gráfica Proctor Modificado Muestra 1.



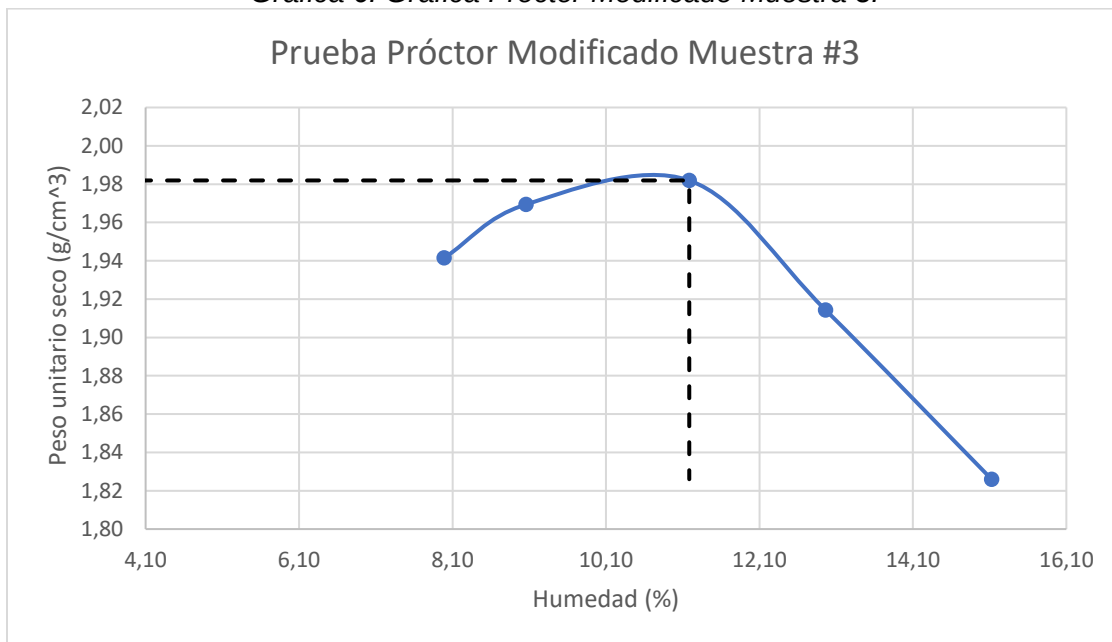
Fuente: Propia 2021

Gráfica 5. Gráfica Proctor Modificado Muestra 2.



Fuente: Propia 2021

Gráfica 6. Gráfica Proctor Modificado Muestra 3.



Fuente: Propia 2021

12.5. DETERMINACIÓN DEL AUMENTO DE LA RESISTENCIA EN PROBETAS CILÍNDRICAS CON DIFERENTES PORCENTAJES DE CAL

Se realizaron para cada muestra probetas con diferentes contenidos de cal, los resultados se muestran en las siguientes tablas, (Ver Tablas 11, 12 y 13)

Tabla 11. Datos Probetas Con Cal Muestra 1.

Cal (%)	6	4	3	2	1
Ws (g)	2000	2000	2000	2000	2000
Wcal (g)	120	80	60	40	20
Woptima-Cal (%)	12	12	12	12	12
Ww (g)	240	240	240	240	240
Molde	Y	Y	X	Y	X
Vol (cm3)	935,5	935,5	952,9	935,5	952,9
Wm (g)	1778,5	1778,5	1782,5	1778,5	1782,5
W Probeta	2065	2035	2035	2045	2050

Carga máxima (N)	3903,8	1955,6	2608,7	1785,8	1800,6
Esfuerzo (kN/m2)	481,5	241,2	321,8	220,3	222,1
Esfuerzo (MPa)	0,482	0,241	0,322	0,220	0,222

Fuente: Propia 2021

Tabla 12. Datos Probetas Con Cal Muestra 2.

Cal (%)	6	5	4	3	2	1
Ws (g)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Wcal (g)	120	100	80	60	40	20
Woptima-Cal (%)	12	12	12	12	12	12
Ww (g)	240	240	240	240	240	240
Molde	y	x	y	x	y	x
Vol (cm3)	935,5	952,9	935,5	952,9	935,5	952,9
Wm (g)	1778,5	1782,5	1778,5	1782,5	1778,5	1782,5
W m + molde	3800	3815	3835	3825	3810	3825
W probeta	2021,5	2032,5	2056,5	2042,5	2031,5	2042,5

Carga Máxima (N)	7770,6	5080,8	5767,1	4291,2	4202,6	3250,7
Esfuerzo (kN/m2)	958,5	626,7	711,3	529,3	518,4	401,0
Esfuerzo (MPa)	0,958	0,627	0,711	0,529	0,518	0,401

Fuente: Propia 2021

Tabla 13. Datos Probetas Con Cal Muestra 3.

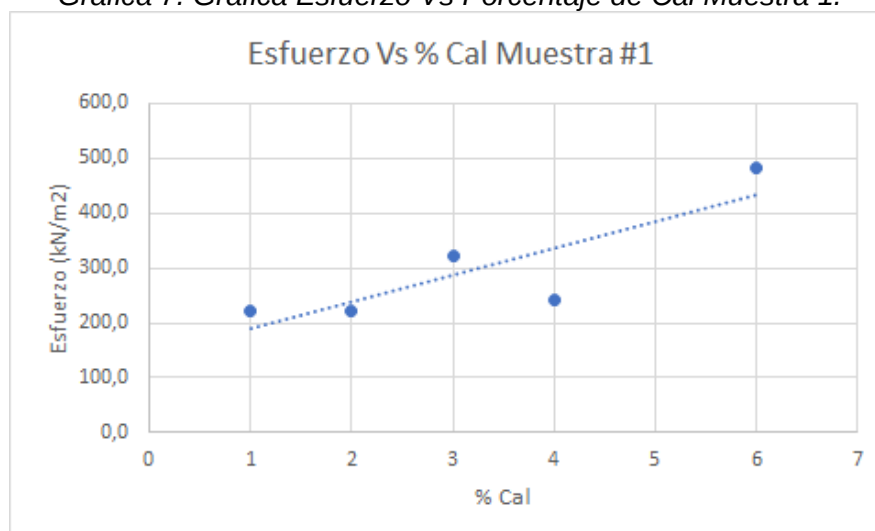
Cal (%)	6	5	4	3	2	1
Ws (g)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Wcal (g)	120	100	80	60	40	20
Woptima-Cal (%)	12	12	12	12	12	12
Ww (g)	240	240	240	240	240	240
Molde	y	x	y	x	y	x
Vol (cm ³)	935,5	952,9	935,5	952,9	935,5	952,9
Wm (g)	1778,5	1782,5	1778,5	1782,5	1778,5	1782,5
W m + molde	3845	3865	3860	3855	3760	3860
W probeta	2066,5	2082,5	2081,5	2072,5	1981,5	2077,5

Carga (N)	4095,6	3855,8	3940,7	3106,8	1036,8	2483,2
Esfuerzo (kN/m ²)	505,2	475,6	486,1	383,2	127,9	306,3
Esfuerzo (MPa)	0,505	0,476	0,486	0,383	0,128	0,306

Fuente: Propia 2021

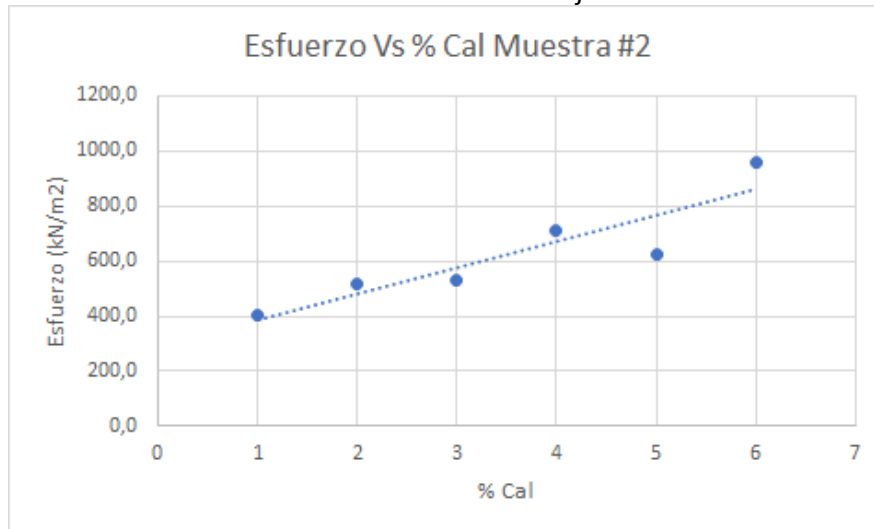
Con estos resultados se realizaron las siguientes gráficas (Ver Gráficas 7, 8 y 9) de Esfuerzo Vs porcentaje de Cal, donde se pudo determinar y cumplir con el objetivo principal que era ganar resistencia con ayuda de la cal.

Gráfica 7. Gráfica Esfuerzo Vs Porcentaje de Cal Muestra 1.



