

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN LAS ARCILLAS TÍPICAS DE
BOGOTÁ ESTABILIZADAS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y
DEMOLICIÓN (RCD).

PEDRO GABRIEL BECERRA CELY.
LUIS FERNANDO GÓMEZ MÉNDEZ.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
BOGOTÁ D. C. COLOMBIA
2019

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN LAS ARCILLAS TÍPICAS DE
BOGOTÁ ESTABILIZADAS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y
DEMOLICIÓN (RCD).

Este trabajo de grado es presentado como requisito para optar el título de
especialista en ingeniería de pavimentos

Director Temático
M.Sc. PhD. Juan Carlos Ruge Cárdenas

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
BOGOTÁ D. C. COLOMBIA
2019



La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

TABLA DE CONTENIDOS

<i>RESUMEN</i>	VI
<i>ABSTRACT</i>	VII
<i>INTRODUCCIÓN</i>	VIII
1. <i>PROBLEMA</i>	9
1.1 Título.....	9
1.2 Planteamiento del problema.....	9
1.2.1 Causas inadecuadas del uso de lo RCD.	10
1.2.2 Efectos inadecuados del uso de lo RCD.	10
1.3 Justificación	13
1.4 Palabras clave.....	14
2. <i>OBJETIVOS</i>	15
2.1 Objetivo General.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. <i>MARCO REFERENCIAL</i>	16
3.1 Marco Histórico	16
3.1.1 Antecedentes Del Reciclaje	16
3.1.2 Mecánica de suelos en residuos de construcción y demolición (RCD), alrededor del mundo.....	17
3.2 Marco Teórico.....	20
3.2.1 Residuos de Construcción Provenientes de la Demolición (RCD).....	20
3.2.2 Estabilización de Suelos.....	23
3.2.3 Subrasante	24
3.2.4 Propiedades de los suelos arcillosos	25
3.2.4.1 Límites de atterberg:	25
3.2.5 Normatividad	25
4. <i>FUENTES PARA OBTENER LOS MATERIALES A USAR EN ESTA INVESTIGACIÓN.</i>	27
4.1 Residuos de construcción y demolición (RCD).....	27
4.2 Arcilla	30
5. <i>METODOLOGÍA</i>	31

Especialización Ingeniería de Pavimentos

5.1	Etapas del Proceso Constructivo.....	31
5.1.1	Etapa uno de Diseño de investigación.	31
5.1.2	Etapa dos Adquisición de Material.	32
5.1.3	Etapa Tres Experimental.	34
5.1.4	Etapa Cuatro Análisis de resultados.....	36
6.	ENSAYOS REALIZADOS	37
6.1	Granulometría del material (RCD)	37
6.2	Gravedad Específica de la Arcilla.....	40
6.3	Límites de Atterberg para la arcilla.	40
6.4	Proctor Modificado.	41
6.5	CBR de Suelos Compactados en el Laboratorio (I.N.V. E – 148 – 13).....	43
7.	CONCLUSIONES	46
8.	RECOMENDACIONES.....	47
9.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1 Historia de Antecedentes Encontrados.	19
Tabla 3-2 Clasificación de RCD	22
Tabla 3-3 Marco normativo del proyecto.	26
Tabla 4-1 Propuesta económica de materiales RCD.	29
Tabla 5-1 Variables y Convenciones.	32
Tabla 6-1 Coeficientes granulométricos del material escogido	38
Tabla 6-2 Límites de Atterberg para la arcilla	41
Tabla 6-3 Resultados CBR	43
Tabla 6-4 Normas INVE 125: 2013 e INV E 126: 2013	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Ramificación del Problema	12
Figura 3-1 Causantes de los RCD en Bogotá	16
Figura 3-2 Esquema de Una Planta de Tratamiento RCD	17
Figura 3-3 subrasante / Estructura	24
Figura 4-1 Composición de los residuos de construcción (RCD).	28
Figura 5-1 Proceso metodológico.	35
Figura 5-2 Plan de ensayos	36
Figura 6-1 Curva granulométrica	38

LISTA DE FOTOS

Foto 4-1 Material Reciclado	29
Foto 4-2 Subrasante Material Arcilloso	30
Foto 5-1 Fisuras en bloque y Hundimientos evidentes.	33
Foto 5-2 Perdida de Agregados y Piel de Cocodrilo	34
Foto 6-1 Granulometría del material (RCD)	39
Foto 6-2 Gravedad Específica de la Arcilla	40
Foto 6-3 Limites de consistencia: Limite liquido y Limite Plastico.	41
Foto 6-4 Proctor Modificado.	42
Foto 6-5 CBR de Suelos Compactados	45

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 Granulometría del material (RCD)	51
ANEXO 2 Gravedad Específica	54
ANEXO 3 Límites de Atterberg	56
ANEXO 4 Proctor Modificado	58
ANEXO 5 CBR	60

RESUMEN

Los inconvenientes que muestra el suelo en cuanto a la estructura vial en la ciudad de Bogotá dejan en evidencia las propiedades de resistencia y durabilidad. En el presente desarrollo esta investigación se orienta a la de algún tipo de alternativas para una buena estabilización de Subrasante. Por tal motivo se plantea posibles soluciones de tipo ingenieril que ayuden a mitigar, mejorando las diferentes propiedades de los suelos arcillosos, mediante ensayos de laboratorio, aportando de esta manera a la implementación de productos innovadores como la estabilización de subrasantes, optimizando así las propiedades físico mecánicas de estas arcillas; por tal razón se estaría aportando una solución a los problemas generados en las vías con este tipo de materiales.

Esta investigación se enfoca en buscar un modo experimental para mejorar las características y propiedades físico-mecánicas de las arcillas encontradas para mejorar las diferentes estructuras halladas en la ciudad de Bogotá; Todo lo anterior relacionado con la resistencia y capacidad de soporte, el material de subrasante seleccionado se estabilizara en las mismas condiciones como fue encontrada; el propósito de este documento se enfoca en mejorar las propiedades físico-mecánicas del material una vez estabilizado con residuos de construcción y demolición (RCD); estableciendo un análisis comparativo, al momento de adicionar un 5%, 10% y 20% del material anterior mente mencionado, determinando el comportamiento de esta sub rasante mediante un ensayo de (CBR).

ABSTRACT

The inconveniences that the soil shows in terms of the road structure in the city of Bogotá show the resistance and durability properties. In the present development, this research is oriented to that of some kind of alternatives for a good Subgrade stabilization. For this reason, possible engineering solutions are proposed to help mitigate, improving the different properties of clay soils, through laboratory tests, thus contributing to the implementation of innovative products such as stabilization of subgrade, thus optimizing physical properties. Mechanics of these clays; for this reason, a solution would be provided to the problems generated in the roads with this type of materials.

This research focuses on finding an experimental way to improve the characteristics and physical-mechanical properties of the clays found to improve the different structures found in the city of Bogotá; All of the above related to strength and bearing capacity, the selected subgrade material will stabilize under the same conditions as it was found; The purpose of this document is to improve the physical-mechanical properties of the material once stabilized with construction and demolition waste (RCD); establishing a comparative analysis, at the time of adding 5%, 10% and 20% of the aforementioned material, determining the behavior of this subgrade by means of a (CBR) test.

INTRODUCCIÓN

Debido a las condiciones tan deficientes en las que se encuentran las carpetas asfálticas existentes de suba en Bogotá donde muestran complicaciones de poca estabilidad ya que estas vías se encuentran sometidas a una cantidad importante de cargas repetitivas debido a la alta demanda que posee el flujo vehicular en los diferentes segmentos observados, aumentando así inconvenientes en la subrasante por tratarse de arcillas altamente expansivas encontradas en la zona antes mencionada, además de un nivel freático variable debido a la fuerte vegetación encontrada en el sector.

Una vez observada la problemática, se busca un método experimental para llegar a mejorar las características y propiedades físico-mecánicas de una subrasante arcillosa adicionando residuos de construcción y demolición (RCD) provenientes de demolición y excavación en la ciudad de Bogotá a nivel vial y estructural, pretendiendo crear una subrasante buena para poder conformar una estructura de pavimento firme ya sea flexible o rígido, valorando el comportamiento mediante pruebas de resistencia, esta decisión se toma por la evidente falencias en la reutilización de este tipo de materiales, generando así diferentes investigaciones de tipo ingenieril, una vez realizada la inclusión del material propuesto las estructuras de pavimento reducirán considerablemente los espesores requeridos desde el punto de vista de diseño. Por otra parte los materiales arcillosos se diferencian por las excesivas deformaciones y cambios volumétricos los cuales se traducen a lo largo del tiempo en daños estructurales evidenciados en la capa superficial del pavimento.

Cuando se estudia este tipo de suelo, generalmente se aprueba un tipo de mejoramiento para su correcta funcionalidad, por tal razón se propone en este caso en particular la adición proporcionada de un 5%, 10% y 20% del material proveniente de la excavación y demolición (RCD), para luego analizar el comportamiento de esta subrasante, determinando la resistencia al esfuerzo mediante un ensayo de (CBR).

1. PROBLEMA

1.1 Título

Estudio del comportamiento de las arcillas altamente permeables estabilizadas con residuos de construcción y demolición (RCD).

1.2 Planteamiento del problema

Buscando mejorar el desempeño de las diferentes vías que contienen arcillas altamente permeables con base en la inclusión de residuos de construcción provenientes de la demolición (RCD), se pretende mejorar la capacidad portante de la subrasante optimizando de esta manera las propiedades físico-mecánicas.

De acuerdo a lo anterior, surgen las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Qué porcentaje de (RCD) puede llevar la sub rasante?
- ¿Qué ocurre con las propiedades de la sub rasante, con la adición de (RCD)?
- ¿Cuál es la factibilidad técnica y económica del producto final?

Especialización Ingeniería de Pavimentos

1.2.1 Causas inadecuadas del uso de lo RCD.

- Una de estas causas es la escasa información referente a los lineamientos, además de la redirección de los RCD desde el momento en que sale proyectos hasta la disposición final, según indique la normatividad referente.
- Ausencia de la normatividad técnica dirigida exclusivamente a los materiales de RCD, ya que en la actualidad el IDU a nivel Distrital, se basa exclusivamente en las especificaciones técnicas para materiales granulares convencionales.
- Manejo deficiente para el uso de los muchos RCDs obtenidos en los diferentes puestos de trabajo, se debería dictar capacitaciones para todo el personal incluyendo personal no calificado, interventoría, contratista e incluso el consultor.
- El marco legal que define la utilización de los RCD, se encuentra muy reciente en nuestro país el cual exige a las entidades públicas y constructoras a reutilizar un porcentaje de material proveniente de las obras correspondiente al 25%, este porcentaje debe coparse en material granular a utilizar en las diferentes estructuras a instalar.

1.2.2 Efectos inadecuados del uso de lo RCD.

- Sobrantes de la diferente materia prima la cual puede ser reutilizada: en nuestro medio este tipo de material se encuentra compuesto con demolición de concreto hidráulico, bases y sub bases granulares recuperadas, carpetas asfálticas y ciertas cantidades de material provenientes de la excavación, toda vez que este se encuentre en condiciones óptimas y no contenga material orgánico.
- Se puede incurrir en gastos mayores, en cuanto al uso estabilización bases y subbases en las diferentes obras viales, todo esto por falta de conocimiento referente a la reutilización de

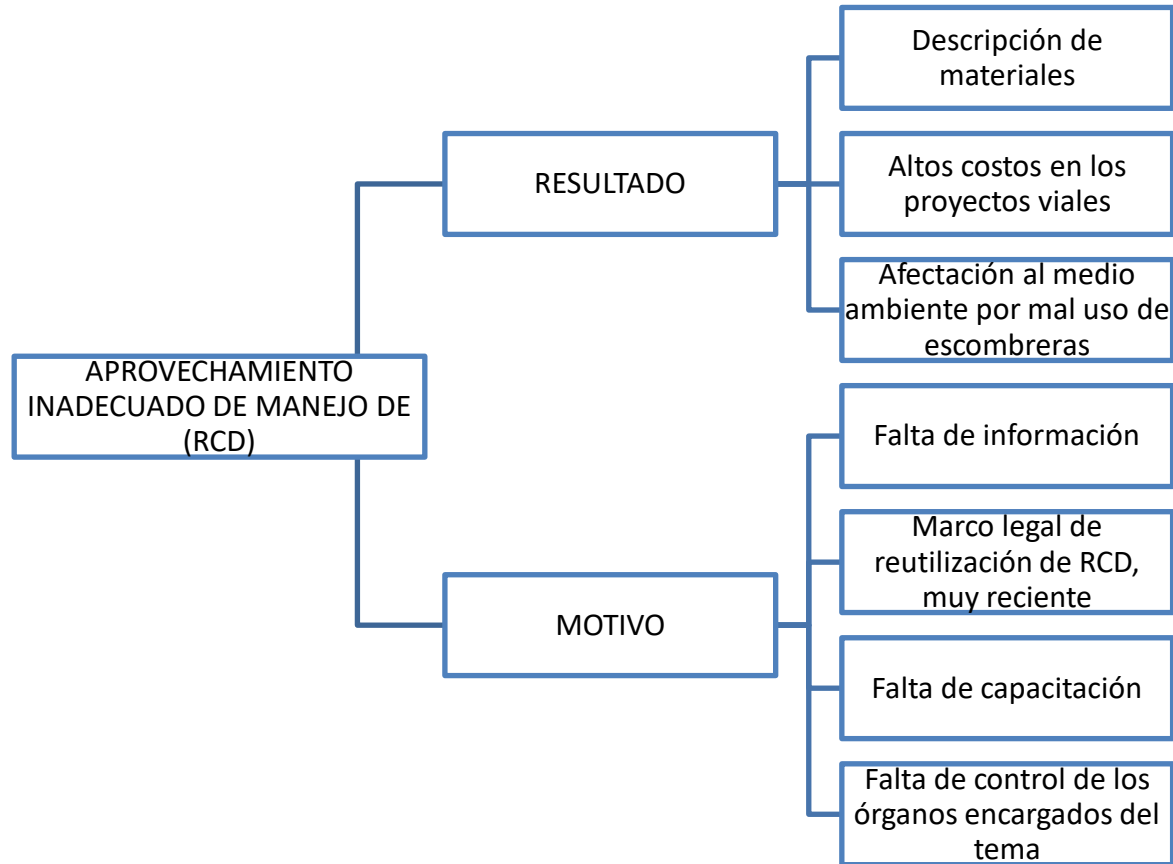
Especialización Ingeniería de Pavimentos

estos materiales, negándonos a convertir esta materia prima en un material potencial mente útil al momento de realizar infraestructura vial.

- Contaminación del medio ambiente, por el uso excesivo de materiales granulares provenientes de nuestro entorno natural, además de la cantidad de contaminación emitida al entorno, ya que estos materiales debe ser transportado al sitio de instalación por vehículos emisores de material particulado el cual termina contaminando el medio ambiente en gran manera, por otra parte se disminuirá la capacidad de acopio en los diferentes sitios de disposición de escombros ya el material será usado en el mismo sitio donde fue extraído, disminuyendo considerablemente el uso de escombreras.

Una vez dicho lo anterior nos permitimos hacer un resumen de aprovechamiento de manejo de (RCD) como se ve en la figura 1-2.

