

EVALUACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN UN MATERIAL GRANULAR
(SUB-BASE) CON ADICIÓN DE CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO

ADRIANA ELIZABETH FERNÁNDEZ MUÑOZ
OSCAR ORLANDO RODRIGUEZ RUBIO

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
BOGOTÁ D. C
2014

EVALUACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN UN MATERIAL GRANULAR
(SUB-BASE) CON ADICIÓN DE CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO

ADRIANA ELIZABETH FERNÁNDEZ MUÑOZ
OSCAR ORLANDO RODRIGUEZ RUBIO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil

HERMES ARIEL VACCA

Asesor Disciplinar

ROY W. MORALES PÉREZ

Asesor Metodológico

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

BOGOTÁ D. C

2014

NOTA DE ACEPTACIÓN

Observaciones

Firma Director Trabajo de Grado

Firma del Presidente Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, Mayo de 2015

Lograr este trabajo solo fue posible gracias a Dios que confabulo todo para que coincidieran los tiempos, momentos y espacios, a nuestras familias que nos apoyaron incondicionalmente con su paciencia y amor, y de especial manera al gestor y promotor de este proceso , el Ingeniero Hermes Vacca, por su impulso, confianza y fe en nosotros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen de manera muy especial al Ingeniero Hermes Ariel Vacca por su valiosa asesoría, orientación y experiencia durante el transcurso y desarrollo de investigación.

De igual forma a la Empresa Reciclados Industriales por su colaboración con la disponibilidad de concreto reciclado y a la Interventoría del proyecto Pomelo en su representación al señor Jhon Alexander Tabares Melo, por el suministro del material de cantera, usados en el proceso de este estudio, al Laboratorio de la Universidad Javeriana por permitir la realización de pruebas de laboratorio dentro de sus instalaciones y al personal por su asesoría, al laboratorio de la Universidad La Gran Colombia por sus aportes y ayuda.

A cuantos fueron partícipes de cada una de las etapas de este proceso, donde su colaboración aportó para lograr la consolidación del presente trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
2.	ANTECEDENTES	14
3.	HIPÓTESIS	16
4.	OBJETIVOS	17
4.1	OBJETIVO GENERAL.....	17
4.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	17
5.	JUSTIFICACIÓN	18
6.	MARCOS REFERENCIALES	22
6.1	MARCO CONCEPTUAL.....	22
6.2	MARCO JURÍDICO	28
7.	DISEÑO METODOLÓGICO	30
7.1	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	30
7.2	TIPO DE INVESTIGACION.....	31
7.3	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	33
7.4	FASES DE LA INVESTIGACIÓN.....	37
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	39
8.1	CARACTERIZACIÓN FISCO MECÁNICA DE LA SUB- BASE GRANULAR Y CONCRETO RECICLADO	39
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
10.	BIBLIOGRAFÍA	89
11.	ANEXOS	92

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1 CONCESIONES CARRETERAS, ANDI.	19
FIGURA 2 ACUMULACIÓN DE LA DEFORMACIÓN CON EL NÚMERO DE CICLOS	25
FIGURA 3 REPRESENTACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN SUELOS GRANULARES	26

LISTADO DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 PRUEBAS PARA HALLAR EL PORCENTAJE DE EQUIVALENTE DE ARENA.....	53
ILUSTRACIÓN 2 PRUEBAS PARA HALLAR EL VALOR DE AZUL DE METILENO	54
ILUSTRACIÓN 3 UNIDAD DE REGISTRO DE INFORMACIÓN Y UNIDAD DE APLICACIÓN DE CARGA Y UNIDAD DE REGULACIÓN DE PRESIÓN UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA.....	71
ILUSTRACIÓN 4 MATERIAL DOSIFICADO.....	73
ILUSTRACIÓN 5 PROCESO DE COMPACTACIÓN	74
ILUSTRACIÓN 6 MUESTRA COMPACTADA Y ENRASADA EN EL MOLDE.....	75
ILUSTRACIÓN 7 INICIO DE MONTAJE DE LA MUESTRA COMPACTADA EN CÁMARA TRIAXIAL.....	75
ILUSTRACIÓN 8 MUESTRA EN CÁMARA TRIAXIAL	76
ILUSTRACIÓN 9 FALLA DE ESPÉCIMEN EN CÁMARA TRIAXIAL	78