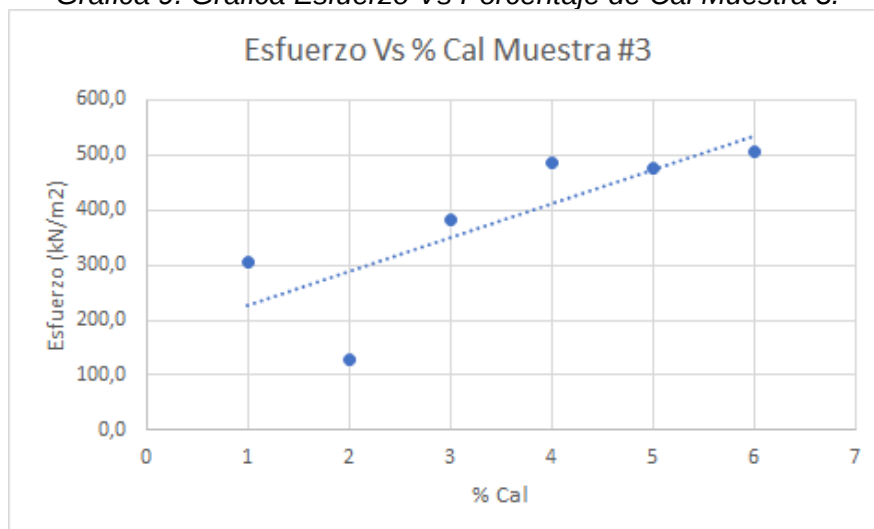
Fuente: Propia 2021

Gráfica 8. Gráfica Esfuerzo Vs Porcentaje de Cal Muestra 2.



Fuente: Propia 2021

Gráfica 9. Gráfica Esfuerzo Vs Porcentaje de Cal Muestra 3.

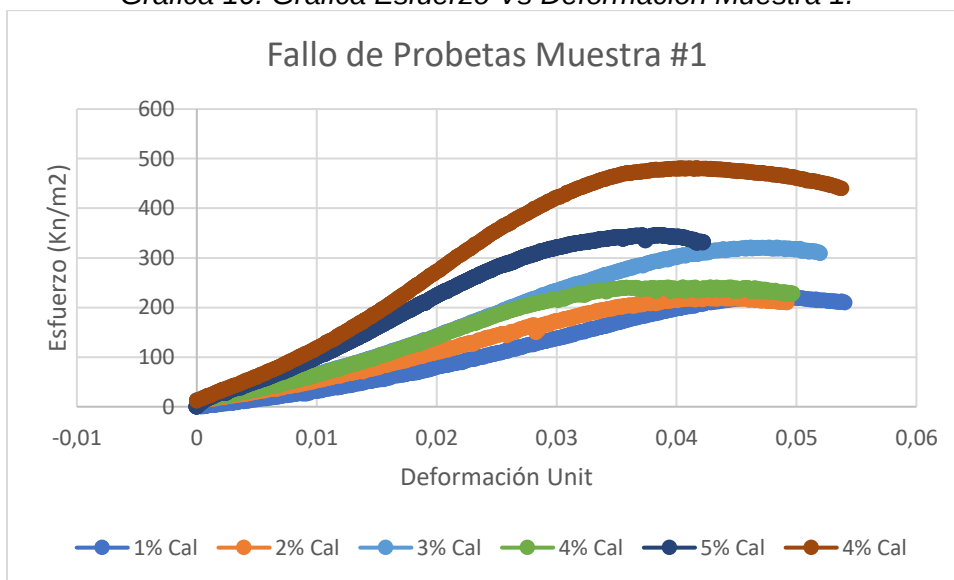


Fuente: Propia 2021

12.6. FALLO DE PROBETAS CON DIFERENTES CONTENIDOS DE CAL (COMPRESIÓN INCONFINADA)

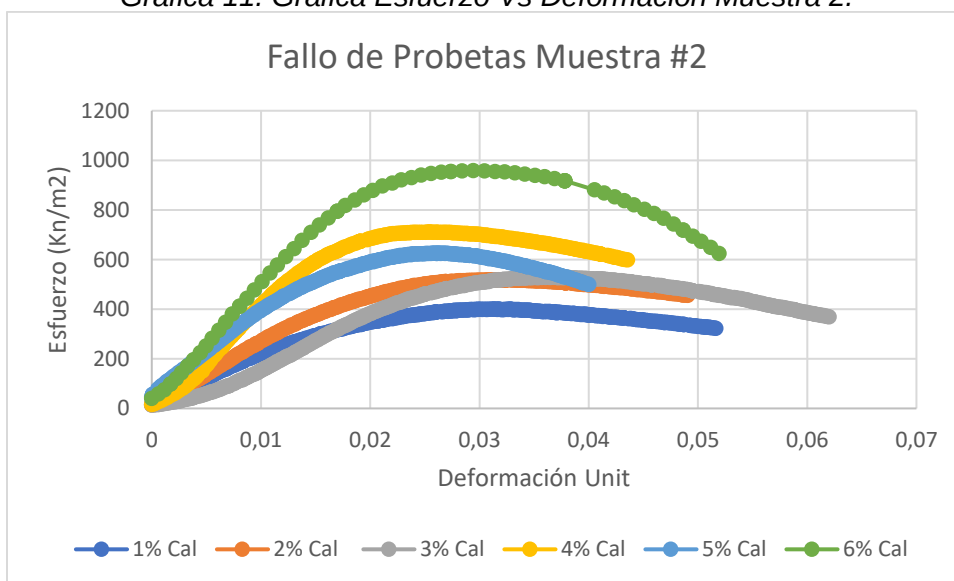
Se fallaron cada una de las probetas y sus resultados se muestran en las siguientes gráficas, donde se puede observar que gracias a la cal los granulares adquieren un aumento favorable en la resistencia.

Gráfica 10. Gráfica Esfuerzo Vs Deformación Muestra 1.



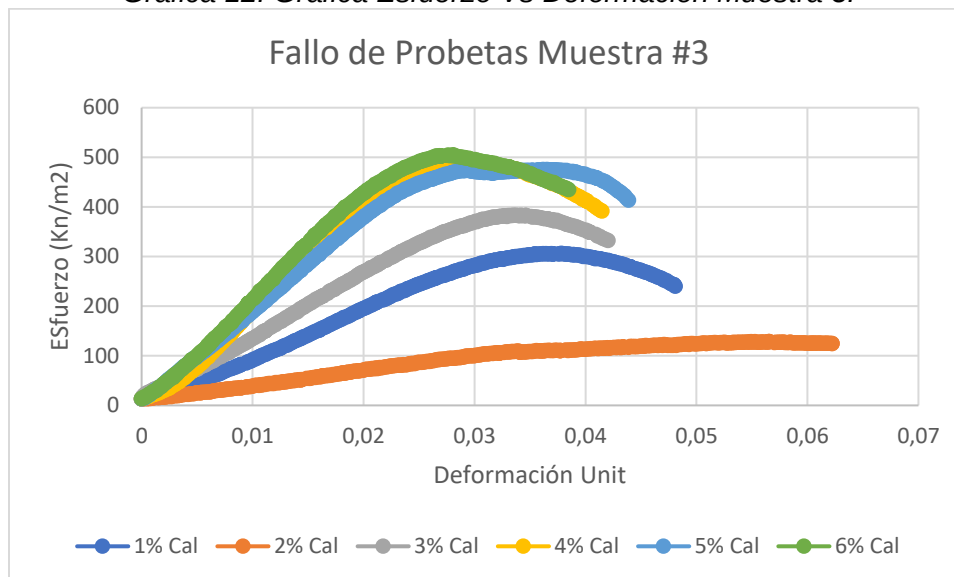
Fuente: Propia 2021

Gráfica 11. Gráfica Esfuerzo Vs Deformación Muestra 2.



Fuente: Propia 2021

Gráfica 12. Gráfica Esfuerzo Vs Deformación Muestra 3.



Fuente: Propia 2021

12.7. MÓDULOS DE ELASTICIDAD

Con ayuda de la gráfica esfuerzo deformación de las tres muestras, se calcularon los módulos de elasticidad con diferentes porcentajes de cal.

Muestra 1. (Módulos de elasticidad)

1% de Cal = 4972,17 kPa

2% de Cal = 5428,86 kPa

3% de Cal = 7404,81 kPa

4% de Cal = 6987,02 kPa

5% de Cal = 28936,07 kPa

6% de Cal = 48038,04 kPa

Muestra 2. (Módulos de elasticidad)

1% de Cal = 21539,09 kPa

2% de Cal = 25961,33 kPa

3% de Cal = 18446,77 kPa

4% de Cal = 40369,58 kPa

5% de Cal = 47526,06 kPa

6% de Cal = 46761,48 kPa

Muestra 3. (Módulos de elasticidad)

1% de Cal =9267,83 kPa

2% de Cal =12982,26 kPa

3% de Cal =13587,24 kPa

4% de Cal =20238,50 kPa

5% de Cal =18414,87 kPa

6% de Cal =21120,09 kPa

12.8. COSTO BENEFICIO DEL PROYECTO (APU)

Se realizó el siguiente APU, donde se indica el costo de tratar con cal un metro cúbico (1 m3) de material.