Figura 1-1 Ramificación del Problema



Fuente: Aprovechamiento de los RCD en proyectos de construcción y conservación de pavimentos urbanos, <https://repostery.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13905/4/Aprovechamiento%20de%20los%20RCD%20en%20proyectos%20de%20construcci%C3%B3n%20y%20conservaci%C3%B3n%20de%20pavimentos%20urbanos.pdf>

1.3 Justificación

Con base en algunos planteamientos teóricos de la estabilización de suelos se puede señalar según Loaiza que “la estabilización es un proceso mediante el cual se trata de modificar un suelo o un agregado procesado para hacerlo apto o mejorar su comportamiento como material constitutivo de un pavimento. El proceso busca, fundamentalmente, aumentar la capacidad portante del material y hacerlo menos sensible a la acción del agua. El objetivo es también que el material alcance alta rigidez y, en consecuencia, tenga capacidad para absorber tensiones de tracción.”¹

Cuando se estudia la estabilización en una subrasante, se desprenden ciertos problemas de resistencia y estabilidad, una vez sometemos con cargas la muestra, no solo resulta significativo estudiar las relaciones de esfuerzo deformación existentes, además del cambio de las caracterización físico-mecánica del suelo mediante la adición de residuos de construcción y demolición (RCD), con estas adiciones estamos buscando implementar un mejor comportamiento a las vías que poseen una subrasante arcillosa, ante las sollicitaciones requeridas a lo largo de las vías antes mencionadas.

La intención fundamental de este documento, es verificar las propiedades físico-mecánicas del sitio a trabajar, mediante los resultados emitidos por los ensayos de capacidad portante CBR en principio; el cual permite identificar las características de los especímenes tomados, logrando establecer una serie de cuadros comparativos para poder diferenciar cual puede llegar a ser la mejor mezcla propuesta.

Los ensayos propuestos se deben realizar según las especificaciones suministradas por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), o a las del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) ya que las dos se basan en justificaciones similares.

¹ FERNÁNDEZ LOAIZA, Carlos. Mejoramiento y Estabilización de suelos. Guanajuato: México: Limusa, 1993.p.34.

La presente investigación en principio tiene como propósito aportar principal mente un beneficio técnico, el cual se verá reflejado significativamente en un beneficio económico, reduciendo los procesos constructivos ya que este material se obtendrá del sitio obra, por otro lado se implementaran nuevas alternativas de mejoramiento en subresante, reflejados en el impacto ambiental ya que se dejara de usar las diferentes escombreras.

1.4 Palabras clave

Mejoramiento, residuos de construcción y demolición (RCD), Suelos Blandos y agregados reciclados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Determinar las propiedades físico-mecánicas de una Subrasante arcillosa mejorada con residuos de construcción y demolición (RCD), reflejado en el mejoramiento de su comportamiento mecánico.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la relación físico-mecánicas de los suelos arcillosos modificados con residuos de construcción y demolición (RCD), mediante las pruebas de laboratorio establecidas.
- Establecer la capacidad portante en las muestras adicionadas con residuos de construcción y demolición de acuerdo a los porcentajes determinados.
- Evaluar el posible efecto de los residuos de construcción y demolición (RCD), en suelos de Subrasante arcillosa.

3. MARCO REFERENCIAL

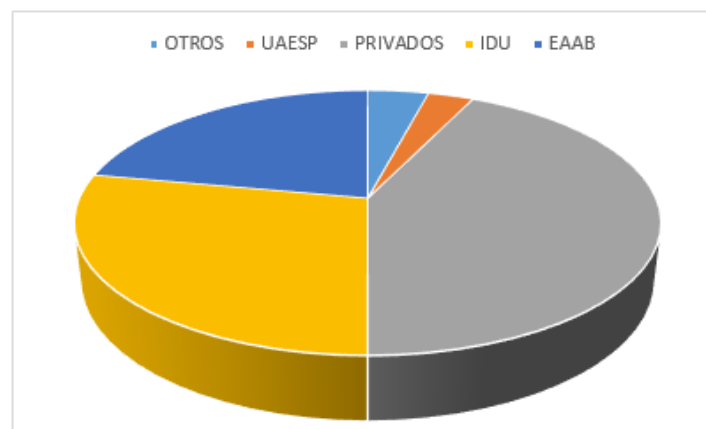
3.1 Marco Histórico

3.1.1 Antecedentes Del Reciclaje

En la gráfica 3-1 nos indica el crecimiento constante en el sector de la construcción a lo largo de la última década, con todo lo que implica el crecimiento de los residuos de demolición y construcción (RCD), dando a una idea a la importancia de la reproducción de este tipo de residuos el estimado de la Secretaria Distrital de Planeación y Medio Ambiente de Bogotá, es de dos toneladas literalmente, esta representa una magnitud de producción alarmante al momento de realizar una comparación con el promedio europeo antes de la crisis del 2010, solo países como Dinamarca, Finlandia, Alemania, Irlanda y Luxemburgo presentaron cantidades superiores a dos toneladas por año literalmente hablando.² Aun así más desalentador resulta el perspectiva si se examinan las cifras de reutilización de los países antes mencionados, por lo que superan 50%, de reutilización de materiales reciclados provenientes de demolición (RCD). [1]

Figura 3-1 Causantes de los RCD en Bogotá

OTROS	UAESP	PRIVADOS	IDU	EAAB
4%	3%	43%	28%	22%



Fuente: SDA-Resolución 2397, Secretaria Distrital del Medio Ambiente, Bogotá, 2011

² SDA-Resolución 2397, Secretaria Distrital del Medio Ambiente, Bogotá, 2011

3.1.2 Mecánica de suelos en residuos de construcción y demolición (RCD), alrededor del mundo.

La utilización y el reciclaje de los residuos de la construcción, a lo largo del tiempo, es una estrategia para llegar a alcanzar el desarrollo sostenible del sector vial, una vez dicho lo anterior esto nos da pie para unir intereses medioambientales y económicos para un mismo fin.

El reciclaje de los residuos de construcción y demolición se considera como la tecnología constructiva más limpia y amiga de los recursos naturales, ya que se busca sustentar la utilización de los materiales recuperados como fuente de energía o materias primas, en la figura 3-2, podemos ver el esquema de una Planta de Tratamiento (RCD).

Figura 3-2 Esquema de Una Planta de Tratamiento RCD



Fuente: UASPE, Informe Censo de Molineros, Bogotá, 2010.

Especialización Ingeniería de Pavimentos

La instalación de residuos de la construcción en carreteras de España es muy alta, según el escrito donde se relaciona la Villa Olímpica de Barcelona en 1992, para el cual fueron usados materiales sacados de la demolición de estructuras, de muros perimetrales y de cimentaciones de los diferentes Barrios situados a lo largo de esa zona, estos materiales fueron usados como Sub Base y Base de la red vial de la Villa Olímpica de Barcelona como ya se había mencionado.³

De acuerdo a los antecedentes obtenidos de la instalación de residuos de construcción tal como sustituto de material natural de rodadura, en mezclas de suelo cemento, es el expuesto en VIII Congreso Nacional de FIRMES, España 2008, donde fue expuesto la ejecución de una capa de base mejorada con suelo cemento en una autopista de Cataluña en la que se ha venido empleando material de residuos de construcción y demolición mostrando un excelente comportamiento.

Otro claro ejemplo de estas aplicaciones también mencionadas en el congreso referenciado fue la construcción de instalaciones deportivas en ciempozuelos (Madrid), cimentadas sobre rellenos antiguos de sumideros, todo esto gracias a la estabilización con suelo cemento del ultimo metro sobre el que se han apoyado, directamente, este tipo de infraestructuras.

En la actualidad en España se encuentran en camino toda una serie de investigaciones sobre los temas acá mencionados los cuales incurrirán en un impulso en cuanto a la instalación de este material a lo largo de los próximos años.

No fue hasta finales de los años 70 del siglo XX que se comenzó a hablar de un tratamiento seguro y eficiente de los residuos de la construcción, proponiéndose en 1977, en Japón, la primera norma para la utilización de agregados reciclados de hormigón.⁴

³ C. M. B. Montoya, «El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles,» Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Medellín, Medellín 2003.

⁴ Ing. Eulalio A. Toscano Machado. Maestría de Gerencia de la Ciencia y la Innovación Tecnológica. Gestión de la Ciencia y Tecnología para el Reciclado de los Desechos Sólidos en la Construcción. 2008. Villa Clara. La República de Cuba.

Especialización Ingeniería de Pavimentos

Estados Unidos, Dinamarca, Holanda, Gran Bretaña, Alemania y Japón poseen programas para reciclar materiales de construcción con la creación de plantas de tratamiento. Dinamarca ha impuesto una tasa a partir del 1° de enero de 1990 por tonelada de residuos que no se recicle. Japón prevé reciclar de 10 a 12 millones de toneladas de hormigón por año. En los países anteriormente mencionados existe una legislación específica que regula y grava el vertido de los residuos de construcción.⁵ En la tabla 3-1, se ilustra un resumen aquí mencionado.

Tabla 3-1 Historia de Antecedentes Encontrados.

Historia de Antecedentes Encontrados

Londres, Berlín y Varsovia, son ejemplos de ciudades reconstruidas con los escombros de la Segunda Guerra Mundial.

Se propuso en 1977, en Japón, la primera norma para la utilización de agregados reciclados de hormigón.

En la década de los 80 entraron en vigor normas y recomendaciones en el tratamiento de los residuos de la construcción en países como Dinamarca, Rusia y Alemania, y posteriormente en Francia, España, Bélgica, Noruega y China.

En Estados Unidos la Asociación Federal de Carreteras, recicla los pavimentos de hormigón. En 1985.

En Kuwait sobre todo a partir de la ocupación de 1990 al 1991 se da una especial demanda al tratamiento y reciclaje de grandes cantidades de residuos de la construcción.

Brasil es el primer país en América Latina en donde fue instalada una planta de reciclaje de residuos de la construcción, a partir de la resolución emitida por el CONAMA 2002.

La empresa pionera en México es Concretos Reciclados S.A. de C.V., inició sus actividades en 2004, en el reciclaje de los residuos de la construcción. Nace a partir de la actividad de minas, dedicada a la explotación, trituración y clasificación de agregados pétreos para la construcción.

Fuente: Tabla Elaboración Propia; Información tomada de <https://www.aecarretera.com/congresos/congresos-y-jornadas/congresos-celebrados/315-viii-congreso-nacional-de-firmes> - 18/02/2019.

⁵ Natalini, Mario. Klees, Delia. Tirner, Jirina - "Reciclaje y reutilización de materiales residuales de construcción y demolición". Universidad Nacional del Nordeste (Argentina). Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2000.

3.2 Marco Teórico

3.2.1 Residuos de Construcción Provenientes de la Demolición (RCD).

El uso de los residuos provenientes de la construcción y demolición, con el paso del tiempo en las vías, es una de las estrategias para alcanzar el desarrollo económico y medioambiental del sector.

El reciclaje provenientes de la construcción y demolición está calificado como el método beneficioso más limpia y amigable haciendo referencia a los recursos naturales, todo esto buscando sostener la reutilización de los materiales recuperados, para ser instalados como reemplazo de bases y sub bases según sea necesario, con el fin de preservar un uso sensato de los recursos a usar en nuevos proyectos. Este sistema a pesar de los procesos de clasificación, ha resultado especialmente favorable para el bolsillo de los empresarios de la construcción, en países donde los materiales utilizados en las estructuras viales son muy escasos además de los altos costos de disposición de escombros. Por tal razón, los RCD en la actualidad sería la única técnica conocida idónea para lograr minimizar la gran afectación realizada al medio ambiente por la explotación de materiales granulares para la conformación de estructuras viales.⁶

Con el paso del tiempo, han surgido diferentes investigaciones, por el rededor del mundo relacionado con la estabilización de subrasante, usando materiales alternativos los cuales puedan realizar un aporte físico-mecánico al suelo tratado. Una de las opciones para mejorar suelos con arcilla seria los RCD en sus de acuerdo a sus clasificaciones.

⁶ I. E. A. T. Machado, «Ing. Eulalio A. Toscano Machado. Maestría de Gerencia de la Ciencia Gestión de la Ciencia y Tecnología para el Reciclado de los Desechos Sólidos en la Construcción,» Gestión de la Ciencia y la innovación Tecnológica, Villa Claro, Republica de Cuba, 2008.

Especialización Ingeniería de Pavimentos

Los Residuos de construcción y demolición, son aquellos provenientes de las diferentes obras, donde se realice rehabilitación o demolición de cualquier tipo, ya sea de obras viales o de construcción vertical.⁷

Una manera de clasificar los diferentes residuos provenientes de excavación y demolición (RCD), puede ser de acuerdo a su origen:⁸

- ✓ Materiales provenientes de la excavación, los cuáles corresponden a tierra, arena, grava, roca y similares.
- ✓ Construcción y mantenimiento de obras viales tales como asfalto, bases y sub bases.
- ✓ Demoliciones dentro de estas se encuentran bloques de concreto, ladrillo porcelana y similares.

En la clasificación de los materiales provenientes de la excavación y demolición (RCD), básicamente los materiales que se tienen en cuenta son los materiales que se consideran limpios, más sin embargo, el plan de residuos de construcción y demolición 2001-2006 de España este menciona que las excavaciones las excluyen por no considerarse residuos.⁹ De acuerdo con lo dicho anteriormente y con relación a la guía para la elaboración del plan de residuos para la construcción de la secretaria del medio ambiente se tomó la tabla 3-2, como guía y para darnos una idea de cómo y cuál de estos materiales podemos usar como adición a nuestra subrasante.

En la tabla 3-2, se muestra la clasificación de RCD, tomada de la Guía para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición RCD en obra, Secretaría Distrital de Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá D. C.

⁷ J. M. G.-S. J. A. S. A. M. C. G. J. M. F. Cabrera, «F. Cabrera, J. M. Gómez-Soberón, J. Almaral, S. Arredondo, M. C. Gómez, J. Mendivil, “Propiedades en estado fresco de morteros con árido reciclado de hormigón y efecto de la relación c/a”, Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, vol. 35, no. 1, 2017.,» Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, vol. vol. 35, n° no. 1, 2017.

⁸ A. P. E. A. E. S. K. M. F. K. A. M. M. L. D. Fatta, «D. Fatta, A. Papadopoulos, E. Avramikos, E. SgGeneration and management of construction and demolition waste in Greece-an existing challenge,» Resources, Conservation and Recycling, vol. vol. 40, n° N° 1, pp. 81-91, 2003.