LISTADO DE TABLAS

TABLA 1 CORTANTES K1, K2, PARA MATERIALES GRANULARES.....	27
TABLA 2 RANGO DE K1, K2, PARA MATERIALES GRANULARES NO TRATADOS.....	27
TABLA 3 RELACIÓN DE ENSAYOS	29
TABLA 4 PROBETAS UTILIZANDO PORCENTAJES DE CONCRETÓ HIDRÁULICO RECICLADO	35
TABLA 5 VARIABLES DEPENDIENTES. CARACTERÍSTICAS Y POSIBLES COMPORTAMIENTOS MECÁNICOS DE LAS PROBETAS	36
TABLA 6 VARIABLES INDEPENDIENTES. ADICIONES DE CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO EN LA SUB-BASE GRANULAR.....	36
TABLA 7 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MATERIAL ORIGINAL POR TAMICES	41
TABLA 8 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MATERIAL ORIGINAL POR HIDRÓMETRO	41
TABLA 9 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MATERIAL ORIGINAL POR TAMICES.....	42
TABLA 10 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO (ARENA DE TRITURACIÓN) POR HIDRÓMETRO	43
TABLA 11 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO (GRAVA DE TRITURACIÓN)	44
TABLA 12 DOSIFICACIONES DE LOS MATERIALES	47
TABLA 13 VALORES TÍPICOS PARA $v_{D_{MAX}}$. PARA MATERIALES DE SUB-BASE GRANULAR	60
TABLA 14 CICLOS EJECUTADOS EN EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE PARA MATERIAL SBG-1.....	77
TABLA 15 RESULTADO DE LOS COEFICIENTES K1, K2 Y R2 DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	79
TABLA 16 RESUMEN ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE	81
TABLA 17 RESULTADO DE LOS COEFICIENTES K1, K2 Y R2 CORRESPONDIENTES AL PROMEDIO DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS....	82
TABLA 18 RESULTADOS COEFICIENTES PROMEDIOS PARA MR	82

LISTADO DE GRÁFICAS

GRÁFICO 1 ESTADO DE LA RED VIAL PAVIMENTADA 01-06 2014.....	21
GRÁFICO 2 ESTADO DE LA RED VIAL NO PAVIMENTADA 01-06 2014.....	21
GRÁFICO 3 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.....	33
GRÁFICO 4 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – MATERIAL ORIGINAL.....	42
GRÁFICO 5 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – ARENA DE TRITURACIÓN.....	43
GRÁFICO 6 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – GRAVA DE TRITURACIÓN.....	44
GRÁFICO 7 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – LIMITES ESPECIFICACIÓN SUB-BASE.....	45
GRÁFICO 8 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – LIMITES ESPECIFICACIÓN SUB-RASANTE.....	46
GRÁFICO 9 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – LIMITES ESPECIFICACIÓN BASE.....	46
GRÁFICO 10 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – DOSIFICACIÓN D1.....	48
GRÁFICO 11 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – DOSIFICACIÓN D2.....	48
GRÁFICO 12 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – DOSIFICACIÓN D3.....	49
GRÁFICO 13 CURVA DE FLUIDEZ MATERIAL ORIGINAL.....	52
GRÁFICO 14 CURVA DE COMPACTACIÓN – MATERIAL DE ORIGINAL.....	59
GRÁFICO 15 CURVA DE COMPACTACIÓN – DOSIFICACIÓN D1.....	60
GRÁFICO 16 CURVA DE COMPACTACIÓN – DOSIFICACIÓN D2.....	61
GRÁFICO 17 CURVA DE COMPACTACIÓN – DOSIFICACIÓN D3.....	61
GRÁFICO 18 CURVA DE COMPACTACIÓN – MATERIAL DE ORIGINAL Y DOSIFICACIONES.....	62
GRÁFICO 19 NOMOGRAMA DE RELACIONES DE FASE - CURVA DE COMPACTACIÓN – MATERIAL DE ORIGINAL Y DOSIFICACIONES.....	65
GRÁFICO 20 CURVA DE PENETRACIÓN VS EL ESFUERZO – MUESTRA ORIGINAL.....	66
GRÁFICO 21 CURVA DE PENETRACIÓN VS EL ESFUERZO – DOSIFICACIÓN D1.....	68
GRÁFICO 22 CURVA DE PENETRACIÓN VS EL ESFUERZO – DOSIFICACIÓN D2.....	68
GRÁFICO 23 CURVA DE PENETRACIÓN VS EL ESFUERZO – DOSIFICACIÓN D3.....	69
GRÁFICO 24 COMPARACIÓN: RELACIÓN DE SOPORTE CBR CON ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN.....	69
GRÁFICO 25 PROMEDIO INVARIANTE DE ESFUERZOS VS PROMEDIO MÓDULO RESILIENTE.....	80
GRÁFICO 26 VARIACIÓN DE MR PARA 2000 CICLOS DE CARGA.....	83
GRÁFICO 27 PROMEDIO INVARIANTE DE ESFUERZOS VS PROMEDIO MÓDULO RESILIENTE NORMALIZADO.....	84
GRÁFICO 28 COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE VS NÚMERO DE CICLOS DE CARGA.....	84
GRÁFICO 29 DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	85