Tabla 14. APU

		UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS			
		Evaluación de propiedades de resistencia y rigidez en granulares remanentes de estructuras de pavimentos al tratarlos con cal, en Bogotá.			
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS - APU					
DESCRIPCIÓN:		Estabilización con cal		UNIDAD:	m3
1. MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD	VR UNIT		VR TOTAL
Cal Hidratada	Kg	81,00	\$ 979		\$ 79.326
Agua	Lt	240,00	\$ 530		\$ 127.200
Subtotal:					\$ 206.526
2. EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD	TARIFA	RENDIMIENTO	VR TOTAL
Compactador de suelos vibratorio CP533E CATERPILLAR (Tambor pata de cabra), ancho de compactación de 2134 mm y motor de 130 hp.		1	\$ 76.631,00	0,04	\$ 3.065,24
Fresadora y recicladora de pavimento, potencia 430 HP, peso 20 Ton		1	\$ 566.610,00	0,03	\$ 18.868,11
Herramienta menor	Gb	= 10% del Vr. de la Mano de Obra			\$ 4.410
Subtotal:					\$ 26.343
4. MANO DE OBRA					
TRABAJADOR	CANT	JORNAL	FACTOR PRESTACIONAL	JORNAL TOTAL	RENDIMIENTO VR TOTAL
Oficial	1	\$ 63.000	1,80	\$ 113.400	4,00 \$ 28.350
Ayudante	1	\$ 35.000	1,80	\$ 63.000	4,00 \$ 15.750
Subtotal:					\$ 44.100
TOTAL COSTO DIRECTO APU					\$ 276.969

Fuente: Propia 2021

13. Conclusiones

1. Conforme a los resultados obtenidos y mediante el ensayo de límites de Atterberg y compresión inconfiada se pudo establecer que los MGR tratados con cal, cumplen con algunas de las especificaciones técnicas del IDU para bases y subbases en vías, andenes y ciclorutas, este parámetro que se identificó en los resultados de laboratorio, fue la reducción en el índice de plasticidad en las tres muestras analizadas, adicionalmente del ensayo de compresión simple, se estudiaron los resultados obtenidos de esfuerzo vs deformación unitaria, para establecer la rigidez del material a través del tiempo variando la carga.
2. De acuerdo con la caracterización realizada se estableció mediante el ensayo de granulometría el tipo de material. La muestra número uno, recolectada en la localidad de Chapinero es una grava bien graduada (GW). La muestra número dos, recolectada en la localidad de Engativá, es una grava bien graduada (GW), estas dos muestras se ven influenciadas porque contienen porciones similares de agregado grueso y agregado fino. La muestra número tres, recolectada en la localidad de Puente Aranda es una arena pobremente graduada (SP) contiene porciones diferentes de cada tamaño de agregado y predomina la presencia de partículas de arena.
3. Se determinó con ayuda del ensayo Eades & Grim que para las tres muestras recolectadas de MGR, el porcentaje mínimo óptimo de cal es de 4% para la porción fina, con este porcentaje el material tratado, cumple con un aumento en el comportamiento mecánico, lo que le proporciona viabilidad para su reutilización como material de relleno en pavimentos.
4. La reacción química entre el óxido de calcio (CaO) y el MGR, genera una reacción puzolánica a largo plazo, con lo que se logra un incremento en la resistencia de las muestras tratadas a través del tiempo, a su vez genera la reducción de los cambios volumétricos.
5. Frente a los resultados obtenidos, en tres muestras recolectadas en diferentes lugares de Bogotá, se puede afirmar que tratarlas con el 4% de cal en la porción fina, es viable para su reutilización en rehabilitación de estructuras de pavimento, andenes y ciclorutas. Al someter las diferentes muestras al ensayo de compresión, los criterios de módulo de elasticidad (rigidez), deformación máxima y esfuerzos máximos demostraron satisfactoriamente que estos granulares se pueden mejorar in-situ, brindándole buenas condiciones de resistencia y generando un factor económico y ambiental positivo, debido a que se reduce la explotación de canteras y disminuyen los costos por concepto de transporte de material existente y desecho de estos en los lugares de disposición de residuos de construcción.

6. Los resultados obtenidos en la investigación de “Evaluación de propiedades de resistencia y rigidez en granulares remanentes de estructuras de pavimentos al tratarlos con cal, en Bogotá.” muestra como resultado que los MGR tratados con CaO reaccionan en la porción fina >25% de la muestra y logra disminuir el contenido de humedad, aumentar la resistencia, la cual no depende directamente de los esfuerzos, adicionalmente al estar mezclado con cal sus propiedades en la muestra no se degradan con la misma velocidad que un material sin adición de cal.
7. Para determinar la cantidad adecuada de cal se debe realizar el ensayo de Eades and Grim (I.N.V.E - 601 - 13), mediante este ensayo se liberan el sílice y la alúmina de la muestra de material granular y reaccionan con la cal formando hidratos de calcio-silicatos (CSH) e hidratos de calcio-aluminatos (CAH) que son productos cementantes que forman la matriz que contribuye a la resistencia del granular tratado.

14. Recomendaciones

1. Para que la estabilización con cal en un material granular sea eficaz, se debe considerar un índice de plasticidad igual o mayor a 10, adicionalmente la porción de finos del material granular que pasa el tamiz 200 debe ser >25% y debe contener un porcentaje mínimo del 7% de arcilla y un pH de 10,5%.
2. El granular a tratar no debe contener presencia mayor al 1% de materia orgánica o de ciertas sales como los sulfatos. Si existe presencia de materia orgánica se puede inhibir la reacción de la cal y si hay presencia de sulfatos se pueden producir reacciones expansivas.
3. El personal encargado de la aplicación de cal debe ser experimentado y contar con las medidas establecidas por seguridad y salud en el trabajo, de modo que no ponga en riesgo su salud y la de las personas que se encuentren alrededor.
4. El método de aplicación recomendado a través de esta evaluación es en forma de lechada y se puede fabricar en obra, por medio de equipos que permitan la hidratación de la cal, también se debe disponer de mezcladores bien sean fijos o sobre camión para realizar la agitación de la cal y el agua. Una vez finalizado el proceso anterior se dispone de un camión cisterna adecuado para bombear la lechada con el caudal necesario, este debe contar con un caudalímetro para regular la capacidad del caudal y la velocidad de avance. Este método se recomienda porque las partículas de cal están hidratadas antes de mezclarse con el material granular, con lo que se obtiene como resultado la disminución en riesgo por dispersión del material por la acción del viento.
5. El Tratamiento de un material granular con cal puede mejorar considerablemente la trabajabilidad y resistencia de este y usualmente se utiliza del 1 al 4 por ciento de cal en relación del peso del material granular sometido a modificación.
6. Es importante la aplicación de los ensayos de laboratorio para establecer si el material granular recolectado es viable para someterlo a tratamiento de estabilización con cal y para ello se debe determinar el contenido mínimo óptimo de cal mediante el ensayo Eades & Grim para así establecer %Cao y pH, lo siguiente es realizar el ensayo de Proctor con el porcentaje de cal óptimo para identificar la humedad óptima de compactación del material y por último se deben realizar probetas con diferentes porcentajes cal para determinar los cambios mecánicos de aumento de rigidez y resistencia.

15. Referencias

- Argos, *Rigidez de La Estructura*. Consultado el 21 de agosto de 2021. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/categoria/calidad-y-aspectos-tecnicos/rigidez-de-las-estructuras-y-resistencia-del-concreto>
- Abuchar, O. D., Brajas, B. M., & Campo, F. G. (2006). *Estabilización con cal del suelo de Cartagena para ser utilizado como base*. Cartagena De Indias: Universidad Tecnológica de Bolívar.
- Ancade. (2008). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Madrid.
- Arkisplus.com, E. D. (2011). Arkisplus. Recuperado de <https://www.arkiplus.com/la-via-apia/>
- Caltek. (2019), *Tratamiento de suelos con cal*. Recuperado de <http://caltek.com.co/tratamiento-de-suelos-con-cal/>
- Calco Cales de Colombia S.A. *Cales Hidratadas*. Consultado el 3 de agosto de 2021. <https://www.calco.com.co/producto/cal-hidratada-tipo-e/>
- Cemex. (2021). *Agregados*. Recuperado de <https://www.cemexcolombia.com/productos/agregados/recebo>
- Cotecno. *Compactación del suelo: Métodos de Ensayo de Compactación del Suelo y Sus Usos*. Consultado el 3 de agosto de 2021. <https://www.cotecno.cl/compactacion-del-suelo-metodos-de-ensayo-de-compactacion-del-suelo-y-sus-usos/>
- Instituto nacional de vías [Invias] (2008), *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras*. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentostecnicos/especificaciones-tecnicas/986-guia-metodologica-para-el-diseno-de-obras-de-rehabilitacion-de-pavimentos-asfalticos-de-carreteras>.
- Instituto nacional de vías [Invias] (2013), *Sección 600 – Estabilización de suelos (I.N.V.E – 601 – 13)*. Recuperado de <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/harenas/docs/LABORATORIO%20DE%20PAVIMENTOS/INVIAS%202013/SECCI%C3%93N%20600.pdf>
- Instituto nacional de vías [Invias] (2013), *Compresión inconfina en muestras de suelos (I.N.V.E – 152 – 13)*. Recuperado de <ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones Normas INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-152-07.pdf>
- Instituto nacional de vías [Invias] (2013), *Determinación del límite líquido de los suelos (I.N.V.E – 125 – 13)*. Recuperado de <ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones Normas INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-125-07.pdf>