⁹ M. d. M. A. Español, «BOE 166 Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001–2006,» de Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 2006

Especialización Ingeniería de Pavimentos

Tabla 3-2 Clasificación de RCD

Categoría	Grupo	Clase	Componentes
RCD aprovechables.	I. Residuos mezclados.	Residuos pétreos.	Concretos, cerámicos, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques o fragmentos de roca, baldosín, mortero y materiales no pasantes al tamiz # 200.
	II. Residuos de material fino.	Residuos finos no expansivos.	Arcilla, limos y residuos inertes que sobrepasen el tamiz # 200.
		Residuos finos expansivos.	Arcillas y lodos inertes con gran cantidad de finos altamente plásticos y expansivos que sobrepasen el tamiz # 200.
	III. Otros residuos.	Residuos no pétreos.	Plásticos, PVC, maderas, papel, siliconas, vidrios, cauchos.
Residuos de carácter metálico.		Acero, hierro, cobre, aluminio.	
Residuos orgánicos.		Residuos de tierra negra.	
Residuos orgánicos vegetales.		Residuos vegetales y otras especies bióticas.	
RCD No aprovechable.	IV. Residuos peligrosos.	Residuos corrosivos, reactivos, radioactivos, explosivos, tóxicos y patógenos.	Desechos de productos químicos, emulsiones, alquitrán, pinturas, disolventes orgánicos, aceites, resinas, plastificantes, tintas, betunes.
	V. Residuos especiales.	No definida.	Polietileno, icopor, cartón, yeso (drywall).
	VI. Residuos contaminados con otros residuos.	Residuos contaminados con residuos peligrosos.	Materiales pertenecientes a los grupos anteriores que se encuentren contaminados con residuos peligrosos.
No definida.		Residuos contaminados con otros residuos que hayan perdido las características propias de su aprovechamiento.	
Otros.	VII. Otros residuos.	No definida.	Residuos que por requisitos técnicos no es permitido su reuso en obras.

Fuente: Guía para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición RCD en obra, Secretaría Distrital de Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá D. C., 2015. [7]

3.2.2 Estabilización de Suelos

La respuesta estructural y la manera cómo se comporta el pavimento depende básicamente de la subrasante, esta se debe encontrar en estado natural o en su defecto con algún tipo de mejoramiento.

Lo dicho anterior mente tiene como objeto aumentar la funcionalidad de la superficie encontrada, así mismo la actividad usada para adecuar mejorando la capacidad de la estructura del pavimento.¹⁰

Según Sosa (2010), existen varios tipos de mejoramiento:

➤ Mejoramientos:

- Funcional: No está implícita la capacidad la capacidad estructural de la vía.
- Estructural: En este caso diferente a lo que es el funcional, este mejoramiento aporta al soporte de transito aumentando esta capacidad a nivel vial, por lo cual se clasifica en tres tipos de tecnología que son:
 - ✓ **Universal:** esta tecnología tiene que ver con los mejoramientos aprobados y normalizados a nivel internacional dentro de estos se encuentran: estabilizados con cal, cemento, emulsión asfáltica o bitumen, adición de capa estructural granular concretos adoquines entre otros.
 - ✓ **Experimental:** como su nombre lo indica es netamente experimental estas tecnologías no han sido aplicadas a nivel macro ya que en este momento se

¹⁰ A. J. W. F. F. & S. Sosa, «Sosa, A. J., Wulff, F., Fonseca, & Saavedra. (2010). Soluciones e innovaciones tecnológicas de mejoramiento de vías e bajo tránsito,» Bogotá (2010).

Especialización Ingeniería de Pavimentos

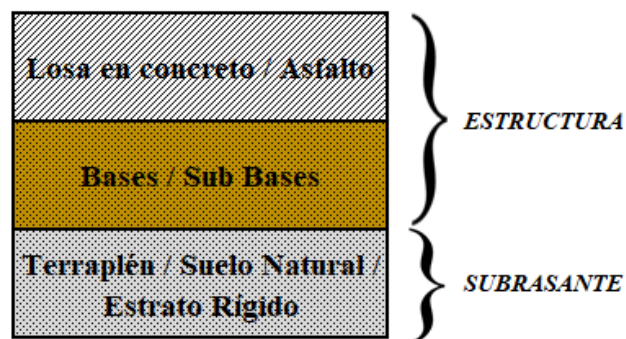
encuentran e prueba pendientes por ser aprobadas entre otras se encuentran las siguientes: estabilización química con aditivos, asfaltos naturales, empleo de demolición de concreto etc.

- ✓ **Innovadora:** está a diferencia de la mencionada anteriormente son tecnologías que pasaron por las experimentales pero en este caso ya se encuentran aprobadas y han presentado un buen aporte a la ingeniería a continuación se mencionan algunas de estas: asfalto espumado, con sales, cloruros, cenizas, escoria, material de reciclaje entre otras.

3.2.3 Subrasante

Es una parte fundamental del diseño ya que en este punto se soporta la estructura vial. Posee la peculiaridad de conceder la respuesta estructural además del comportamiento que tendrá la capa de pavimento no solo en construcción sino que también en la parte operacional la subrasante puede estar constituida por suelos en su estado natural o en su defecto con algún tipo de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, la estabilización físico-química con aditivos como el cemento Portland, la cal, el asfalto, entre otras, en este caso lo que se pretende es mejorarla con inclusión de materiales provenientes de RCD la cual estaría clasificada como una estabilización de tipo mecánico, en la figura 3-3 se ilustra cómo se estructura un pavimento ya sea flexible o rígido según corresponda.

Figura 3-3 subrasante / Estructura



Fuente: Elaboración Propia.

3.2.4 Propiedades de los suelos arcillosos

Existen ciertas propiedades de los materiales arcillosos dentro de estas se incluyen la plasticidad, encogimiento al exponerse a altas temperaturas, grano fino, secado al aire dureza y cohesión. Los suelos arcillosos pueden adsorber cationes y aniones y retenerlos alrededor del exterior de la unidad estructural en un estado intercambiable, generalmente sin afectar la estructura básica.

Cada vez que este tipo de arcillas presentan una característica plástica, es porque la capacidad de agua aumenta, una vez suceda esto el suelo se comporta como estuviera en estado líquido. El estado anteriormente mencionado lo definen los límites de atterberg.

3.2.4.1 Límites de atterberg:

- ✓ **Límite Líquido:** De acuerdo al instituto nacional de vías (INVIAS), I.N.V.E-125-13, se define en porcentaje el contenido de humedad.¹¹
- ✓ **Límite Plástico:** De acuerdo al instituto nacional de vías (INVIAS), I.N.V.E-126-13, se define como el contenido de agua más bajo.¹²
- ✓ **Índice de Plasticidad:** De acuerdo al instituto nacional de vías (INVIAS), I.N.V.E-126-13, se define como el estado del suelo mientras permanece en estado plástico y pasa a semisólido, obtenido así la diferencia entre límite líquido y límite plástico.¹³

3.2.5 Normatividad

¹¹ Norma INVIAS 125-13.

¹² Norma INVIAS 126-13.

¹³ Norma INVIAS 126-13.

Especialización Ingeniería de Pavimentos

Para realizar este estudio se tendrán en cuenta las siguientes normas del INVÍAS que se encarga de la regulación y supervisión de los contratos para la construcción de carreteras en Colombia.

Estas son mostradas a continuación en la Tabla (3-3):

Tabla 3-3 Marco normativo del proyecto.

NORMA	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
I.N.V.E – 103-13	Conservación y Transporte de Muestras.	Procedimiento para la preservación y conservación de muestras.
I.N.V.E – 123-13	Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.	Determina la distribución cuantitativa de los tamaños de partículas de suelo.
I.N.V.E – 125-13	Determinación del Limite Liquido de los Suelos.	Procedimiento para determinar los límites de Atterberg y obtener un índice del comportamiento del suelo para diferentes contenidos de agua. Permite clasificar el suelo a partir de la carta de clasificación de la AASHTO.
I.N.V.E – 126-13	Limite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos.	
I.N.V.E – 142-13	Proctor Modificado	Se emplean para determinar la relación entre la humedad y la masa unitaria de los suelos compactados
I.N.V.E – 148-13	CBR.	Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio)

Fuente: Elaboración Propia, “normas tomadas del INVÍAS”.

4. FUENTES PARA OBTENER LOS MATERIALES A USAR EN ESTA INVESTIGACIÓN.

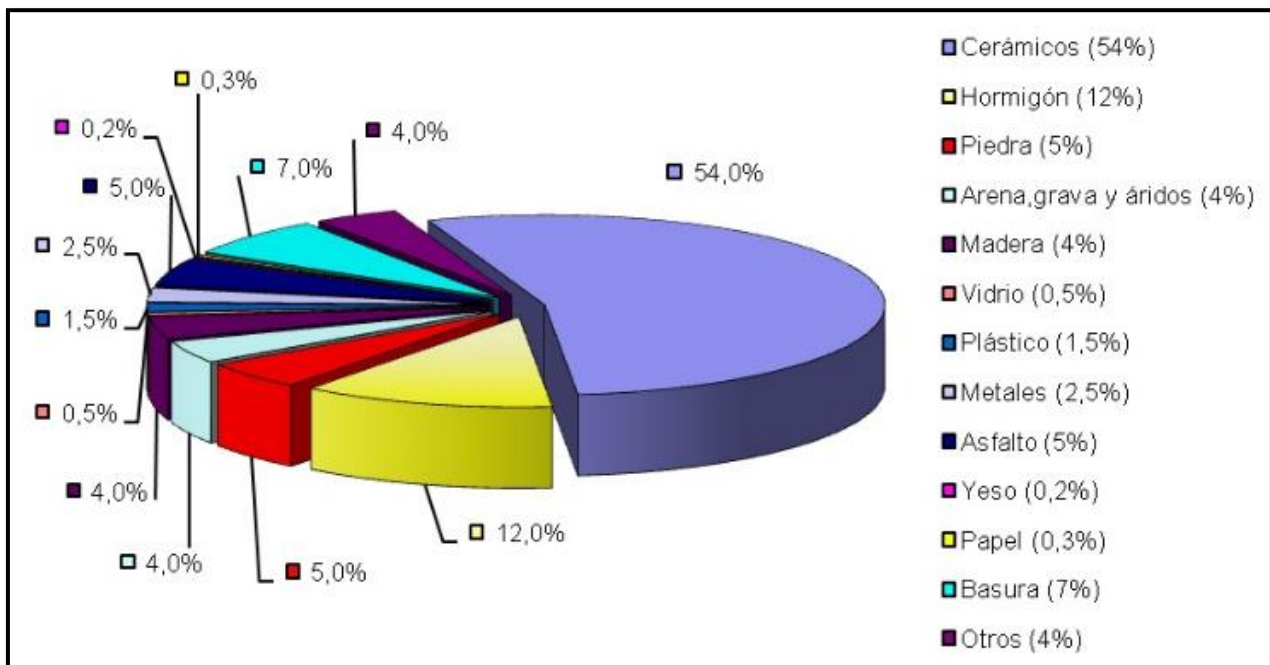
4.1 Residuos de construcción y demolición (RCD).

En Bogotá existen varias plantas donde se produce RCD, para el abastecimiento de las diferentes obras que vienen utilizando este tipo de material gracias a su buen desempeño presentado a lo largo del tiempo en que se ha venido utilizando.

La gran demanda y producción de este material, forja un aumento significativo en las diferentes obras donde es utilizado, según el Observatorio Ambiental de Bogotá, entre los meses de enero y mayo del año 2016 se controló la disposición adecuada de 2.950.876 Toneladas de RCD (Residuos de Construcción y Demolición) generados por obras mayores a 5.000 m² y mega obras urbanas que causan impactos ambientales en la ciudad, mediante el desarrollo de visitas técnicas por parte de profesionales adscritos a la SCASP. De igual forma durante los meses de febrero y marzo se avanzó en las fases de planeación y contratación de personal que realizarán ésta actividad. Considerando que la meta es creciente y que a diciembre la meta quedo con un total acumulado en el cuatreno del 90,98% de avance en la meta Plan de Desarrollo resultante de 29.113.532 de Toneladas de escombros en los sitios autorizados para disposición final de escombros sobre los 32.000.000 de toneladas establecidas. En ese sentido a mayo de 2016 se alcanzó un total acumulado del 100,20% equivalente a 32.064.408 Toneladas de RCD (Residuos de Construcción y Demolición) dispuestas en los sitios autorizados. En la figura 4-1 se muestra la composición de los residuos de construcción (RCD) en la ciudad de Bogotá.¹⁴

¹⁴ <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/-25/02/2019>

Figura 4-1 Composición de los residuos de construcción (RCD).



Fuente: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/-25/02/2019>

El material utilizado en este proyecto es un residuo proveniente de la conformación de bases y sub bases comercializadas en los diferentes centros de acopio, el cual es obtenido de Residuos de Construcción y Demolición, el material mencionado fue el escogido ya que de acuerdo a la clasificación en planta termina por convertirse en un residuo más, el cual será desechado, la idea con este material es darle un uso favorable tanto para el constructor como para el medio ambiente.

En la tabla 4-1, se relacionan los diferentes tipos de material comercializados por una de las empresas que distribuyen estos materiales los valores se mencionan para tener un precedente del costo de los materiales reciclados, así mismo se muestran dos fotos donde se evidencia la base y la sub base reciclada, lo anterior con el fin de hacer un referente de la variedad que existe en el mercado, además del costo de la materia prima allí mencionada. Cabe destacar que los materiales a utilizados en este documento, no tienen un valor comercial por tratarse de un residuo de los diferentes materiales comercializados por ellos.

Especialización Ingeniería de Pavimentos

Tabla 4-1 Propuesta económica de materiales RCD.

ITEM	MATERIAL GRANULAR TIPO NORMA IDU-2011 o INVIAS-2013	UNIDAD	VALOR ANTES DE IVA
1	BASE GRANULAR TIPO BG-A	m ³	\$59.000
2	BASE GRANULAR TIPO BG-B	m ³	\$59.000
3	BASE GRANULAR TIPO BG-C	m ³	\$57.000
4	SUB BASE GRANULAR TIPO SBG-A	m ³	\$56.000
5	SUB BASE GRANULAR TIPO SBG-B	m ³	\$56.000
6	SUB BASE GRANULAR TIPO SBG-C	m ³	\$54.000
7	SUB BASE GRANULAR ASFALTICA	m ³	\$45.700
8	SUB BASE GRANULAR TIPO PEA	m ³	\$33.250

ITEM	OTROS MATERIALES GRANULARES	UNIDAD	VALOR ANTES DE IVA
1	B-200	m ³	\$14.000
2	B-400	m ³	\$20.800
3	B-600	m ³	\$27.500
4	ARENA	m ³	\$60.000
5	GRAVA-GRAVILLA	m ³	\$60.000
6	ARENA ESCOMBRO	m ³	\$42.500
7	GRAVA ESCOMBRO	m ³	\$42.500
8	RAJON	m ³	\$29.900

Fuente: Reciclados Industriales de Colombia

Foto 4-1 Material Reciclado



Fuente: Reciclados Industriales de Colombia

4.2 Arcilla

Se optó por trabajar este material gracias a la excesiva aparición de este en la subrasante donde nos encontrábamos trabajando, al momento de empezar con la presente investigación, la subrasante encontrada en esta época se estabilizo con rajón natural proveniente de cantera, por tal razón surge la duda de un método donde pudiéramos hacer la inclusión de un material reciclado disminuyendo así los costos operacionales. En las fotos 4-2 se ilustra la subrasante donde se obtuvo el material base para el presente documento.

Foto 4-2 Subrasante Material Arcilloso



Fuente: Elaboración Propia.

5. METODOLOGÍA

5.1 Etapas del Proceso Constructivo.

5.1.1 Etapa uno de Diseño de investigación.

El método usado en el desarrollo de este proyecto hace referencia a un trabajo netamente experimental donde pretendíamos establecer una posible incidencia en los dos parámetros o materiales trabajados.

El espécimen determinado para el presente trabajo concierne a una subrasante arcillosa típica de Bogotá encontrada en un trabajo realizado en la localidad de Suba, la cual fue modificada con materiales provenientes de la excavación y demolición con unos porcentajes establecidos inicialmente, estos se escogieron ya que la estabilización propuesta trabajaría de forma mecánica.