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y el progreso de un país se basa en el mejora interna y continua, para lo cual la comunicación y la interacción de su gente es el principal motor, tener vías que acerquen y ayuden a la vinculación de poblaciones con sus costumbres, creencias y productos entre otros, es de gran influencia para construir un futuro. El presente trabajo tiene por objeto evaluar el módulo resiliente con la adición de concreto hidráulico reciclado, con el propósito de mejorar las capas granulares de la estructura del pavimento en las vías.

Teniendo en cuenta que el módulo resiliente es el parámetro más importante en el diseño de la estructura de pavimento y dado que está conformada por diferentes capas de material granular, las cuales están sometidas a disímiles cargas dinámicas, producidas por el flujo vehicular, la intensidad y el tiempo de uso para el cual fue diseñado, el desarrollo del presente trabajo se realizará en primer lugar con la caracterización de un material de cantera, sub- base granular, al igual que para el concreto hidráulico reciclado, con el fin de determinar la clasificación de los materiales y sus propiedades físico-mecánicas, se continua con el realización de ensayos y posterior análisis de datos, para evaluar el comportamiento mecánico del material sub – base, teniendo en cuenta esfuerzos aplicados y deformaciones resilientes.

Finalmente a través de la investigación experimental, se intenta dar respuesta al comportamiento del material con la obtención de datos de módulo resiliente en el material granular, sub- base con respecto a la adición en porcentajes de concreto hidráulico reciclado, mediante la conformación de diferentes curvas granulométricas buscando la reutilización de materiales de desecho y así mitigando el impacto ambiental generados por los escombros resultantes del proceso de construcción.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los problemas presentados en un vía provienen de diferentes causas, pero una de las más habituales, es el débil comportamiento de la estructura de pavimento, ya que esta se deteriora e inicia a presentar irregularidades superficiales que afectan la comodidad de quienes transitan por ella, dentro de lo que es una vía, la parte importante la conforma la estructura de pavimento, la cual contempla varios factores en el diseño, como el clima, el tránsito, la subrasante y los materiales, para que su funcionalidad y durabilidad sean de alta calidad y las vías desempeñen el papel primordial en el desarrollo de un país, la comunicación de personas, productos, etc.

Dentro de una estructura de pavimento, la conformación típica es una serie de capas granulares superpuestas, relativamente horizontales que se diseñan y se construyen técnicamente con materiales seleccionados y adecuadamente compactados; esta estructura dependerá significativamente de la capacidad del suelo de cimentación o comúnmente denominada subrasante, ya que en la medida que el desempeño tanto físico, como mecánico de las capas granulares sea de mejor calidad, la estructura del pavimento presentará una disminución en los espesores de estas capas, lo que significaría una optimización del diseño, que puede traducirse en reducción de costos. En el proceso de conformación de un pavimento se evalúan todos los materiales que formarán la estructura y medir la afectación que pueda sufrir por la aplicación de cargas al paso de vehículos y medidas a través de valores de Módulo Resiliente (MR), parámetro usado para calcular deformaciones por aplicación de esfuerzos verticales y de corte, buscando alcanzar valores que se traduzcan en un mejor desempeño en capacidad de carga del pavimento, evitando el deterioro temprano y generando calidad en estas capas granulares, la estabilización o mejoramiento mediante la adición de diferentes aditivos los cuales comúnmente corresponden a productos comerciales manufacturados que buscan aumentar el desempeño mecánico del

material, resulta importante en la medida que estas adiciones provengan de productos reciclados, buscando el aprovechamiento de escombros, residuos de construcción y demolición, como alternativa en el cuidado del medio ambiente, promoviendo procesos de construcción y desarrollo urbano sostenible.