- Instituto nacional de vías [Invias] (2013), *Límite plástico e índice de plasticidad de suelos* (I.N.V.E – 126 – 13). Recuperado de ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-126-07.pdf
- Intical. *Lechada de Cal*. Consultado el 21 de agosto de 2021. <https://www.intical.com.pe/brochure-lechada-de-cal.pdf>
- Little, D. N. (2004). *Manual de estabilización de suelo tratado con cal*. The National Lime Association.
- Little, D.N. (1999). *Evaluación de propiedades estructurales de suelos y áridos estabilizados con cal*. The National Lime Association.
- Maldonado, H. M., & Martínez, A. C. (2009). *Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en el Salvador*. Universidad del Salvador.
- Montejo, A (2002). *Ingeniería de pavimentos*. (p. 2, 5, 7), Recuperado de https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_Alfonso_Montejo_Fonseca?auto=download
- Montejo, A (1997). *Ingeniería de Pavimentos* (1ª edición). Ediciones y publicaciones Universidad Católica de Colombia.
- Navarrete, M. E. (2017). *Estabilización de suelos superficiales del Naicm con óxido de calcio (CaO)*. México: Universidad Nacional Autónoma De México.
- Castaño, J., Rodríguez, R., Lasso, L., & Ocampo, A. C. (2013). *Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: Perspectivas y limitantes*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Consorcio proyección. (2014). *EVALUACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y FUTURA DEL MERCADO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y ARCILLAS EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ, MEDELLÍN, BUCARAMANGA, BARRANQUILLA, SANTA MARTA HY EJE CAFETERO*. Bogotá: Upme.
- IDU. (19 de 12 de 2019). 10.9. *Subbase granular para vías peatonales y ciclorutas con agregados reciclados obtenidos de residuos de construcción y demolición RCD*. Obtenido de Instituto de Desarrollo Urbano: https://www.idu.gov.co/Archivos_Portal/Transparencia/Informacion%20de%20interes/SIIPVIALES/Innovaci%C3%B3n/Portafolio/2020/ET-IC-01-Especificaciones-tecnicas-generales/513-18%20SUBBASE%20GRANULAR%20PARA%20V%C3%8DAS%20PEATONALES%20Y%20CICLORUTAS%20CON%20AG

- IDU. (19 de 12 de 2019). *Base y subbase para vías vehiculares con agregados reciclados obtenidos de residuos de construcción y demolición RCD*. Obtenido de Instituto de desarrollo urbano IDU:
https://www.idu.gov.co/Archivos_Portal/Transparencia/Informacion%20de%20intereses/SIIPVIALES/Innovaci%C3%B3n/Portafolio/2020/ET-IC-01-Especificaciones-tecnicas-generales/511-18%20BASE%20Y%20SUBBASE%20GRANULAR%20PARA%20V%C3%8DAS%20VEHICULARES%20CON%20AGREGAD
- IDU. (19 de 12 de 2019). *Generalidades para y subbases granulares*. Obtenido de Instituto de desarrollo urbano IDU:
https://www.idu.gov.co/Archivos_Portal/Transparencia/Informacion%20de%20intereses/SIIPVIALES/Innovaci%C3%B3n/Portafolio/2020/ET-IC-01-Especificaciones-tecnicas-generales/500-18%20GENERALIDADES%20PARA%20BASES%20Y%20SUBBASES%20GRANULARES.pdf

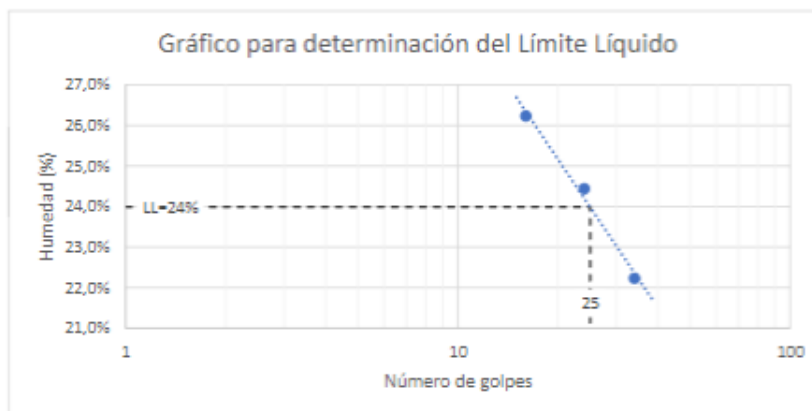
16. Anexos

16.1. Anexo 1 (Límites Muestra 1, 2 y 3)

DETERMINACIÓN LÍMITES DE CONSISTENCIA EN SUELOS Y AGREGADOS (INV E 125-13 e INV E 126-13)

Material	<u>1</u>
Descripción:	<u>Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamaños</u>
Procedencia:	<u>Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Calle 92 entre carreras 11 y 15 - Localidad de Chapinero en Bogotá D.C.</u>
Profundidad (m):	<u>0,15 - 0,80</u>

Golpes	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	16	24	34	-	-
Masa muestra húmeda más recipiente (g)	31,57	32,38	34,19	20,84	20,29
Masa recipiente (g)	12,18	11,25	14,18	13,97	14,48
Masa muestra seca más recipiente (g)	27,54	28,23	30,55	19,89	19,47
Humedad (%)	26,2%	24,4%	22,2%	16,0%	16,4%



LL 24%
 LP 16%
 IP 8%

DETERMINACIÓN LÍMITES DE CONSISTENCIA EN SUELOS Y AGREGADOS (INV E 125-13 e INV E 126-13)

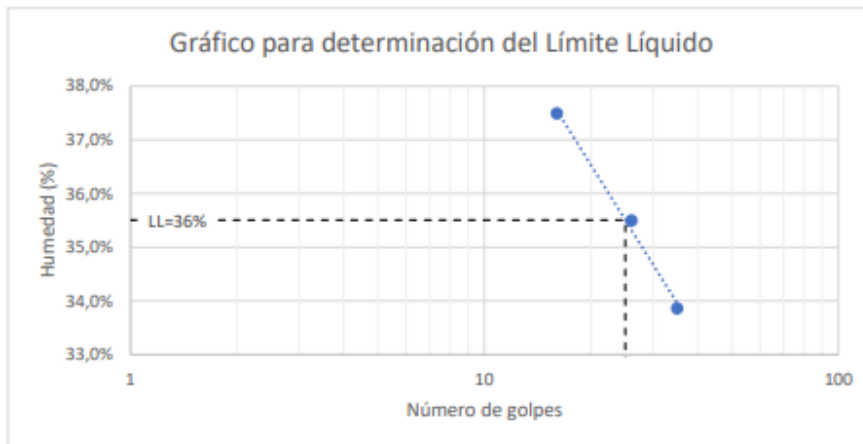
Material 2

Descripción: Recebo arenoso marron oscuro con gravas y sobretamaños

Procedencia: Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Carrera 95 G 86A-17 -
Localidad de Engativa en Bogotá D.C.

Profundidad (m): 0,15 - 0,80

Golpes	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	16	26	35	-	-
Masa muestra húmeda más recipiente (g)	30,46	29,28	33,6	16,91	14,82
Masa recipiente (g)	14,36	13,82	17,47	14,54	11,97
Masa muestra seca más recipiente (g)	26,07	25,23	29,52	16,5	14,34
Humedad (%)	37,5%	35,5%	33,9%	20,9%	20,3%



LL 36%

LP 21%

IP 15%

DETERMINACIÓN LÍMITES DE CONSISTENCIA EN SUELOS Y AGREGADOS (INV E 125-13 e INV E 126-13)

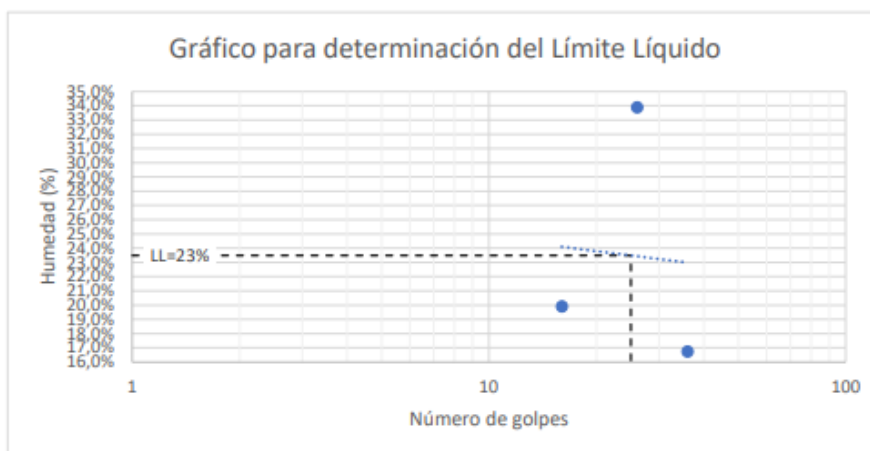
Material 3

Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamaños

Procedencia: Rehabilitación vial - Pavimento Carrera 36 # 18 sur 1 - Localidad de
Puente Aranda en Bogotá D.C.