Una vez analizados los ensayos de granulometría realizados al material de (RCD), se realiza un análisis el cual se relaciona en el anexo 1, por lo cual se decidió mantener los porcentajes propuestos inicialmente, gracias a la buena actuación del RCD comportándose como una subbase granular convencional bien gradada, los porcentajes establecidos son: 5%, 10% y 20%, todo lo anterior pretendiendo mejorar el comportamiento físico-mecánico de la subrasante.

A continuación se muestra la tabla 5-1 donde se indican las convenciones de las variables utilizadas.

Tabla 5-1 Variables y Convenciones.

VARIABLE	CONVENCIÓN
Residuos de Construcción y Demolición.	RCD
Subrasante blanda con 5% de Residuos de Construcción y Demolición.	Mu ₁
Subrasante blanda con 10% de Residuos de Construcción y Demolición.	Mu ₂
Subrasante blanda con 20% de Residuos de Construcción y Demolición.	Mu ₃
Límite Líquido	LL
Límite Plástico	LP
índice de plasticidad	IP
California Bearing Ratio	CBR Mu ₁
California Bearing Ratio	CBR Mu ₂
California Bearing Ratio	CBR Mu ₃

Fuente: Elaboración Propia.

5.1.2 Etapa dos Adquisición de Material.

El sector escogido para hacer el muestreo de subrasante arcillosa, se encuentra en el Barrio Suba de Bogotá D.C. como se indicó en el numeral 4.2.

El criterio inicial para realizar esta escogencia fue la efectiva presencia de material cohesivo mayor mente expansivo característico del sector, esta afirmación se hace ya que en años anteriores se han ejecutado este tipo de trabajos realizando a lo largo del sector.

Especialización Ingeniería de Pavimentos

Por esta zona, se evidencia gran variedad de problemas en las diferentes estructuras, de pavimento flexible tales como ahuellamiento, hundimientos evidentes, fisuras en bloque, piel de cocodrilo, abultamientos, desgaste superficial, perdida de agregados, descascaramiento, baches, entre otros. Todo esto gracias a la evidente presencia de subrasante arcillosa como se muestra en las fotos 5-1 y 5-2.

Foto 5-1 Fisuras en bloque y Hundimientos evidentes.



Fuente: Tomada en la Zona escogida

Foto 5-2 Perdida de Agregados y Piel de Cocodrilo

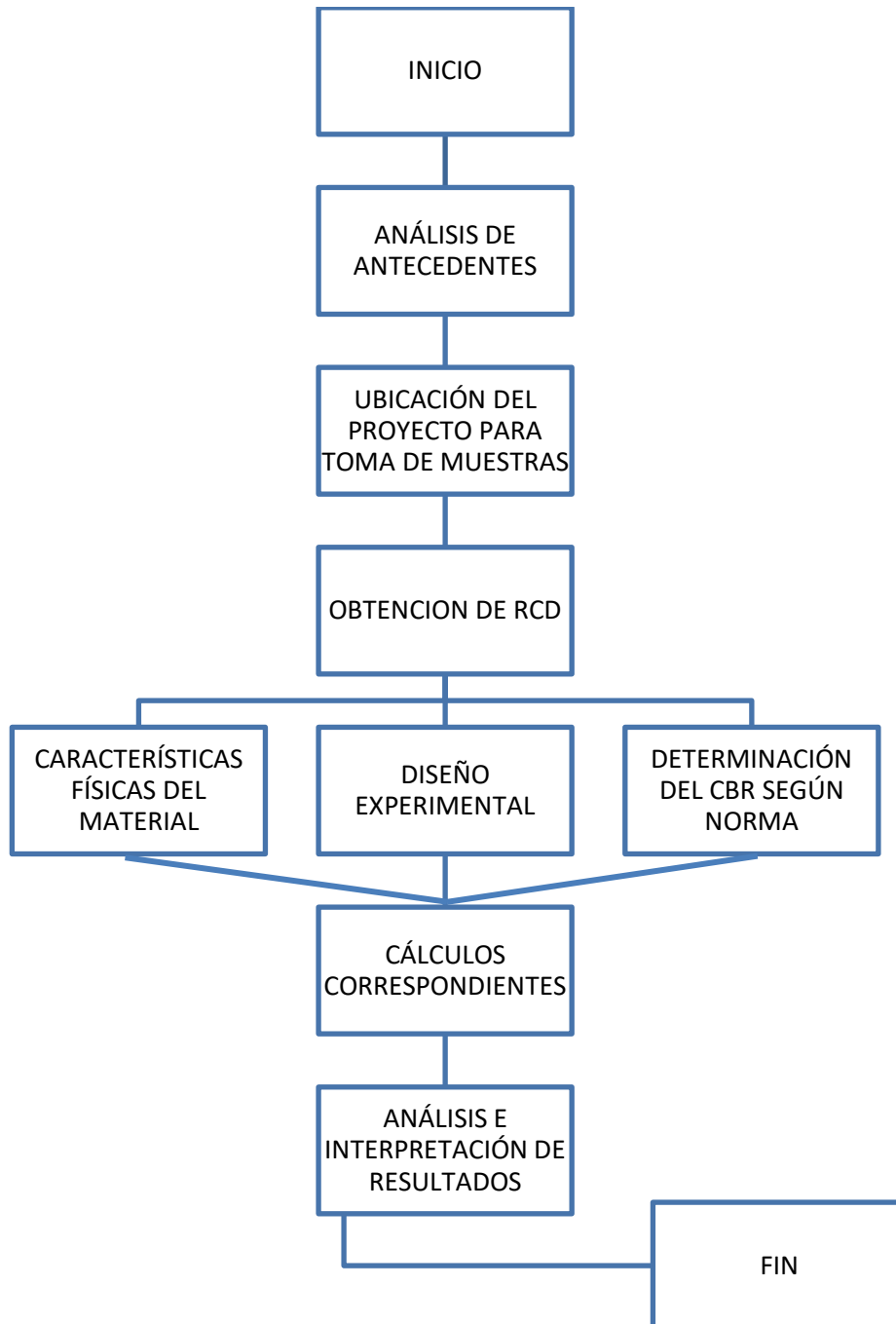


Fuente: Tomada en la Zona escogida.

5.1.3 Etapa Tres Experimental.

De acuerdo a la etapa dos planteada anteriormente se trazan los ensayos de laboratorio ilustrados en la figura 5-1.

Figura 5-1 Proceso metodológico.



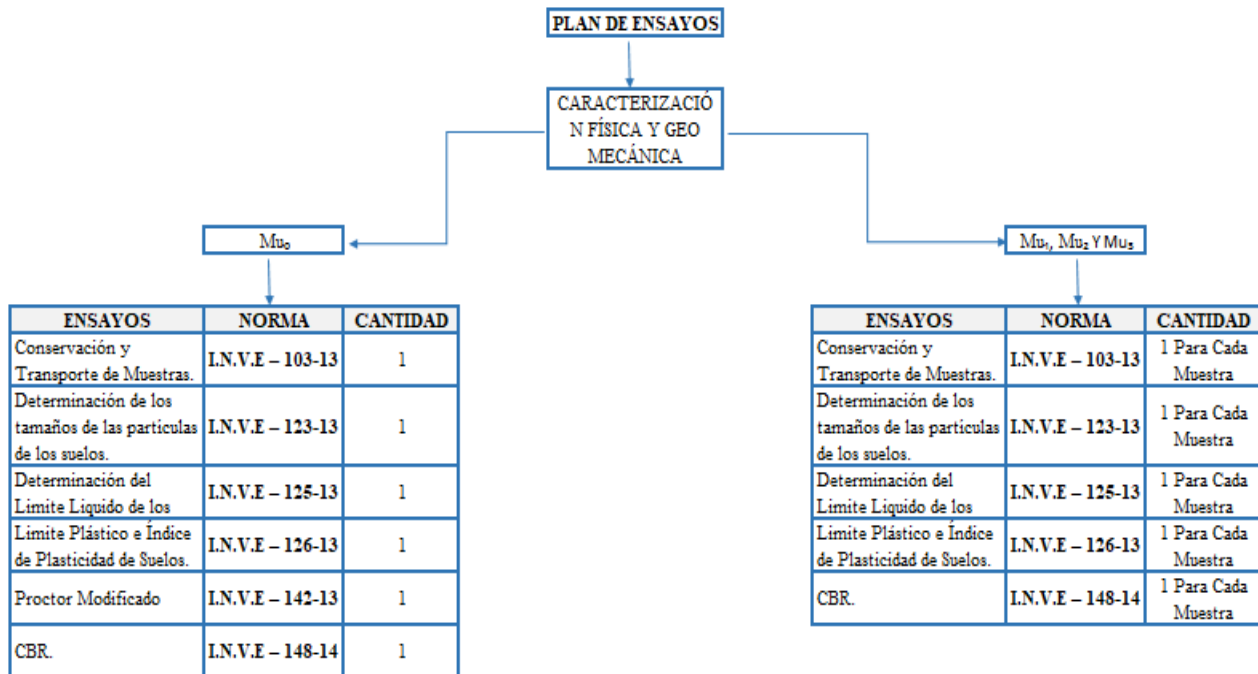
Fuente: Elaboración Propia

Especialización Ingeniería de Pavimentos

5.1.4 Etapa Cuatro Análisis de resultados

Una vez analizado y determinado el material que vamos a estabilizar además de los porcentajes que se van a adicionar respectivamente, se genera un plan de ensayos el cual está plasmado en la figura 5-2.

Figura 5-2 Plan de ensayos



Fuente: Elaboración Propia

6. ENSAYOS REALIZADOS

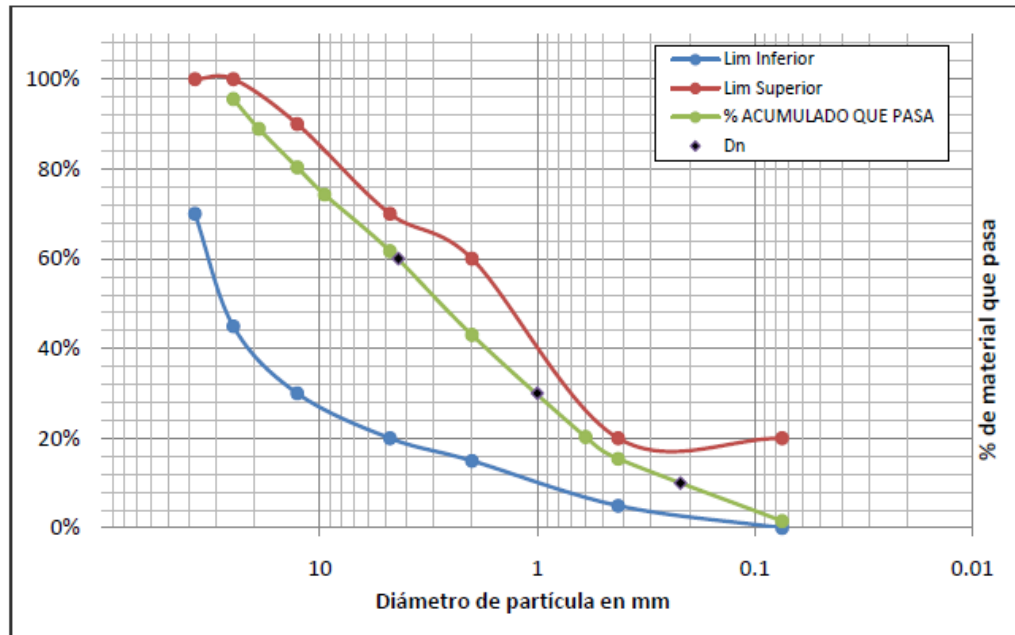
Luego de realizar en su totalidad el plan de ensayos propuesto en la figura 5-2 para la ejecución del presente trabajo, procedemos a realizar el análisis correspondiente para cada uno de los porcentajes propuestos con la adición de material reciclado de demolición (RCD).

Para iniciar, se realizan los ensayos de caracterización a la muestra inicial (M_0), con el fin de identificar las propiedades, los ensayos corresponden a granulometría para el RCD con el cual se hará la inclusión al suelo blando se tuvo como referencia INVE 123: 2013 (por tamizado e hidrometría), límites de Atterberg como referencia INVE 125: 2013 e INVE 126: 2013 gravedad específica de los suelos como referencia INVE 128: 2013 y finalmente el ensayo de compactación Postor Modificado como referencia INVE 141: 2013, todo esto para identificar la densidad máxima seca y el contenido de humedad optimo, datos indispensables para la compactación de las diferentes probetas para los ensayos de resistencia.

6.1 Granulometría del material (RCD)

Una vez realizado el análisis que corresponde, el ensayo nos indica que es un material bien gradado el cual puede ser utilizado perfectamente como una subbase granular luego de eliminarle las partículas orgánicas que contiene, en la gráfica 6-1 se muestra los resultados obtenidos del material RCD, así mismo en la tabla 6-1 se evidencia el coeficientes granulométricos del material escogido. El resultado completo se encuentra en el anexo 1.

Figura 6-1 Curva granulométrica



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6-1 Coeficientes granulométricos del material escogido

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD	$C_u = D_{60}/D_{10}$		mm	%
		$D_{60} =$	4.35	60.00
COEFICIENTE DE COMPACIDAD	$C_c = D_{30}^2 / (D_{10} \times D_{60})$	$D_{10} =$	0.22	10.00
		$D_{30} =$	1.00	30.00
$C_u = 19.77$		$C_c = 1.04$		

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo al resultado logrado en este ensayo, los materiales de la presente exploración se compararon con los parámetros establecidos por el INVIAS, a simple vista los resultados nos muestran una granulometría semejante a la de una subbase granular, no obstante sabiendo que esta muestra contiene materiales de tipo orgánico los cuales la hacen ver como un material contaminado.

Especialización Ingeniería de Pavimentos

Una vez tenemos los datos arriba mencionados, esta muestra nos deja ver un exceso de partículas que pasa por la malla $\frac{3}{4}$ " y de $\frac{1}{2}$ ", por tal razón se evidencia una falta de material mayor a los porcentajes antes mencionados, además de la poca presencia de finos pasante de malla N° 200; el coeficiente de uniformidad (Cu) es mayor a 3, lo que nos muestra que los diámetros D_{60} y D_{10} difieren en tamaño, por tal razón la granulometría se encuentra bien distribuida, como se ve en la Figura 6-1, el coeficiente de compacidad (Cc) es un valor muy cercano a 1, lo que nos dice que no hay falencia de diámetros entre los tamaños D_{10} y D_{60} , lo anterior nos revela que la muestra seleccionada se encuentra bien graduada.

En las fotos 6-1, se ilustra parte de la clasificación de suelo realizada en laboratorio, una vez realizado el ensayo hacemos la clasificación con SUCS y AASHTO, determinando que el material corresponde a un SW según SUCS; según AASHTO Grupo A-1 Sub-Grupo A1-a, esto debido a que los materiales cumplen con los porcentajes máximos requeridos que pasa por las mallas N° 10, 40 y 200.

Foto 6-1 Granulometría del material (RCD)



Fuente: Elaboración Propia

6.2 Gravedad Específica de la Arcilla.

Luego de realizar el ensayo de gravedad específica a la muestra de arcilla, obtenemos una Gravedad Especifica (Gs) de 2.73.