Teniendo en cuenta lo anterior se genera el siguiente interrogante:

¿Cómo varía los valores de Módulo Resiliente (MR) en un material granular (sub-Base) con adición de concreto hidráulico reciclado?

2. ANTECEDENTES

En la evaluación de la estructura de pavimentos, el parámetro que mide el comportamiento físico-mecánico es el MR, el cual depende de múltiples factores entre ellos, la granulometría del material utilizado, el contenido de agua, la densidad seca y los esfuerzos a los cuales es sometido. Múltiples estudios se han realizado respecto a factores que influyen en el comportamiento y esta investigación busca mejorar el desempeño del material sub-base granular con la adición de concreto hidráulico reciclado, medidos a través de MR de la sub-base y lograr así optimizar el desempeño estructural de un pavimento.

A partir de estudios realizados anteriormente por otros investigadores el contenido de agua influye notablemente en el comportamiento del MR, “El MR para materiales granulares varía según la humedad y la saturación de sus partículas”¹, donde se realizaron variaciones de humedad partiendo de la humedad óptima en un material sub-base, con un “pre dimensionamiento de la estructura de pavimento es la metodología propuesta por el INVIAS (Instituto nacional de vías) en su carta de diseño para pavimentos flexibles con medios y altos volúmenes de tránsito”.², donde concluyeron “que el módulo tiene a disminuir a medida que aumenta la humedad con respecto a la óptima, y aumenta en el caso contrario”³

Así mismo, la investigación “The effects of recycled clay brick content on the engineering properties, weathering durability, and resilient modulus of recycled

¹ FONSECA A, J. GARCIA M, C. Análisis del comportamiento del módulo Resiliente con respecto a la variación del contenido de húmedas para un material sub-base granular tipo SBG-1 del área de Bogotá. Tesis de Grado Pontificia Universidad Javeriana. 2008. Pág. 107.

² Ibíd. Pág. 107.

³ Ibíd. Pág. 115.

concrete aggregate”⁴, el objeto de investigación se basó en la búsqueda del mejor comportamiento de una mezcla de material reciclado de demolición, llamado RCB y RCA, para que cumpliera con los requerimientos técnicos y ser usado como adición a un base sin consolidar para una estructura de pavimento, el proceso se realizó usando diferentes porcentajes de cada material y mezcla de los dos y luego ser sometidos a ciclos de humedecimiento y secado, variando la cantidad de ciclos y finalmente la medición del módulo resiliente. Llegando al resultado de que al adicionar (material arcilloso de escombros de construcción) RCB, aumenta la conductividad hidráulica, además que los ciclos de humedecimiento producen degradación en el material.

De igual manera estudios como “Deformación permanente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento”⁵, tiene como objeto presentar un estado del conocimiento sobre el comportamiento de los materiales granulares en las capas de pavimento y los factores que afectan la resistencia de en una estructura bajo la cargas cíclicas, con pruebas triaxiales cíclicas realizadas con presión de confinamiento constante sobre material granular, llegan a la conclusión que la deformación permanente depende del aumento de la magnitud de esfuerzo cíclico y disminución de la presión de confinamiento de manera proporcional y donde la amplitud del esfuerzo cíclico puede provocar que el material se comporte de manera diferente.

⁴ DIAGNE, M. TINJUM, J. NOKKAEW, K. The effects of recycled clay brick content on the engineering properties, weathering durability, and resilient modulus of recycled concrete aggregate. University of Wisconsin-Madison. Transportation Geotechnics 3 (2015) 15–23.

⁵ RONDON, H. REYES, F. Deformación permanente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento. Revista de Ingeniería Universidad de Medellín. Vol. 8 Junio 2009.

3. HIPÓTESIS

Al adicionar concreto hidráulico reciclado en porcentajes a una Sub-Base granular, éste puede cambiar su resistencia, influyendo en el comportamiento mecánico de la estructura de pavimento.