Profundidad (m): 0,15 - 0,80

	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	Golpes	16	26	36	
Masa muestra húmeda más recipiente (g)		26,40	23,43	27,37	22,77
Masa recipiente (g)		14,23	14,34	13,98	14,79
Masa muestra seca más recipiente (g)		24,38	21,13	25,45	21,87
Humedad (%)		19,9%	33,9%	16,7%	12,7%



LL 23%

LP 17%

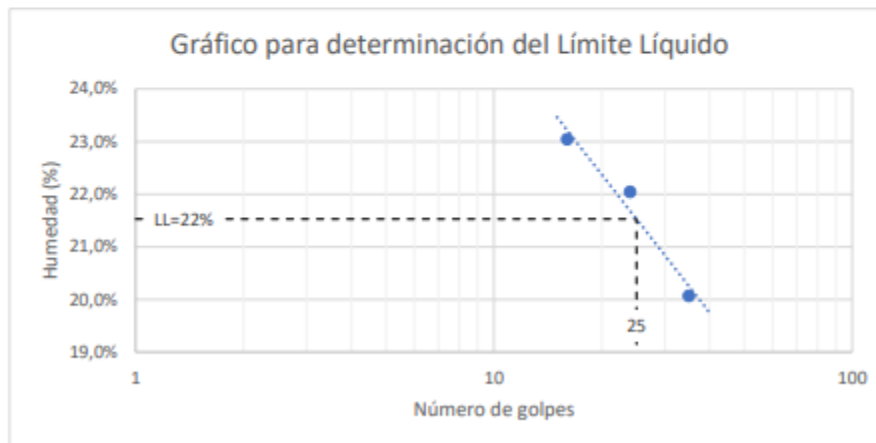
IP 6%

16.2. Anexo 2 (Límites con Cal Muestra 1, 2 y 3)

DETERMINACIÓN LÍMITES DE CONSISTENCIA EN SUELOS Y AGREGADOS (INV E 125-13 e INV E 126-13)

Material	<u>1 (+4% cal)</u>
Descripción:	<u>Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamaños con 4% de cal</u>
Procedencia:	<u>Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Calle 92 entre carreras 11 y 15 - Localidad de Chapinero en Bogotá D.C.</u>
Profundidad (m):	<u>0,15 - 0,80</u>

Golpes	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	16	24	35	-	-
Masa muestra húmeda más recipiente (g)	40,59	29,94	46,53	17,42	18,04
Masa recipiente (g)	14,48	12,00	17,57	13,66	13,94
Masa muestra seca más recipiente (g)	35,70	26,70	41,69	16,90	17,49
Humedad (%)	23,0%	22,0%	20,1%	16,0%	15,5%



LL **22%**
LP **16%**
IP **6%**

DETERMINACIÓN LÍMITES DE CONSISTENCIA EN SUELOS Y AGREGADOS (INV E 125-13 e INV E 126-13)

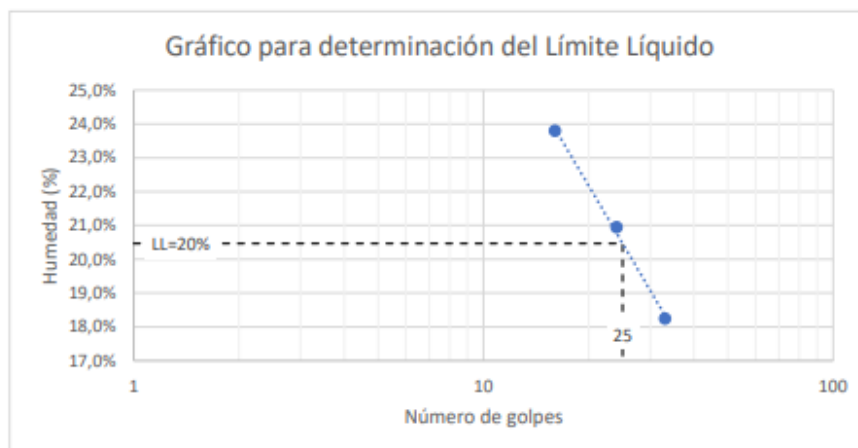
Material 3

Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamaños

Procedencia: Rehabilitación vial - Pavimento Carrera 36 # 18 sur 1 - Localidad de
Puente Aranda en Bogotá D.C.

Profundidad (m): 0,15 - 0,80

Golpes	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	16	24	33	-	-
Masa muestra húmeda más recipiente (g)	40,10	35,78	28,75	21,86	19,24
Masa recipiente (g)	14,04	14,07	14,82	15,07	14,28
Masa muestra seca más recipiente (g)	35,09	32,02	26,6	20,87	18,52
Humedad (%)	23,8%	20,9%	18,3%	17,1%	17,0%



LL **20%**

LP **17%**

IP **3%**

DETERMINACIÓN LÍMITES DE CONSISTENCIA EN SUELOS Y AGREGADOS (INV E 125-13 e INV E 126-13)

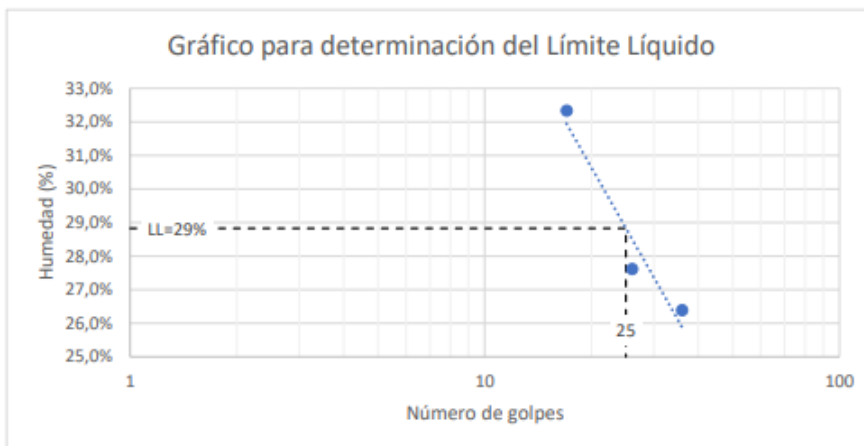
Material 2

Descripción: Recebo arenoso marron oscuro con gravas y sobretamaños

Procedencia: Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Carrera 95 G 86A-17 -
Localidad de Engativa en Bogotá D.C.

Profundidad (m): 0,15 - 0,80

	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	Golpes	17	26	36	-
Masa muestra húmeda más recipiente (g)		27,74	33,93	31,12	15,46
Masa recipiente (g)		14,07	17,57	17,47	14,46
Masa muestra seca más recipiente (g)		24,40	30,39	28,27	15,32
Humedad (%)		32,3%	27,6%	26,4%	16,3%



LL 29%

LP 17%

IP 12%

16.3. Anexo 3 (Granulometría Muestra 1, 2 y 3)

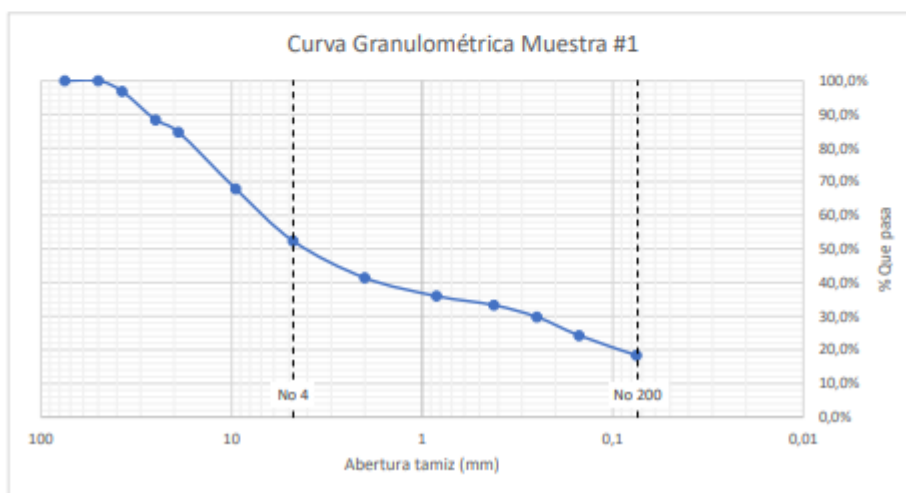
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTICULA POR TAMIZADO (INV E-123-13)