En las fotos 6-2, se enseña parte del ensayo de Gravedad Especifica realizada en laboratorio a la muestra de arcilla, el resultado completo de este ensayo se hallara en el anexo 2.

Foto 6-2 Gravedad Específica de la Arcilla



Fuente: Elaboración Propia

6.3 Límites de Atterberg para la arcilla.

Después de haber realizado el ensayo anteriormente mencionado, precedemos a realizar los referentes con los límites de Atterberg como se puede ver en las fotos 6-3, donde fueron arrojados los resultados expuestos en la tabla 6-2, el resultado completo del ensayo se encontrara en el anexo 3.

Tabla 6-2 Límites de Atterberg para la arcilla

LÍMITES DE CONSISTENCIA	
Límite Líquido (%)	42,00
Límite Plástico (%)	24,80
Índice Plasticidad (%)	17,20

Fuente: Elaboración Propia

Lo que nos indica que este material es altamente plástico según las indicaciones de las normas INVIAS, INVE 125: 2013 e INVE 126: 2013, donde dice que un material con el índice de plasticidad superior a 15 es de alta plasticidad, luego de realizado el ensayo hacemos la clasificación con SUCS y AASHTO, determinando que el material corresponde a un CH según SUCS; según AASHTO Grupo A-5 Arcilla Inorgánica Altamente Plástica.

Foto 6-3 Límites de consistencia: Límite líquido y Límite Plástico.



Fuente: Elaboración Propia

6.4 Proctor Modificado.

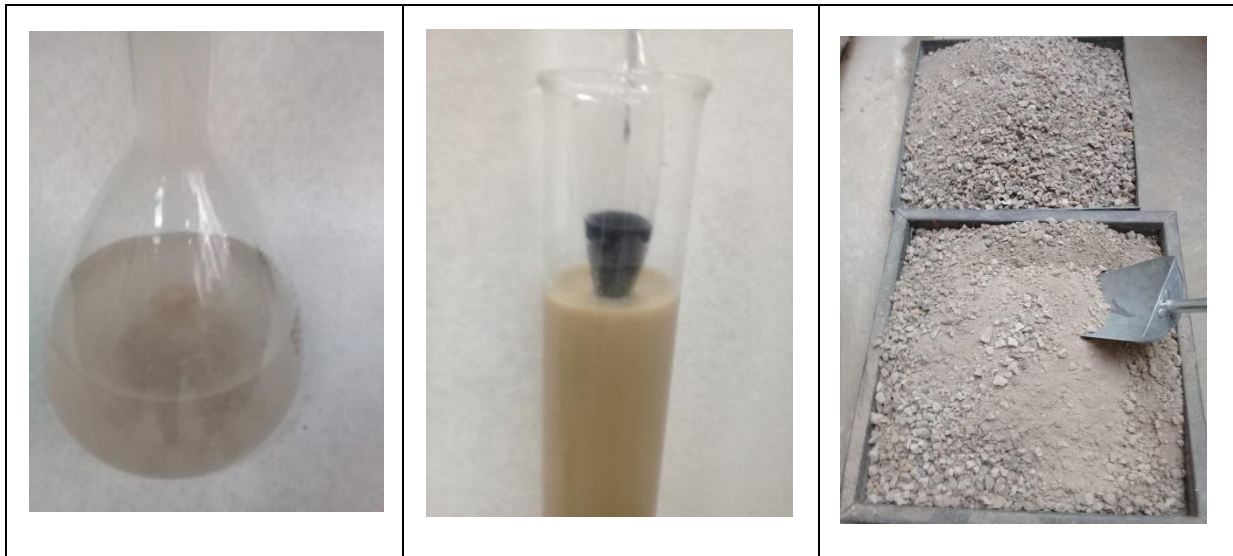
Una vez realizada la caracterización del material propuesta, se procede a realizar la mezcla correspondiente al suelo con el material de RCD propuesto, siguiendo el procedimiento que se describe a continuación:

Especialización Ingeniería de Pavimentos

- la subrasante establecida se seca al horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar masa constante.
- Se agrega el agua necesaria para alcanzar la humedad óptima obtenida en el ensayo de Proctor Modificado.
- Se vuelve a hacer el mezclado y homogenización del material.
- Se deja curar el material por 24 h.
- Pasadas las 24 h, se dispone el material para realizar los ensayos correspondientes establecidos en el plan de ensayos del presente documento.

En las fotos 6-4 se puede ver parte del laboratorio realizado del proctor, en el cual fueron arrojados los siguientes resultados Humedad Óptima de 16% y un peso unitario seco máximo de $1.74\text{ (g/cm}^3\text{)}$, el resultado completo del ensayo se encontrara en el anexo 4.

Foto 6-4 Proctor Modificado.



Fuente: Elaboración Propia

6.5 CBR de Suelos Compactados en el Laboratorio (I.N.V. E – 148 – 13).

Se realizaron 4 ensayos de CBR en las condiciones:

- ✓ (1) Material natural.
- ✓ (1) Material natural con un porcentaje de 5% de RCD.
- ✓ (1) Material natural con un porcentaje de 10% de RCD.
- ✓ (1) Material natural con un porcentaje de 20% de RCD.

Las propiedades de los suelos que influyen en el resultado del CBR, son las mismas que definen el peso volumétrico seco máximo, por lo que los materiales con mayor peso volumétrico alcanzaran mayor valor de soporte.

Obtenidos los cálculos para el CBR en la arcilla sin adición, y con relación al anexo 5, indica un porcentaje por debajo del 4%. Por otra parte los resultados obtenidos en las mezclas propuestas nos especifica que es una subrasante demasiado deficiente como se ve en la Tabla 6-4, con respecto a la tabla 6-3, consultada en el manual del INVIAS.

Tabla 6-3 Resultados CBR

RESULTADOS DE PRUEBA CBR			
MATERIAL	PRUEBA #	CBR 100%	CBR 95%
ARCILLA	1	4	4
ARCILLA MAS 5% DE RCDs MIXTOS	1	6	4
ARCILLA MAS 10% DE RCDs MIXTOS	1	6	4
ARCILLA MAS 20% DE RCDs MIXTOS	1	4	4

Fuente: Elaboración Propia

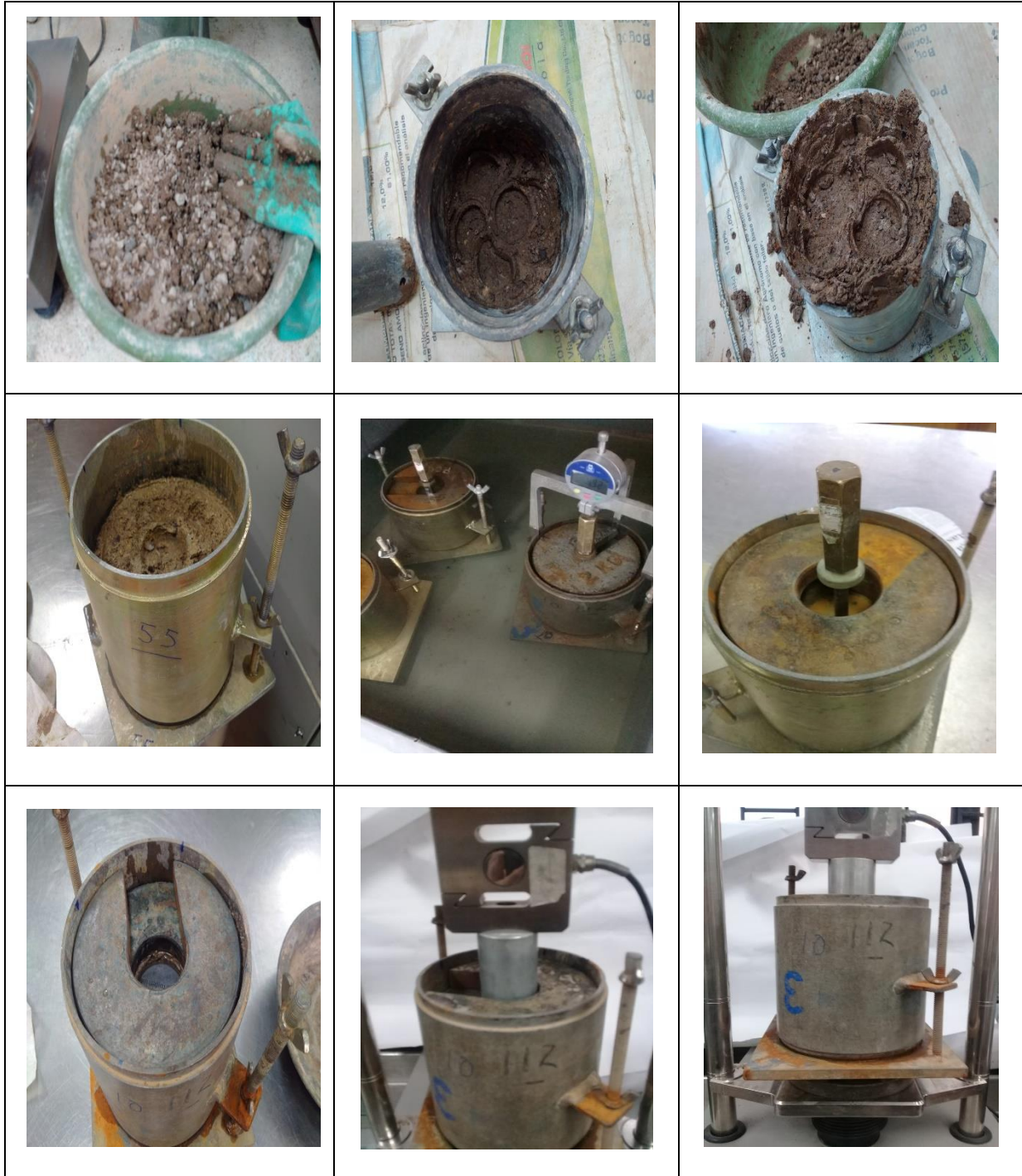
Tabla 6-4 Normas INVE 125: 2013 e INV E 126: 2013

CBR	CATEGORIA DE SUBRASANTE
CBR < 3%	Subrasante Inadecuada
CBR ≥ 3% a CBR < 6%	Subrasante Pobre
CBR ≥ 6% a CBR < 10%	Subrasante Regular
CBR ≥ 10% a CBR < 20%	Subrasante Buena
CBR ≥ 20% a CBR < 30%	Subrasante Muy Buena
CBR ≥ 30%	Subrasante Excelente

Fuente: Manual del INVIAS, Normas INV E 125: 2013 e INV E 126: 2013

Luego de realizar los ensayos de laboratorio, anteriormente expuestos en el presente documento podemos decir que aun estando bien gradado el material de Residuos de Construcción y Demolición utilizado en esta investigación, no es funcional en ninguna de las mezclas propuestas, debido a que cada uno de los CBR calculados se encuentran por debajo del 10 %, como se ve en una tabla 6-3 para evidenciar de forma más detallada. Los resultados completos se muestran en el anexo 5, por otra parte en las fotos 6-5 se evidencia parte del ensayo de CBR realizado a la arcilla natural y estabilizada.

Foto 6-5 CBR de Suelos Compactados



Fuente: Elaboración Propia

7. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo propuesto en este documento se esperaba obtener unos resultados favorables para la estabilización de arcillas de alta plasticidad, utilizando un material de RCD el cual fue obtenido de los sobrantes de bases y sub bases recicladas, toda vez que este material es desechado constante mente; luego de ver que los porcentajes propuestos no cumplieron las expectativas podemos concluir lo siguiente:

✚ Para obtener un CBR superior al 10 %, se recomienda continuar realizando más ensayos con unos porcentajes de RCD superiores al 30%, ya que luego de mirar la mezcla del 10% y el 20%, realizadas en este documento, estos se acercan favorablemente al porcentaje que se quiso llegar en esta investigación ya que en los dos casos, el CBR fue de 6 %, se cree que aumentando el porcentaje de RCD, en un 10 % se obtendrá mejores resultados.

✚ Luego de clasificar el material reciclado escogido, este se nos comporta como una arena bien gradada, podemos concluir que las propiedades físico – mecánicas de este tipo de materiales son funciones netamente granulométricas, por tal razón este tipo de material debería ser incluido dentro del catálogo de las plantas de reciclaje, para ser comercializado por lo menos como sello de rajón o similares, cabe aclarar que estos no se dejan clasificar como sub bases o bases.

✚ Por otra parte cabe aclarar que los materiales reciclados no los podemos usar como capa de rodadura, porque la gravedad específica es relativamente baja, es por lo anterior que la desintegración por la exposición de cargas directas de tránsito.

✚ Ya para terminar podemos concluir, teniendo en cuenta los resultados que los materiales explorados simbolizan un aporte esencial a la protección del medio ambiente, toda vez que el uso masivo de estos reducirá la explotación de canteras.

8. RECOMENDACIONES

✚ Como primera recomendación, se aclara que para la reutilización de materiales iguales o similares a los investigados en el presente documento, sean clasificados antes de y tengan especial cuidado con la presencia de materia orgánica, plásticos, madera, pintura y cualquier elemento similar que pueda llegar a afectar el comportamiento mecánico de los mismos.

✚ Por otra parte y desde el punto de vista ambiental, se recomienda hacer uso de las buenas prácticas para el buen manejo de los materiales reciclados provenientes de excavación y demolición (RCD), con el fin de colaborarle al medio ambiente y minimizar los daños del mismo.

✚ Se recomienda para próximas investigaciones relacionadas con el uso de RCDs mezcladas con suelos arcillosos, hacer una investigación enfocada a las propiedades físico - mecánicas de estas surasantes, para poder disponer de una mejor manera al momento de realizar la escogencia de los porcentajes a evaluar.

✚ Para futuras investigaciones, se recomienda realizar diferentes pruebas con otras condiciones a los materiales reciclados, para observar cómo se comporta en diferentes mezclas combinándolo con materiales de mejores características, realizando diferentes tipos de mezclas para poder disponer de mayor cantidad de parámetros sin incurrir en alguna clase de errores.

9. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] B. Service, «Service Contract on Management of Construction and demolition Waste,» *Bio Service*, “Service Contract on Management of Construction and demolition Waste, vol. European Commission (DGENV), Paris, 2011.
- [2] C. M. B. Montoya, «El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles,» Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Medellín, Medellín 2003.
- [3] I. E. A. T. Machado, «Ing. Eulalio A. Toscano Machado. Maestría de Gerencia de la Ciencia Gestión de la Ciencia y Tecnología para el Reciclado de los Desechos Sólidos en la Construcción,» Gestión de la Ciencia y la innovación Tecnológica, Villa Claro, Republica de Cuba, 2008.
- [4] J. M. G.-S. J. A. S. A. M. C. G. J. M. F. Cabrera, «F. Cabrera, J. M. Gómez-Soberón, J. Almaral, S. Arredondo, M. C. Gómez, J. Mendivil, “Propiedades en estado fresco de morteros con árido reciclado de hormigón y efecto de la relación c/a”, *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, vol. 35, no. 1, 2017.,» *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, vol. vol. 35, n° no. 1, 2017.
- [5] A. P. E. A. E. S. K. M. F. K. A. M. M. L. D. Fatta, «D. Fatta, A. Papadopoulos, E. Avramikos, E. SgGeneration and management of construction and demolition waste in Greece-an existing challenge,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. vol. 40, n° N° 1, pp. 81-91, 2003.
- [6] M. d. M. A. Español, «BOE 166 Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001–2006,» de *Madrid: Ministerio de Medio Ambiente*, Madrid, 2006.