Material: 1

Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamaños

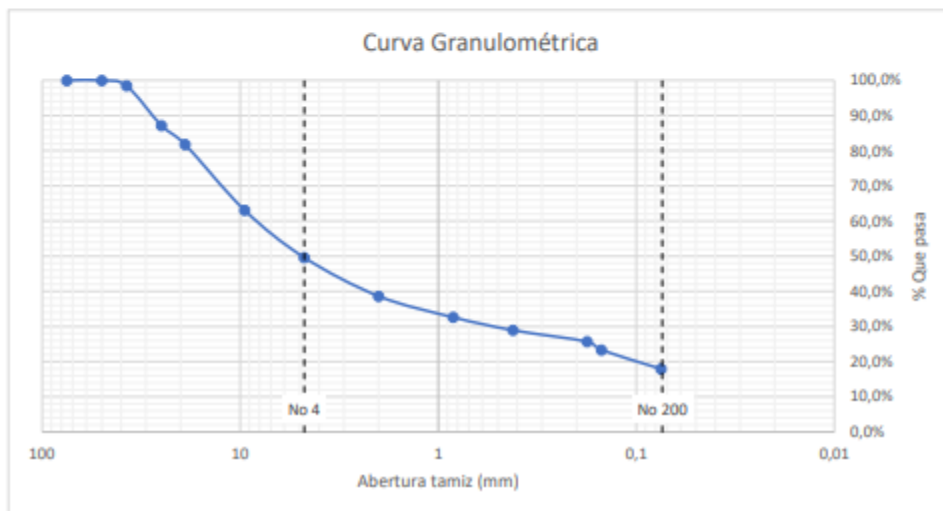
Procedencia: Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Calle 92 entre carreras 11 y 15 - Localidad de Chapinero en Bogotá D.C.

DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTICULA POR TAMIZADO (INV E-123-13) Muestra #1					
Denominación	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	%Retenido acumulado	% Pasa
3"	75	0	0,0%	0,0%	100,0%
2"	50	0	0,0%	0,0%	100,0%
1 1/2"	37,5	200	3,2%	3,2%	96,8%
1 "	25	530	8,5%	11,7%	88,3%
3/4"	19	225	3,6%	15,2%	84,8%
3/8"	9,5	1060	16,9%	32,2%	67,8%
No. 4	4,75	970	15,5%	47,6%	52,4%
No.10	2,00	685	10,9%	58,6%	41,4%
No.20	0,841	340	5,4%	64,0%	36,0%
No.40	0,420	170	2,7%	66,7%	33,3%
No.60	0,250	220	3,5%	70,2%	29,8%
100	0,150	345	5,5%	75,7%	24,3%
200	0,075	370	5,9%	81,6%	18,4%
Fondo		1150	18,4%	100,0%	0,0%
Total Muestra		6265	100,0%		



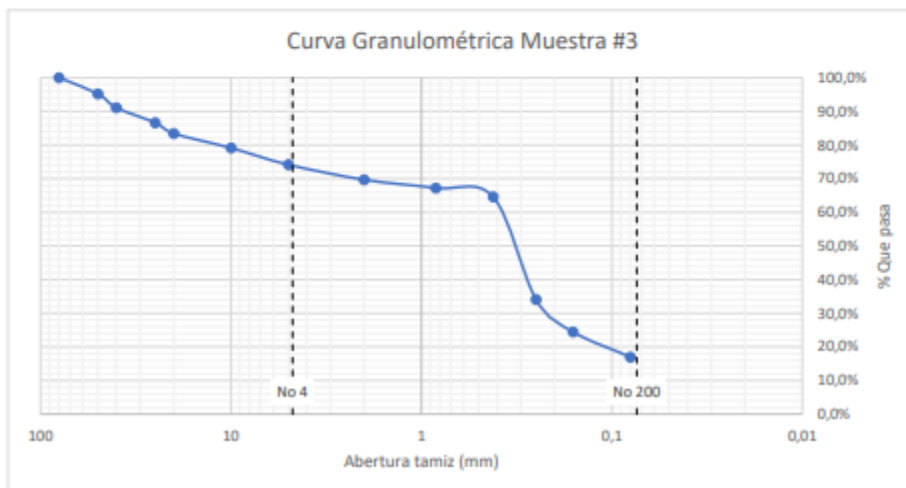
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTICULA POR TAMIZADO (INV E-123-13)Material 2Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamañosProcedencia: Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Carrera 95 G 86A-17 - Localidad de Engativa en Bogotá D.C.

Denominación	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	%Retenido acumulado	% Pasa
3"	75	0	0,0%	0,0%	100,0%
2"	50	0	0,0%	0,0%	100,0%
1 1/2"	37,5	97	1,5%	1,5%	98,5%
1 "	25	710	11,3%	12,8%	87,2%
3/4"	19	337	5,4%	18,2%	81,8%
3/8"	9,5	1177	18,7%	36,9%	63,1%
No. 4	4,75	845	13,4%	50,4%	49,6%
No.10	2,00	691	11,0%	61,4%	38,6%
No.20	0,841	377	6,0%	67,4%	32,6%
No.40	0,420	231	3,7%	71,1%	28,9%
No.80	0,177	205	3,3%	74,3%	25,7%
100	0,150	150	2,4%	76,7%	23,3%
200	0,075	337	5,4%	82,1%	17,9%
Fondo		1126	17,9%	100,0%	0,0%
Total Muestra		6283	100,0%		



DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTICULA POR TAMIZADO (INV E-123-13)Material 3Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamañosProcedencia: Rehabilitación vial - Pavimento Carrera 36 # 18 sur 1 - Localidad de Puente Aranda en Bogotá D.C.

DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTICULA POR TAMIZADO (INV E-123-13) Muestra #3					
Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	%Retenido acumulado	% Pasa
3"	80	0	0,0%	0,0%	100,0%
2"	50	269	4,8%	4,8%	95,2%
1 1/2"	40	234	4,1%	8,9%	91,1%
1 "	25	254	4,5%	13,4%	86,6%
3/4"	20	179	3,2%	16,6%	83,4%
3/8"	10	245	4,3%	20,9%	79,1%
No. 4	5	280	5,0%	25,8%	74,2%
No.10	2	253	4,5%	30,3%	69,7%
No.20	0,841	139	2,5%	32,8%	67,2%
No.40	0,42	149	2,6%	35,4%	64,6%
No.80	0,25	1727	30,5%	66,0%	34,0%
100	0,16	543	9,6%	75,6%	24,4%
200	0,08	422	7,5%	83,0%	17,0%
Fondo		960	17,0%	100,0%	0,0%
Total Muestra		5654	100,0%		



16.4. Anexo 4 (Eades & Grim Muestra 1, 2 y 3)

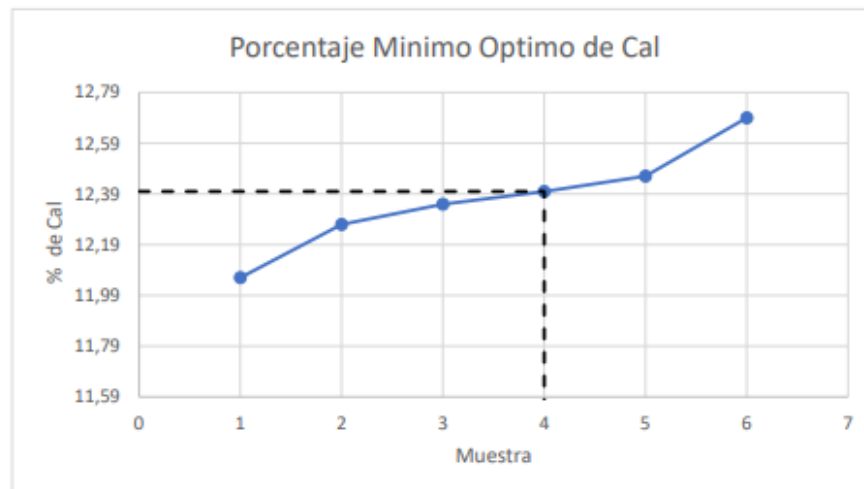
ESTIMACIÓN DE LA PORCIÓN DE CAL NECESARIA PARA ESTABILIZAR UN SUELO A PARTIR DE LA MEDIDA DEL pH (INV E – 601-13).

Material 1

Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamaños

Procedencia: Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Calle 92 entre carreras 11 y 15 - Localidad de Chapinero en Bogotá D.C.

Eades & Grim Muestra #1				
Muestra	Peso (g)	Cal (%)	Cal (g)	PH
Muestra 1	25	1	0,25	12,06
Muestra 2	25	2	0,5	12,27
Muestra 3	25	3	0,75	12,35
Muestra 4	25	4	1	12,40
Muestra 5	25	5	1,25	12,46
Muestra 6	25	6	1,5	12,69
Muestra 7	2.0 g de cal			12,76



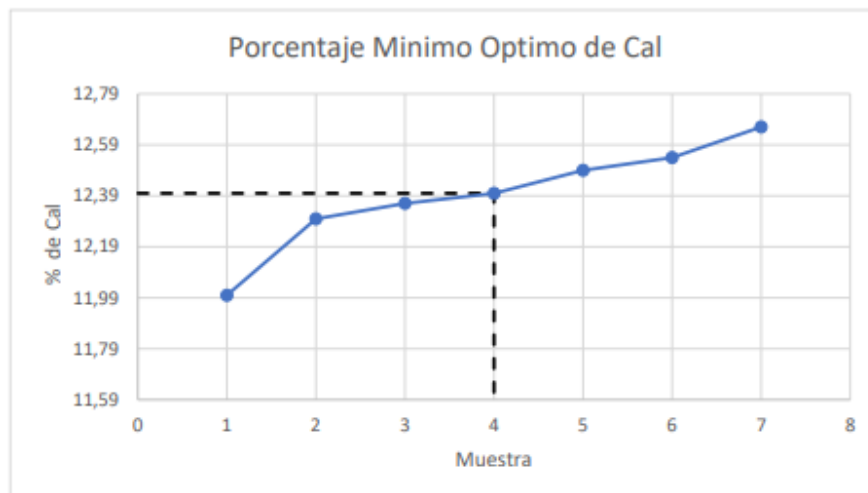
ESTIMACIÓN DE LA PORCIÓN DE CAL NECESARIA PARA ESTABILIZAR UN SUELO A PARTIR DE LA MEDIDA DEL pH (INV E –601-13).

Material 2

Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamaños

Procedencia: Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Carrera 95 G 86A-17 - Localidad de Engativa en Bogotá D.C.

Eades & Grim Muestra #2				
Muestra	Peso (g)	Cal (%)	Cal (g)	PH
Muestra 1	25	1	0,25	12
Muestra 2	25	2	0,5	12,3
Muestra 3	25	3	0,75	12,36
Muestra 4	25	4	1	12,4
Muestra 5	25	5	1,25	12,49
Muestra 6	25	6	1,5	12,54
Muestra 7	2.0 g de cal			12,66



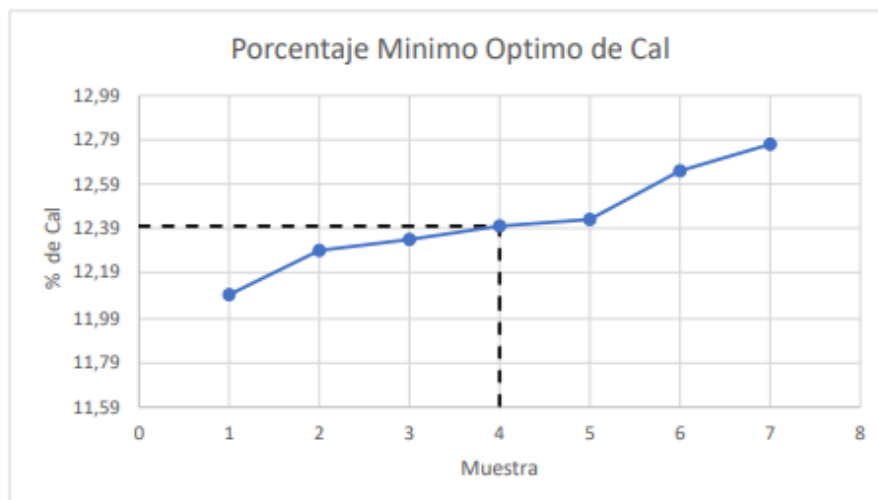
ESTIMACIÓN DE LA PORCIÓN DE CAL NECESARIA PARA ESTABILIZAR UN SUELO A PARTIR DE LA MEDIDA DEL pH (INV E –601-13).

Material 3

Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamaños

Procedencia: Rehabilitación vial - Pavimento Carrera 36 # 18 sur 1 - Localidad de
Puente Aranda en Bogotá D.C.

Eades & Grim Muestra #3				
Muestra	Peso (g)	Cal (%)	Cal (g)	PH
Muestra 1	25	1	0,25	12,09
Muestra 2	25	2	0,5	12,29
Muestra 3	25	3	0,75	12,34
Muestra 4	25	4	1	12,40
Muestra 5	25	5	1,25	12,43
Muestra 6	25	6	1,5	12,65
Muestra 7	2.0 g de cal			12,77



16.5. Anexo 5 (Proctor Modificado Muestra 1, 2 y 3)

DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE EQUILIBRIO DE LA MASA UNITARIA (DENSIDAD) SECA Y DE LA HUMEDAD EN UN SUELO (INV E-146-13).

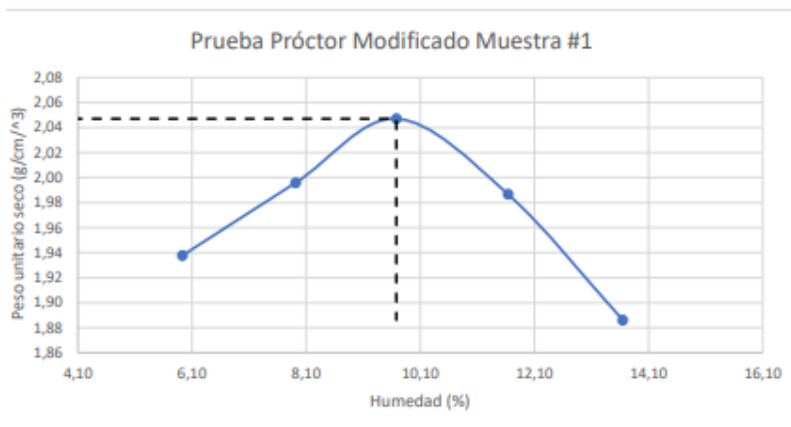
Material 1

Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamaños

Procedencia: Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Calle 92 entre carreras 11 y 15 - Localidad de Chapinero en Bogotá D.C.

PROCTOR MODIFICADO MUESTRA #1						Ø	10,12	cm
Wo	0%					h	11,63	cm
Wdeseada	6%	8%	10%	12%	14%	Volumen	935,47	cm ³
ΔW	6%	8%	10%	12%	14%			
Ws (g)	2000	2000	2000	2000	2000			
ΔWw (g)	120	160	200	240	280			
Wm (g)	1778,5	1778,5	1778,5	1778,5	1778,5			
Wm+Sc (g)	3700	3795	3885	3860	3790			
WSc (g)	1921,5	2016,5	2106,5	2081,5	2011,5			
Vm (cm ³)	935,47	935,47	935,47	935,47	935,47			
γT (g/cm ³)	2,05	2,16	2,25	2,23	2,15			
γd (g/cm ³)	1,94	2,00	2,05	1,99	1,89			

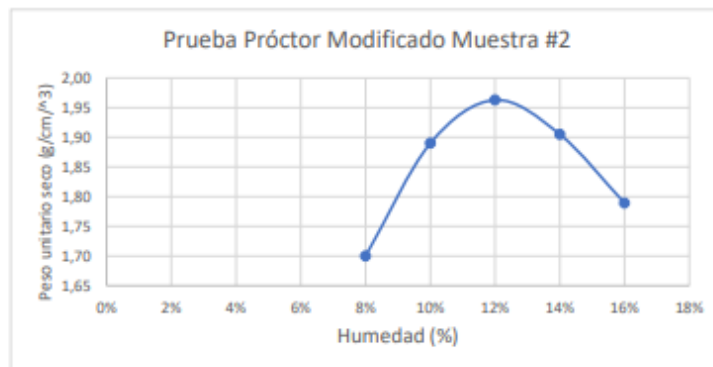
Recipiente	9	cp	5	11	w
Wr (g)	39,82	43,60	43,02	45,53	48,75
Wr+mh (g)	361,62	304,58	376,26	388,44	359,51
Wr+ms (g)	343,6	285,44	346,85	352,69	322,19
Wagua (g)	18,02	19,14	29,41	35,75	37,32
Wsuelo (g)	303,78	241,84	303,83	307,16	273,44
W%	5,93	7,91	9,68	11,64	13,65



DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE EQUILIBRIO DE LA MASA UNITARIA (DENSIDAD) SECA Y DE LA HUMEDAD EN UN SUELO (INV E-146-13).Material 2Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamañosProcedencia: Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Carrera 95 G 86A-17 -Localidad de Engativa en Bogotá D.C.