Especialización Ingeniería de Pavimentos

- [7] S. d. a. d. Bogotá, «Guía ambiental para la elaboración del plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición - RCD en la obra,» de [En línea]. Disponible en: <http://www.minvivienda.gov.co.>, Bogotá , 2014.
- [8] A. J. W. F. F. & S. Sosa, «Sosa, A. J., Wulff, F., Fonseca, & Saavedra. (2010). Soluciones e innovaciones tecnológicas de mejoramiento de vías e bajo tránsito,» Bogotá (2010).
- [9] López J. C. MANUAL DE ESTABILIZACIÓN Y REVEGETACIÓN DE TALUDES, Gráficas Arias Montano S.A. Madrid 1999.
- [10] INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificaciones IDU-ET-2005 [en línea]. Bogotá: IDU [citado 22 octubre 2013]. Disponible en Internet: <URL: http://www.idu.gov.co/web/guest/tramites_doc_especificacion>.
- [11] MONTEJO, Alfonso. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2001. 733p.
- [12] INVIAS, I. N. (2013). Normas de Ensayo de Granulometría. INV E – 223 – 13, Bogotá: INVIAS.
- [13] INVIAS, I. N. (2013). Normas de Ensayo de Determinación del C.B.R. INV E – 248 – 13, Bogotá: INVIAS.
- [14] INVIAS, I. N. (2013). Normas de Ensayo de Determinación de Límite Líquido INV E – 225 – 13, Bogotá: INVIAS.
- [15] INVIAS, I. N. (2013). Normas de Ensayo de Determinación de Límite Plástico e Índice de Plasticidad. INV E – 226 – 13, Bogotá: INVIAS.

Especialización Ingeniería de Pavimentos

[16] Reciclados Industriales de Colombia (2019). Propuesta Comercial Materiales Granulares en (RCD) Reciclados Industriales de Colombia, Bogotá Colombia.

ANEXO 1 Granulometría del material (RCD)

Especialización Ingeniería de Pavimentos

- ✓ **Material retenido en malla N° 4** (por tamizado).

$$W_o = 9494.90 \text{ gr}$$

Resultados de tamizado (retenido)

1 " =	420.7	gr
3/4 " =	628.9	gr
1/2 " =	815.5	gr
3/8 " =	571	gr
No.4 =	1171.2	gr
Material que pasa la malla No.4		
	5,884.40	gr
W_{f total} =	9491.7	gr

Error por perdidas

Error = $(W_o - W_f)/W_f$	
$(W_o - W_f) =$	3.00 gr
Error =	0.03% < 0.5% OK

- ✓ **Material retenido en malla N° 4** (luego de lavado por N° 200).

$$W_o = 577.40 \text{ gr}$$

Resultados de tamizado (retenido)

No. 4 =	2.9	gr
No. 10 =	177.9	gr
No. 30 =	216.9	gr
No. 40 =	45.9	gr
No. 200 =	132.8	gr
Fondo =	0.8	gr
W_{f total} =	577.2	gr

Error por perdidas

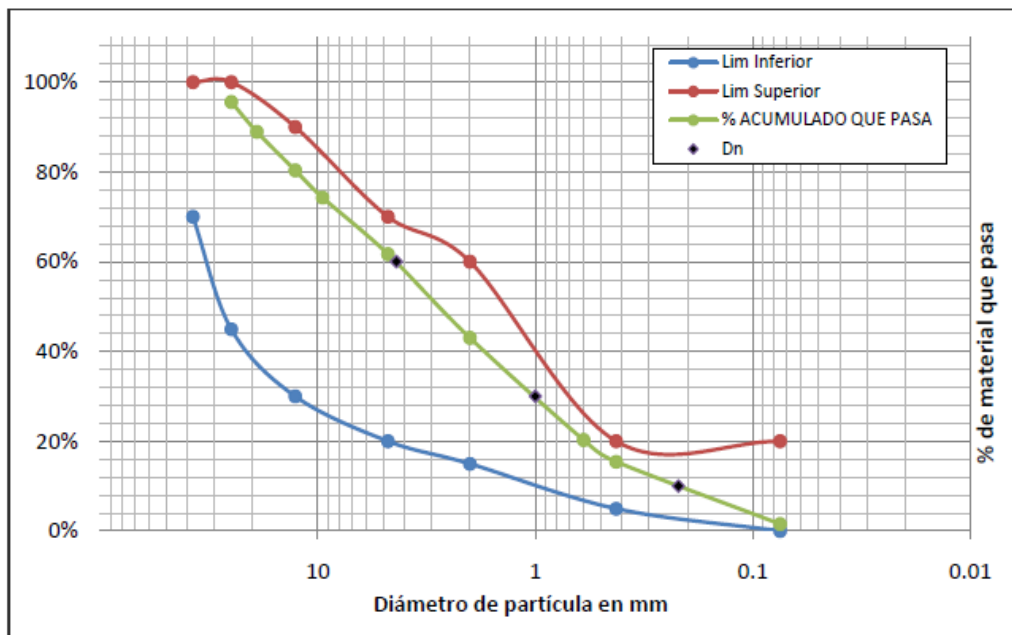
Error = $(W_o - W_f)/W_f$	
$(W_o - W_f) =$	0.20 gr
Error =	0.03% < 0.5% OK

Contenido de humedad (w %) fracción que pasa la malla No. 4	Material que pasa la malla No. 200
W _{tara No.6} = 71.9 gr	W _{muestra húmeda} = 743.3 gr
W _{tara No.6 + Mat-Sel} = 436.1 gr	W _{retenido parcialmente seco} = 577.4 gr
W _{tara No.6 + Mat-Sel seco} = 423.7 gr	<i>Material que pasa la malla No. 200 = Peso total seco - Peso retenido parcial seco</i>
(w %) = 3.52%	Material que pasa la malla No. 200 = 140.59 gr

Tabla Granulometría del Material Trabajado RCD

MALLA	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA
1 "	25.0	420.7	4.43%	4.43%	95.57%
3/4 "	19.05	628.9	6.63%	11.06%	88.94%
1/2 "	12.70	815.5	8.59%	19.65%	80.35%
3/8 "	9.52	571	6.02%	25.67%	74.33%
No. 4	4.76	1200.05	12.64%	38.31%	61.69%
No. 10	2.00	1,771.69	18.67%	31.31%	43.03%
No. 30	0.60	2,157.66	22.73%	79.71%	20.29%
No. 40	0.43	456.60	4.81%	84.52%	15.48%
No. 200	0.075	1,321.06	13.92%	98.43%	1.57%
Fondo	-	148.55	1.57%	100.00%	0.00%
Total		9491.70	gr		

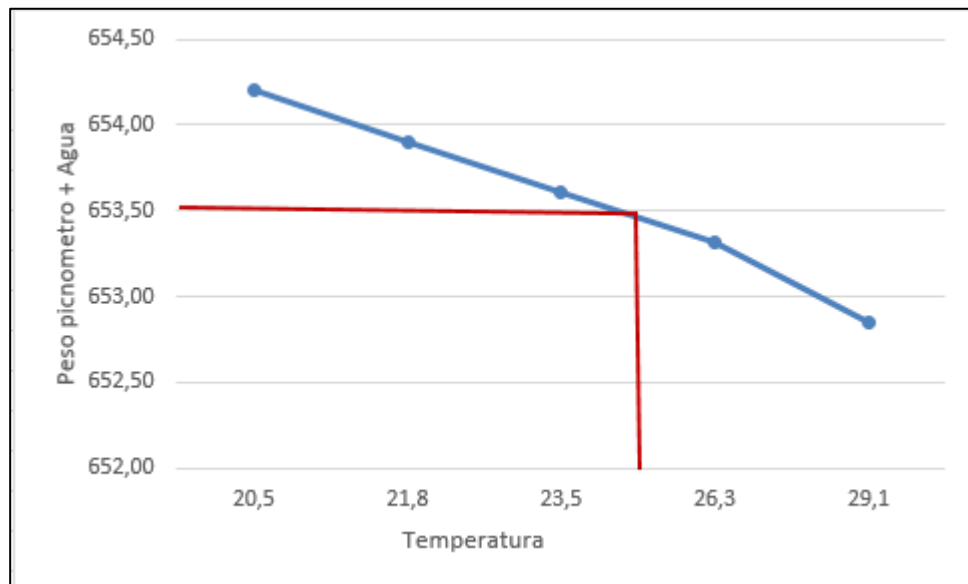
Curva granulométrica RCD



ANEXO 2 Gravedad Específica

Gravedad Específica

GARVEDAD ESPECIFICA DE SUELOS		
NORMA I.N.V.E-128-13		
LOCALIZACION	BOGOTA	
ENSAYO	1	
SONDEO	1	
MUESTRA	1	
PROFUNDIDAD	1	
DESCRIPCION	arcilla limosa de color gris , consistencia DURA, plasticidad	
PICNOMETRO	500ml	
TEMPERATURA	PESO PICNOMETRO+AGUA	
20,5	654,20	
21,8	653,90	
23,5	653,61	
26,3	653,32	
29,1	652,85	



PESO PICNOMETRO	gr	166,30
PESO PICNOMETRO+ AGUA	gr	653,50
PESO PICNOMETRO+AGUA+SUELO	gr	685,26
PESO SECO	gr	50,00
TEMPERATURA	°C	25
CONSTANTE K		0,9971
Gs		2,73

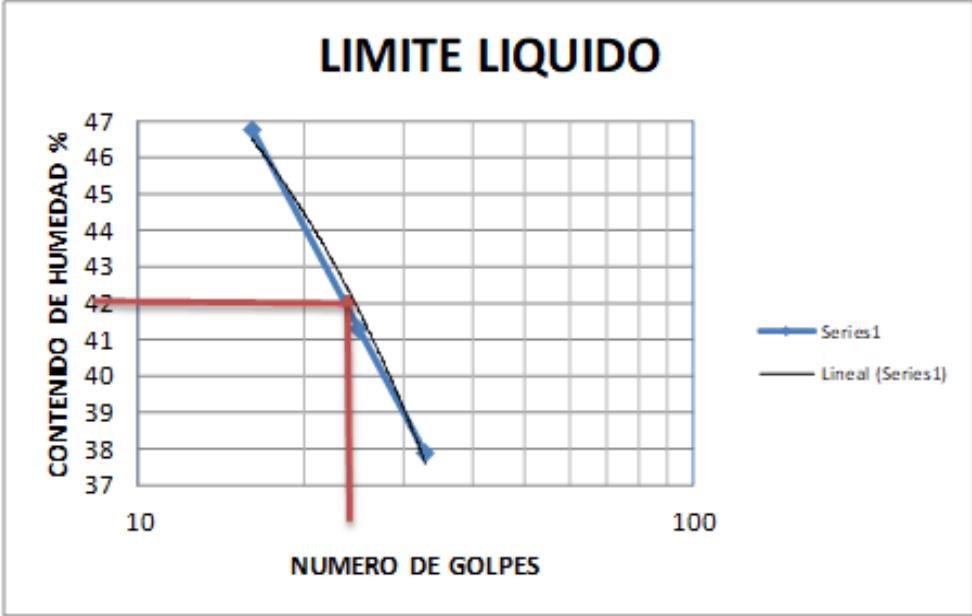
Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 3 Límites de Atterberg

Especialización Ingeniería de Pavimentos

LIMITES DE ATTERBERG						
I.N.V.E 125 / 126 -13						
LOCALIZACIÓN		Bogotá				
ENSAYO	1					
SONDEO	1					
MUESTRA	1					
PROFUNDIDAD	1,0m					
DESCRIPCIÓN	arcilla limosa de color gris, consistencia dura plasticidad media, húmeda					
		LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLÁSTICO	
NUMERO DE GOLPES	33	25	16	PRUEBA 1	PRUEBA 2	
RECIPIENTE	22	10	45	72	50	
PESO RECIPIENTE	18,25	17,02	17,22	16,33	18,01	
PESO RECIPIENTE + SUELO HÚMEDO	42,25	41,36	44,78	28,15	27,36	
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO	35,66	34,25	36	25,83	25,48	
CONTENIDO DE HUMEDAD	37,85	41,27	46,75	24,42	25,17	

LIMITE LIQUIDO



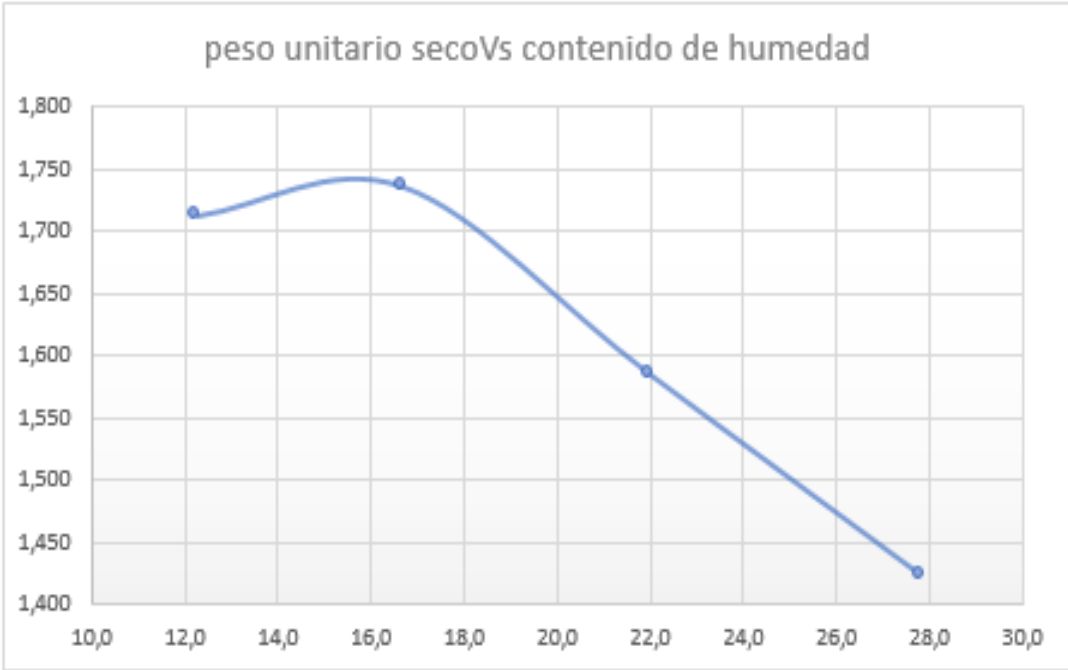
LIMITE LIQUIDO	42,0	CLASIFICACIÓN	
LIMITE PLÁSTICO	24,8	S.U.C.S	A.A.S.H.T.O
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	17,2	CH	A-5
		Arcillas inorgánicas de plasticidad	

ANEXO 4 Proctor Modificado

Especialización Ingeniería de Pavimentos

ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO					
INVE- 142-13					
		1	2	3	4
PESO MOLDE	g	2902	2902	2902	2902
VOLUMEN MOLDE	cm ³	2104	2104	2104	2104
CONTENIDO DE AGUA	%	10	15	20	25
PESO MOLDE + MUESTRA HUMEDA	g	6945	7163	6971	6732
PESO MUESTRA HUMEDA	g	4043	4261	4069	3830
PESO UNITARIO HUMEDO	g/cm ³	1,922	2,025	1,934	1,820
PESO UNITARIO SECO	g/cm ³	1,712	1,736	1,586	1,425
CONTENIDO DE HUMEDAD					
NUMERO DE RECIPIENTE	#	11	22	35	19
PESO RECIPIENTE	g	98,6	112,4	58,1	118,5
PESO RECIPIENTE+ SUELO HUMEDO	g	875,5	933,2	639,9	896,6
PESO RECIPIENTE+SUELO SECO	g	790,8	815,9	535,1	727,4
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	12,2	16,7	22,0	27,8

peso unitario secoVs contenido de humedad



Contenido de Humedad (%)	Peso Unitario Seco (g/cm ³)
12,2	1,712
16,7	1,736
22,0	1,586
27,8	1,425

HUMEDAD OPTIMA	%	16			
PESO UNITARIO SECO MAXIMO	g/cm ³	1,740			

ANEXO 5 CBR

Especialización Ingeniería de Pavimentos

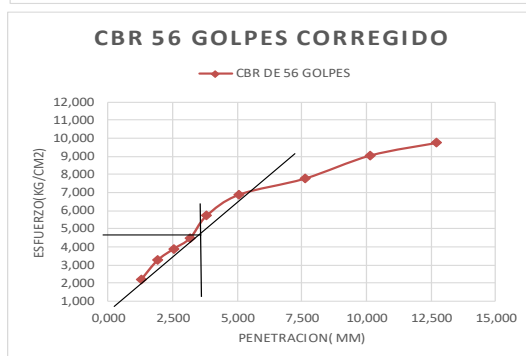
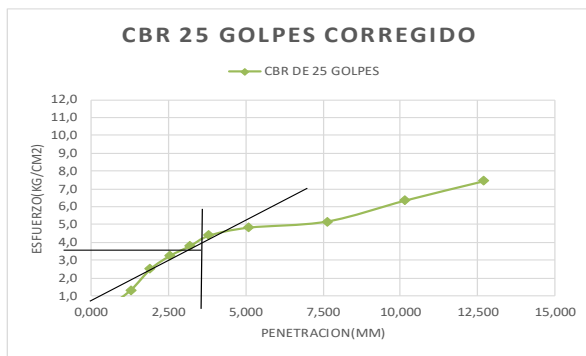
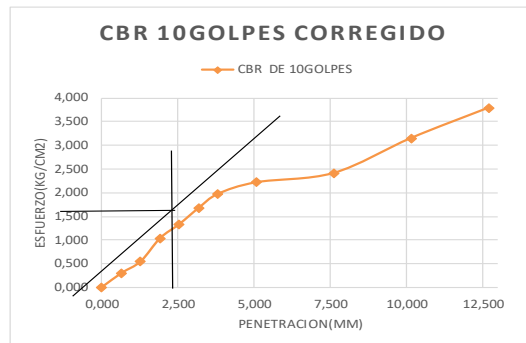
Arcilla Inorgánica

CBR MUESTRA NUMERO 1 SIN ADICION									
PROYECTO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN LAS ARCILLAS TÍPICAS DE BOGOTÁ ESTABILIZADAS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD).									
MATERIAL: ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD									
DATOS INICIALES									
			10 GOLPES	25 GOLPES	56GOLPES				
DIAMETRO MOLDE	cm		15,2	15,2	15,2				
ALTURA MOLDE	cm		11,6	11,6	11,6				
AREA MOLDE	cm ²		181,5	181,5	181,5				
VOLUMEN MOLDE	cm ³		2105,4	2105,4	2105,4				
PESO MOLDE	g		4374	4570	4598				
PESO MOLDE + MUESTRA	g		8249	8489	8572				
PESO MUESTRA	g		3875	3919	3974				
PESO UNITARIO	g/cm ³		1,841	1,861	1,888				
CONTENIDO DE HUMEDAD									
				10 GOLPES	25GOLPES	56GOLPES			
RECIPIENTE NUMERO		#		2	1	12			
PESO RECIPIENTE		g		61,1	58,1	72,6			
PESO RECIPIENTE + SUELO HUMEDO		g		531,8	614,3	529,6			
PESO RECIPIENTE+ SUELO SECO		g		465,5	540,2	463,5			
CONTENIDO DE HUMEDAD		%		16,4	15,4	16,9			
EXPANSION									
				10 GOLPES	25 GOLPES	56GOLPES			
LECTURA INICIAL	mm			2,18	4,86	5,13			
24 HORAS	mm			4,92	6,54	5,23			
48 HORAS	mm			5,69	7,12	5,49			
72 HORAS	mm			5,90	7,63	5,58			
96 HORAS	mm			5,92	7,67	5,70			
ETAPA DE FALLA									
MUESTRA	#	1 sin adiccion							
DIAMETRO DEL PISTON	cm	5,08							
AREA PISTON	cm ²	20,3							
CBR DE 10GOLPES					CBR DE 25 GOLPES				
PENETRACION	PENETRACION	CARGA	AREA	ESFUERZO	PENETRACION	PENETRACION	CARGA	AREA	ESFUERZO
mm	cm	kg	cm ²	kg / cm ²	mm	cm	kg	cm ²	kg / cm ²
0,000	0,000	0,0	20,3	0,0	0,000	0,000	0,0	20,3	0,000
0,64	0,063	6	20,3	0,296	0,025	0,063	11	20,3	0,542
1,270	0,127	11	20,3	0,542	0,05	0,127	27	20,3	1,330
1,91	0,191	21	20,3	1,034	0,075	0,191	51	20,3	2,512
2,540	0,254	27	20,3	1,330	0,100	0,254	66	20,3	3,251
3,18	0,318	34	20,3	1,675	0,125	0,318	77	20,3	3,793
3,810	0,381	40	20,3	1,970	0,150	0,381	89	20,3	4,384
5,080	0,508	45	20,3	2,217	0,200	0,508	98	20,3	4,828
7,620	0,762	49	20,3	2,414	0,300	0,762	105	20,3	5,172
10,160	1,016	64	20,3	3,153	0,400	1,016	129	20,3	6,355
12,700	1,270	77	20,3	3,793	0,500	1,270	151	20,3	7,438

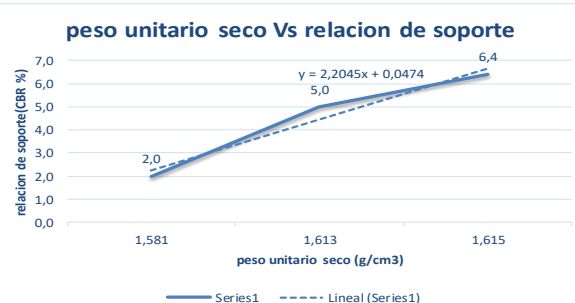
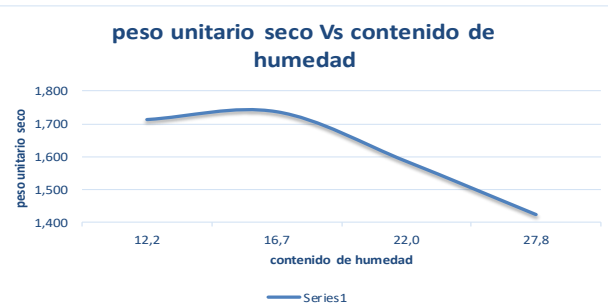
Especialización Ingeniería de Pavimentos

CBR Arcilla Inorgánica

CBR DE 56 GOLPES				
PENETRACION	PENETRACION	CARGA	AREA	ESFUERZO
mm	cm	kg	cm ²	kg/cm ²
0,000	0,000	0,0	20,3	0,000
0,025	0,063	24	20,3	1,182
0,05	0,127	44	20,3	2,167
0,075	0,191	66	20,3	3,251
0,100	0,254	79	20,3	3,892
0,125	0,318	91	20,3	4,483
0,150	0,381	116	20,3	5,714
0,200	0,508	140	20,3	6,897
0,300	0,762	158	20,3	7,783
0,400	1,016	184	20,3	9,064
0,500	1,270	198	20,3	9,754



CURVAS DENSIDAD SECA Vs CBR						
			10 GOLPES	25GOLPES	56GOLPES	
DENSIDAD HUMEDA		g/cm3	1,841	1,861	1,888	
HUMEDAD		%	16,4	15,4	16,9	
DENSIDAD SECA		g/cm3	1,581	1,613	1,615	
CBR			1,4	3,5	4,5	
CBR(valor fijo)	70,31	%	2,0	5,0	6,4	
		HUMEDAD	PESO UNITARIO SECO	CBR %		PESO VOLUMÉTRICO MÁX: 1,740 Kg/m ³
		12,2	1,712	2,00		HUMEDAD ÓPTIMA: 16 %
		16,7	1,736	5,00		CBR 100% 1,740 3,87
		22,0	1,586	6,40		CBR 95% 1,653 3,68
		27,8	1,425			



Para CBR 95% $Y = 2.2 X 1.65 + 0.04$ $Y = 4$

Para CBR 100 % $Y = 2.2 X 1.74 + 0.04$ $Y =$

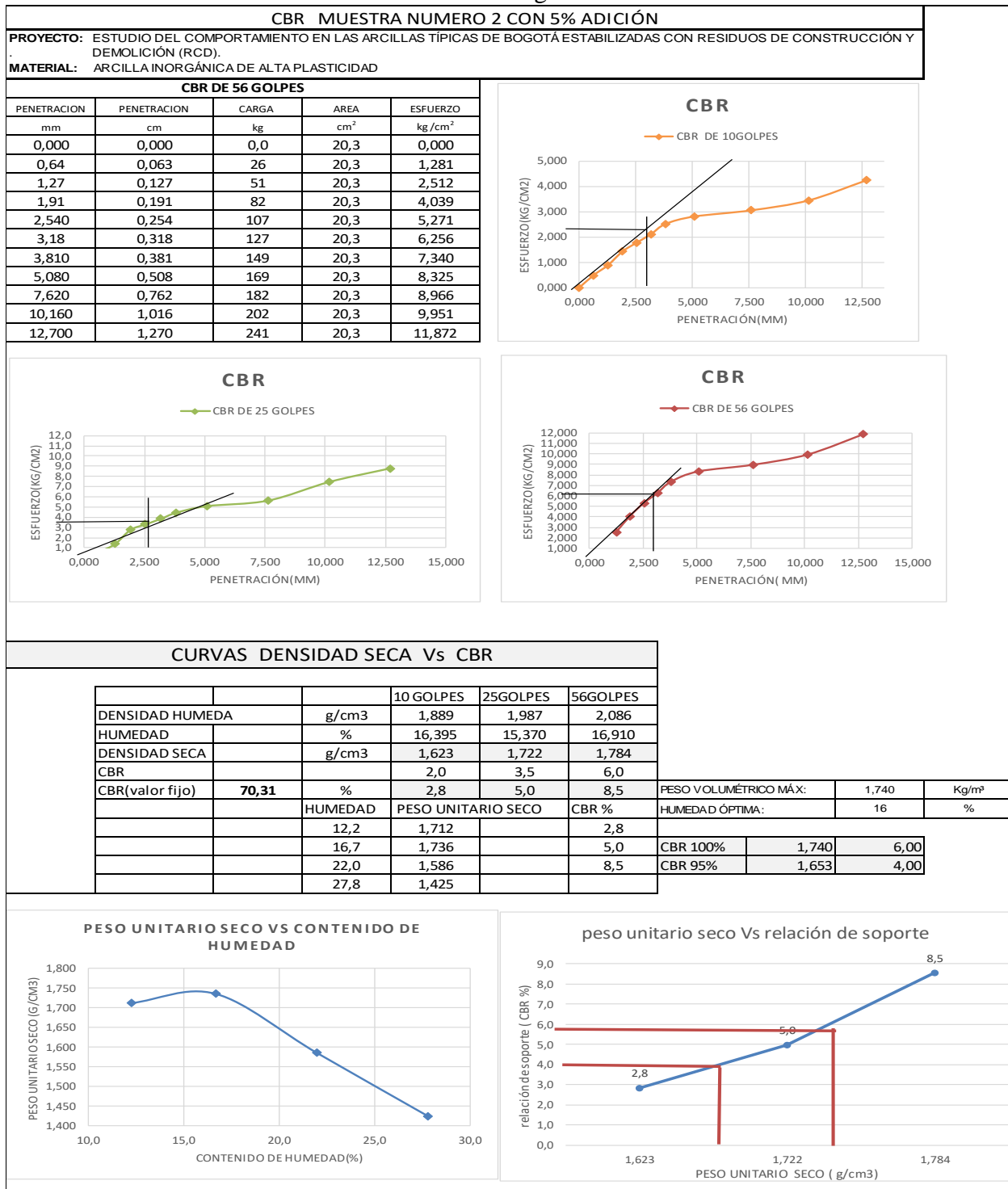
Especialización Ingeniería de Pavimentos

CBR Arcilla Inorgánica + 5%

CBR MUESTRA NUMERO 2 CON 5% ADICIÓN									
PROYECTO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN LAS ARCILLAS TÍPICAS DE BOGOTÁ ESTABILIZADAS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD).									
MATERIAL: ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD									
DATOS INICIALES									
			10 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES				
DIÁMETRO MOLDE	cm		15,2	15,2	15,2				
ALTURA MOLDE	cm		11,6	11,6	11,6				
ÁREA MOLDE	cm ²		181,5	181,5	181,5				
VOLUMEN MOLDE	cm ³		2105,4	2105,4	2105,4				
PESO MOLDE	g		4374	4570	4598				
PESO MOLDE + MUESTRA	g		8351	8753	8989				
PESO MUESTRA	g		3977	4183	4391				
PESO UNITARIO	g/cm ³		1,889	1,987	2,086				
CONTENIDO DE HUMEDAD									
			10 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES				
RECIPIENTE NUMERO		#	5	8	7				
PESO RECIPIENTE		g	65,4	74,01	57,8				
PESO RECIPIENTE + SUELO HÚMEDO		g	426,7	496,2	476,3				
PESO RECIPIENTE+ SUELO SECO		g	375,7	433,9	419,2				
CONTENIDO DE HUMEDAD		%	16,4	17,3	15,8				
EXPANSIÓN									
			10 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES				
LECTURA INICIAL	mm		1,37	5,05	2,34				
24 HORAS	mm		3,81	6,45	3,63				
48 HORAS	mm		4,10	7,00	3,98				
72 HORAS	mm		4,46	7,41	4,54				
96 HORAS	mm		4,6	7,78	4,91				
ETAPA DE FALLA									
MUESTRA		#	2	adición 5%					
DIÁMETRO DEL PISTÓN	cm		5,08						
ÁREA PISTÓN	cm ²		20,3						
CBR DE 10GOLPES					CBR DE 25 GOLPES				
PENETRACION	PENETRACION	CARGA	AREA	ESFUERZO	PENETRACION	PENETRACION	CARGA	AREA	ESFUERZO
mm	cm	kg	cm ²	kg / cm ²	mm	cm	kg	cm ²	kg / cm ²
0,000	0,000	0,0	20,3	0,0	0,000	0,000	0,0	20,3	0,000
0,64	0,063	10	20,3	0,493	0,64	0,063	13	20,3	0,640
1,270	0,127	18	20,3	0,887	1,27	0,127	28	20,3	1,379
1,91	0,191	29	20,3	1,429	1,91	0,191	56	20,3	2,759
2,540	0,254	36	20,3	1,773	2,540	0,254	67	20,3	3,300
3,18	0,318	43	20,3	2,118	3,18	0,318	78	20,3	3,842
3,810	0,381	51	20,3	2,512	3,810	0,381	90	20,3	4,433
5,080	0,508	57	20,3	2,808	5,080	0,508	103	20,3	5,074
7,620	0,762	62	20,3	3,054	7,620	0,762	114	20,3	5,616
10,160	1,016	70	20,3	3,448	10,160	1,016	151	20,3	7,438
12,700	1,270	86	20,3	4,236	12,700	1,270	178	20,3	8,768