PROCTOR MODIFICADO MUESTRA #2						Ø	10,12	cm
Cal	4%	4%	4%	4%	4%	h	11,63	cm
Wcal (g)	80	80	80	80	80	W	1778,5	g
Wdeseada	8%	10%	12%	14%	16%	Volumen	935,47	cm ³
ΔW	8%	10%	12%	14%	16%			
Ws	2000	2000	2000	2000	2000			
ΔWw	160	200	240	280	320			
Wm	1778,5	1778,5	1778,5	1778,5	1778,5			
Wm+sc	3815	3830	3835	3810	3720			
Wsc	2036,5	2051,5	2056,5	2031,5	1941,5			
Vm	935,47	935,47	935,47	935,47	935,47			
γT (g/cm ³)	2,18	2,19	2,20	2,17	2,08			
γd (g/cm ³)	1,70	1,89	1,96	1,90	1,79			

Recipiente	#10	#5	#2	15	5
Wr (g)	39,80	40,20	44,00	39,00	43,00
Wr+mh (g)	99,9	170,5	202,7	159,4	265,5
Wr+ms (g)	94,23	158,10	187,34	145,59	234,55
Wagua (g)	5,67	12,40	15,36	13,81	30,95
Wsuelo (g)	54,43	117,9	143,34	106,59	191,55
W%	10,42	10,52	10,72	12,96	16,16



DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE EQUILIBRIO DE LA MASA UNITARIA (DENSIDAD) SECA Y DE LA HUMEDAD EN UN SUELO (INV E-146-13).

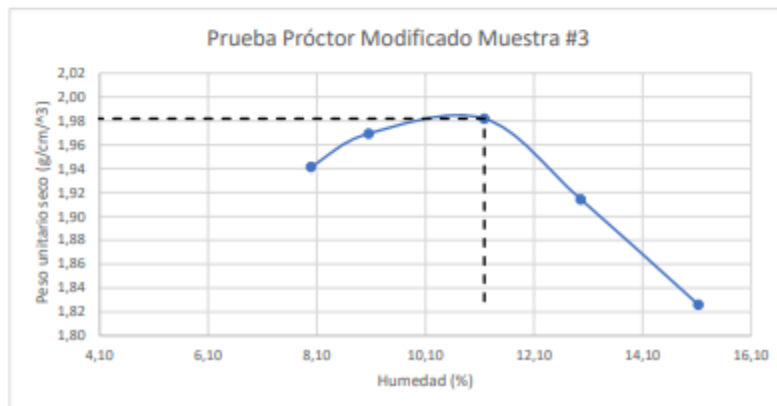
Material 3

Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamaños

Procedencia: Rehabilitación vial - Pavimento Carrera 36 # 18 sur 1 - Localidad de
Puente Aranda en Bogotá D.C.

PROCTOR MODIFICADO MUESTRA #3						Ø	10,12	cm
Cal	4%	4%	4%	4%	4%	h	11,63	cm
Wcal (g)	80	80	80	80	80	W	1778,5	g
Wdeseada	8%	10%	12%	14%	16%	Volumen	935,47	cm ³
ΔW	8%	10%	12%	14%	16%			
Ws	2000	2000	2000	2000	2000			
ΔWw	160	200	240	280	320			
Wm	1778,5	1778,5	1778,5	1778,5	1778,5			
Wm+sc	3740	3805	3855	3820	3760			
Wsc	1961,5	2026,5	2076,5	2041,5	1981,5			
Vm	935,47	935,47	935,47	935,47	935,47			
γT (g/cm ³)	2,10	2,17	2,22	2,18	2,12			
γd (g/cm ³)	1,94	1,97	1,98	1,91	1,83			

Recipiente	P11	CP	W	g	11
Wr (g)	47,79	43,57	48,71	39,89	45,54
Wr+mh (g)	163,6	200,13	226,64	200,16	281,64
Wr+ms (g)	155,03	187,13	208,74	181,77	250,62
Wagua (g)	8,57	13,00	17,9	18,39	31,02
Wsuelo (g)	107,24	143,56	160,03	141,88	205,08
W%	7,99	9,06	11,19	12,96	15,13



16.6. Anexo 6 (Probetas con Cal Muestra 1, 2 y 3)

DETERMINACIÓN DEL AUMENTO DE LA RESISTENCIA EN PROBETAS CILÍNDRICAS CON DIFERENTES PORCENTAJES DE CAL

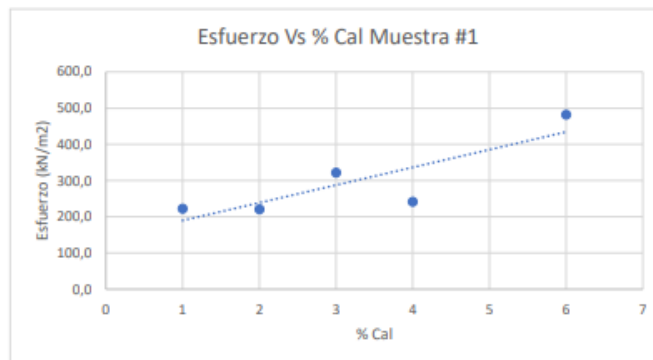
Material 1

Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamaños

Procedencia: Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Calle 92 entre carreras 11 y 15 -
Localidad de Chapinero en Bogotá D.C.

Cal (%)	6	4	3	2	1	Molde	Y	X
Ws (g)	2000	2000	2000	2000	2000	ø (cm)	10,12	10,14
Wcal (g)	120	80	60	40	20	h (cm)	11,63	11,8
Woptima-Cal (%)	12	12	12	12	12	W (g)	1778,5	1782,5
Ww (g)	240	240	240	240	240			
Molde	Y	Y	X	Y	X			
Vol (cm ³)	935,5	935,5	952,9	935,5	952,9			
Wm (g)	1778,5	1778,5	1782,5	1778,5	1782,5			
W Probeta	2065	2035	2035	2045	2050			

Carga máxima (N)	3903,8	1955,6	2608,7	1785,8	1800,6
Esfuerzo (kN/m ²)	481,5	241,2	321,8	220,3	222,1
Esfuerzo (MPa)	0,482	0,241	0,322	0,220	0,222

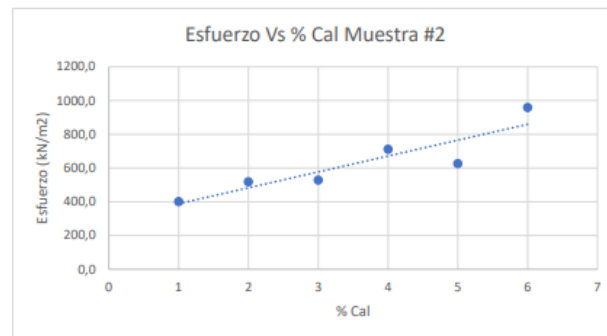


DETERMINACIÓN DEL AUMENTO DE LA RESISTENCIA EN PROBETAS CILINDRICAS CON DIFERENTES PORCENTAJES DE CAL

Material 2Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamañosProcedencia: Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Carrera 95 G 86A-17 - Localidad de Engativa en Bogotá D.C.

Cal (%)	6	5	4	3	2	1	Molde	Y	X
Ws (g)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	ø (cm)	10,12	10,14
Wcal (g)	120	100	80	60	40	20	h (cm)	11,63	11,8
Woptima-Cal (%)	12	12	12	12	12	12	W (g)	1778,5	1782,5
Ww (g)	240	240	240	240	240	240			
Molde	y	x	y	x	y	x			
Vol (cm ³)	935,5	952,9	935,5	952,9	935,5	952,9			
Wm (g)	1778,5	1782,5	1778,5	1782,5	1778,5	1782,5			
W m + molde	3800	3815	3835	3825	3810	3825			
W probeta	2021,5	2032,5	2056,5	2042,5	2031,5	2042,5			

Carga Maxima (N)	7770,6	5080,8	5767,1	4291,2	4202,6	3250,7
Esfuerzo (kN/m ²)	958,5	626,7	711,3	529,3	518,4	401,0
Esfuerzo (MPa)	0,958	0,627	0,711	0,529	0,518	0,401



DETERMINACIÓN DEL AUMENTO DE LA RESISTENCIA EN PROBETAS CILINDRICAS CON DIFERENTES PORCENTAJES DE CAL

Material 2Descripción: Recebo arenoso amarillo oscuro con gravas y sobretamañosProcedencia: Rehabilitación de alcantarillado - Pavimento Carrera 95 G 86A-17 -
Localidad de Engativa en Bogotá D.C.

Cal (%)	6	5	4	3	2	1	Molde	Y	X
Ws (g)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	ø (cm)	10,12	10,14
Wcal (g)	120	100	80	60	40	20	h (cm)	11,63	11,8
Woptima-Cal (%)	12	12	12	12	12	12	W (g)	1778,5	1782,5
Ww (g)	240	240	240	240	240	240			
Molde	y	x	y	x	y	x			
Vol (cm3)	935,5	952,9	935,5	952,9	935,5	952,9			
Wm (g)	1778,5	1782,5	1778,5	1782,5	1778,5	1782,5			
W m + molde	3845	3865	3860	3855	3760	3860			
W probeta	2066,5	2082,5	2081,5	2072,5	1981,5	2077,5			

Carga (N)	4095,6	3855,8	3940,7	3106,8	1036,8	2483,2
Esfuerzo (kN/m2)	505,2	475,6	486,1	383,2	127,9	306,3
Esfuerzo (MPa)	0,505	0,476	0,486	0,383	0,128	0,306