Especialización Ingeniería de Pavimentos

CBR Arcilla Inorgánica + 5%



Especialización Ingeniería de Pavimentos

CBR Arcilla Inorgánica + 10%

CBR MUESTRA NUMERO CON 10% ADICIÓN									
PROYECTO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN LAS ARCILLAS TÍPICAS DE BOGOTÁ ESTABILIZADAS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD).									
MATERIAL: ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD									
		10 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES					
DIÁMETRO MOLDE	cm	15,2	15,2	15,2					
ALTURA MOLDE	cm	11,6	11,6	11,6					
ÁREA MOLDE	cm ²	181,5	181,5	181,5					
VOLUMEN MOLDE	cm ³	2105,4	2105,4	2105,4					
PESO MOLDE	g	4374	4570	4598					
PESO MOLDE + MUESTRA	g	8423	8910	8992					
PESO MUESTRA	g	4049	4340	4394					
PESO UNITARIO	g/cm ³	1,923	2,061	2,087					
CONTENIDO DE HUMEDAD									
			10 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES				
RECIPIENTE NUMERO	#	18	1	21					
PESO RECIPIENTE	g	66,3	58	61,6					
PESO RECIPIENTE + SUELO HÚMEDO	g	415,4	442,9	446,5					
PESO RECIPIENTE+ SUELO SECO	g	363,6	388,5	395,1					
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	17,4	16,5	15,4					
EXPANSIÓN									
		10 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES					
LECTURA INICIAL	mm	5,25	6,47	2,74					
24 HORAS	mm	7,27	7,98	3,69					
48 HORAS	mm	7,63	8,62	4,35					
72 HORAS	mm	7,15	8,87	4,59					
96 HORAS	mm	7,75	9,05	4,78					
ETAPA DE FALLA									
MUESTRA	#	3							
DIÁMETRO DEL PISTÓN	cm	5,08							
ÁREA PISTÓN	cm ²	20,3							
CBR DE 10 GOLPES					CBR DE 26 GOLPES				
PENETRACIÓN	PENETRACIÓN	CARGA	ÁREA	ESFUERZO	PENETRACIÓN	PENETRACIÓN	CARGA	ÁREA	ESFUERZO
mm	cm	kg	cm ²	kg/cm ²	mm	cm	kg	cm ²	kg/cm ²
0,000	0,000	0,0	20,3	0,0	0,000	0,000	0,0	20,3	0,000
0,64	0,063	17	20,3	0,837	0,025	0,063	34	20,3	1,675
1,270	0,127	28	20,3	1,379	0,05	0,127	52	20,3	2,562
1,91	0,191	41	20,3	2,020	0,075	0,191	68	20,3	3,350
2,540	0,254	50	20,3	2,463	0,100	0,254	80	20,3	3,941
3,18	0,318	58	20,3	2,857	0,125	0,318	92	20,3	4,532
3,810	0,381	66	20,3	3,251	0,150	0,381	103	20,3	5,074
5,080	0,508	72	20,3	3,547	0,200	0,508	113	20,3	5,567
7,620	0,762	78	20,3	3,842	0,300	0,762	125	20,3	6,158
10,160	1,016	97	20,3	4,778	0,400	1,016	148	20,3	7,291
12,700	1,270	109	20,3	5,369	0,500	1,270	174	20,3	8,571

Especialización Ingeniería de Pavimentos

CBR Arcilla Inorgánica + 10%

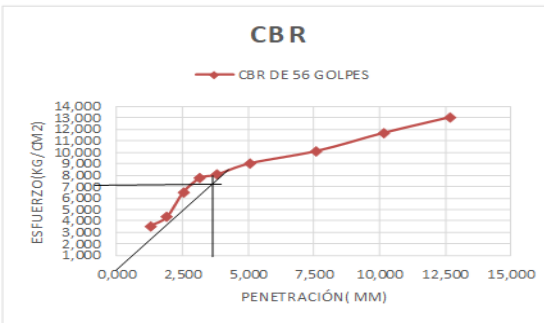
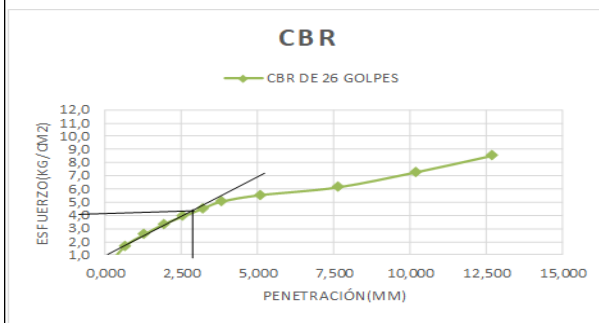
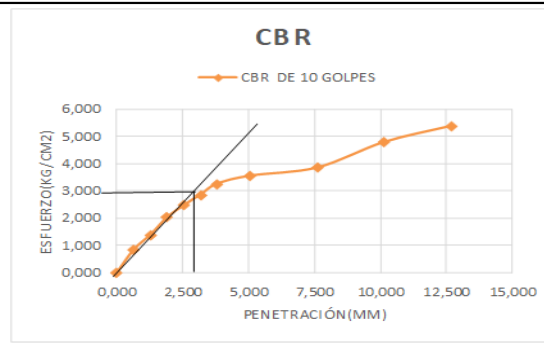
CBR MUESTRA NUMERO CON 10% ADICIÓN

PROYECTO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN LAS ARCILLAS TÍPICAS DE BOGOTÁ ESTABILIZADAS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD).

MATERIAL: ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD

CBR DE 56 GOLPES

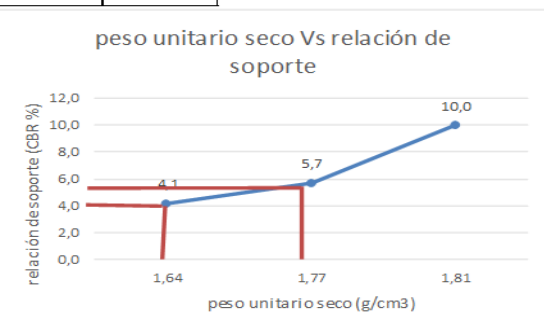
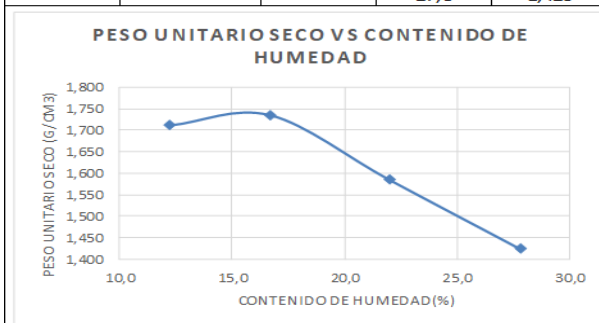
PENETRACIÓN	PENETRACIÓN	CARGA	ÁREA	ESFUERZO
mm	cm	kg	cm ²	kg/cm ²
0,000	0,000	0,0	20,3	0,000
0,025	0,063	57	20,3	2,808
0,05	0,127	72	20,3	3,547
0,075	0,191	88	20,3	4,335
0,100	0,254	132	20,3	6,502
0,125	0,318	157	20,3	7,734
0,150	0,381	163	20,3	8,030
0,200	0,508	183	20,3	9,015
0,300	0,762	205	20,3	10,099
0,400	1,016	237	20,3	11,675
0,500	1,270	265	20,3	13,054



CURVAS DENSIDAD SECA Vs CBR

		10 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	1,923	2,061	2,087
HUMEDAD	%	17,4	16,5	15,4
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1,64	1,77	1,81
CBR		2,9	4,0	7,0
CBR(valor fijo)	70,31	4,1	5,7	10,0
	HUMEDAD	PESO UNITARIO SECO	CBR %	
	12,2	1,712	4,1	
	16,7	1,736	5,7	
	22,0	1,586	10,0	
	27,8	1,425		

PESO VOLUMÉTRICO MÁX:	1,740	Kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA:	16	%
CBR 100%	1,740	6,00
CBR 95%	1,653	4,00



Especialización Ingeniería de Pavimentos

CBR Arcilla Inorgánica + 20%

CBR MUESTRA NUMERO CON 20% ADICIÓN									
PROYECTO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN LAS ARCILLAS TÍPICAS DE BOGOTÁ ESTABILIZADAS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN. Y DEMOLICIÓN (RCD).									
MATERIAL: ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD									
			10 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES				
DIÁMETRO MOLDE	cm	15,2	15,2	15,2					
ALTURA MOLDE	cm	11,6	11,6	11,6					
ÁREA MOLDE	cm ²	181,5	181,5	181,5					
VOLUMEN MOLDE	cm ³	2105,4	2105,4	2105,4					
PESO MOLDE	g	4374	4570	4598					
PESO MOLDE + MUESTRA	g	8682	8929	9015					
PESO MUESTRA	g	4308	4359	4417					
PESO UNITARIO	g/cm ³	2,046	2,070	2,098					
CONTENIDO DE HUMEDAD									
			10 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES				
RECIPIENTE NUMERO	#	29	2	7					
PESO RECIPIENTE	g	70,16	61,4	57,8					
PESO RECIPIENTE + SUELO HÚMEDO	g	440,7	398,6	366,5					
PESO RECIPIENTE+ SUELO SECO	g	385,8	351,9	320,7					
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	17,4	16,1	17,4					
EXPANSIÓN									
			10 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES				
LECTURA INICIAL	mm	2,75	5,06	7,01					
24 HORAS	mm	3,22	5,49	7,7					
48 HORAS	mm	3,37	5,64	7,75					
72 HORAS	mm	3,50	5,69	7,89					
96 HORAS	mm	3,54	5,73	7,92					
ETAPA DE FALLA									
MUESTRA	#	4							
DIÁMETRO DEL PISTÓN	cm	5,08							
ÁREA PISTÓN	cm ²	20,3							
CBR DE 10 GOLPES					CBR DE 26 GOLPES				
PENETRACION	PENETRACION	CARGA	ÁREA	ESFUERZO	PENETRACION	PENETRACION	CARGA	ÁREA	ESFUERZO
mm	cm	kg	cm ²	kg/cm ²	mm	cm	kg	cm ²	kg/cm ²
0,000	0,000	0,0	20,3	0,0	0,000	0,000	0,0	20,3	0,000
0,640	0,064	17	20,3	0,837	0,64	0,064	35	20,3	1,724
1,270	0,127	30	20,3	1,478	1,27	0,127	57	20,3	2,808
1,910	0,191	42	20,3	2,069	1,91	0,191	70	20,3	3,448
2,540	0,254	51	20,3	2,512	2,540	0,254	84	20,3	4,138
3,180	0,318	60	20,3	2,956	3,18	0,318	96	20,3	4,729
3,810	0,381	63	20,3	3,103	3,810	0,381	105	20,3	5,172
5,080	0,508	74	20,3	3,645	5,080	0,508	116	20,3	5,714
7,620	0,762	81	20,3	3,990	7,620	0,762	132	20,3	6,502
10,160	1,016	100	20,3	4,926	10,160	1,016	150	20,3	7,389
12,700	1,27	116	20,3	5,714	12,700	1,270	176	20,3	8,670

Especialización Ingeniería de Pavimentos

CBR Arcilla Inorgánica + 20%

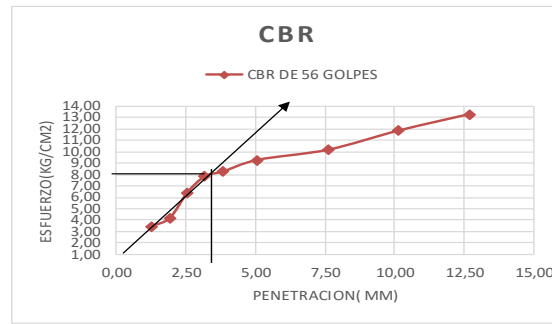
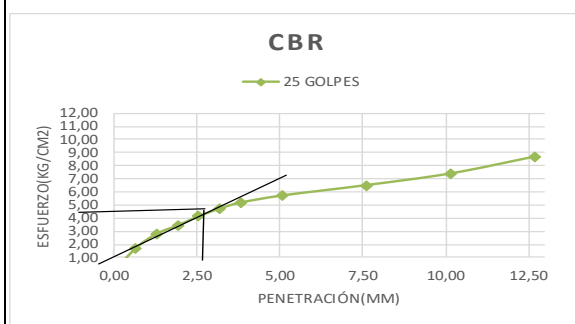
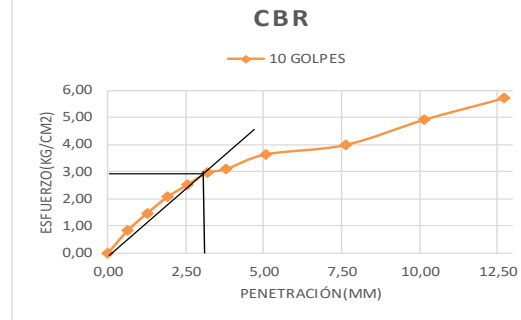
CBR MUESTRA NUMERO CON 20% ADICIÓN

PROYECTO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN LAS ARCILLAS TÍPICAS DE BOGOTÁ ESTABILIZADAS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD).

MATERIAL: ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD

CBR DE 56 GOLPES

PENETRACION	PENETRACION	CARGA	ÁREA	ESFUERZO
mm	cm	kg	cm ²	kg/cm ²
0,00	0,000	0,0	20,3	0,000
0,64	0,063	56	20,3	2,759
1,27	0,127	70	20,3	3,448
1,91	0,191	85	20,3	4,187
2,54	0,254	130	20,3	6,404
3,18	0,318	159	20,3	7,833
3,81	0,381	167	20,3	8,227
5,08	0,508	188	20,3	9,261
7,62	0,762	206	20,3	10,148
10,16	1,016	240	20,3	11,823
12,70	1,270	269	20,3	13,251



CURVAS DENSIDAD SECA Vs CBR

		10 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES		
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2,046	2,070	2,098		
HUMEDAD	%	17,4	16,1	17,4		
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1,743	1,784	1,787		
CBR		3,0	4,5	7,5	PESO VOLUMÉTRICO MÁX:	1,740 Kg/m ³
CBR(valor fijo)	70,31	4,3	6,4	10,7	HUMEDAD ÓPTIMA:	16 %
	HUMEDAD	PESO UNITARIO SECO	CBR %		CBR 100%	1,740 4,00
	12,2	1,71		4,3	CBR 95%	1,653 4,00
	16,7	1,74		6,4		
	22,0	1,59		10,7		
	27,8	1,42				