El uso de materiales reciclados para reforzamiento de la Sub-Base granular, puede hacer que una estructura de pavimento sea más segura y que mitiguen el deterioro de la misma.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer la variación del módulo resiliente en un material granular (sub-base) con adición de concreto hidráulico reciclado.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar el MR en un material granular (Sub-Base) para diseñar la estructura del pavimento.
- Determinar el MR para muestras de material granular (Sub-Base) con adición de concreto hidráulico reciclado para mejorar la estructura del pavimento.
- Comparar la variación de MR en un material granular (Sub-Base) con adición de concreto hidráulico reciclado, con respecto al material granular (Sub-Base).

5. JUSTIFICACIÓN

“El Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 ‘Prosperidad para todos’ – PND – reconoce la infraestructura de transporte como una locomotora estratégica de crecimiento, que genera empleo, dinamiza la economía a través de sus encadenamientos con actividades conexas, aumenta la productividad, fortalece la competitividad en los mercados internacionales, mejora la disponibilidad, calidad y precio de los bienes y servicios, disminuye los costos de transporte y genera un impacto social y regional.”⁶

“La red vial primaria a cargo de la nación cuenta con 16.700 km., aproximadamente, de los cuales cerca de 1.204 Km., son doble calzada, los cuales se encuentran concentrados en Cundinamarca, Boyacá, Valle del Cauca, los departamentos cafeteros y la costa atlántica, sin embargo, las vías que conectan los grandes centros de producción y consumo con los principales puertos y con las fronteras aun no cuentan con la infraestructura adecuada para movilizar los flujos vehiculares actuales. Adicionalmente, se evidencia un déficit en la capacidad vial para conexiones intermunicipales en ciudades de la importancia de Medellín, Bucaramanga y Cúcuta”⁷

Por política gubernamental se ha planteado la construcción de vías llamadas de cuarta generación (4G) que pretenden alcanzar la suficiente capacidad, comodidad y seguridad, no solo en búsqueda de movilidad y competitividad de producción en el país, sino también en miras a la integración regional, brindando

⁶ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. DNP. Consejo Nacional de Política Económica y Social. Documento CONPES 3761. Cuarta generación de concesiones viales. Proyectos pioneros. 2013.

⁷ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. DNP. Consejo Nacional de Política Económica y Social. Documento CONPES 3760. Proyectos viales bajo el esquema de Asociaciones Privadas: Cuarta generación de concesiones viales. 2013.

una excelente calidad de la infraestructura vial, por ende disminución en los tiempos de recorrido. En la Figura 1 Concesiones carreteras, ANDI., se identifica la proyección del País de acuerdo a la Agencia Nacional de infraestructura en cuento a crecimiento en la red de la infraestructura vial.

Figura 1 Concesiones carreteras, ANDI.



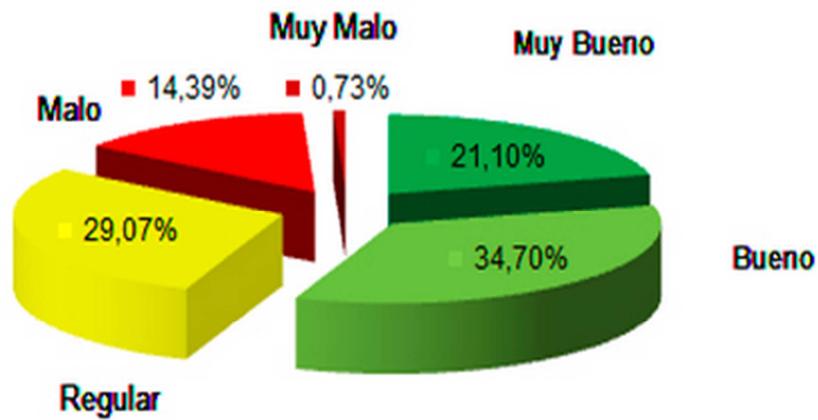
Fuente: Agencia Nacional de infraestructura. Cuarta Generación de Concesiones en Colombia

En proyectos de infraestructura vial, mejorar la capacidad y el nivel de servicio de la malla se traduce en un progreso en la política económica de un país, porque genera desarrollo interno. Propuestas que ayuden a que la estructura de una vía sea más sostenible en movilidad, durabilidad y tiempo de servicio, ya sea implementando nuevas técnicas o tecnologías, procesos, materiales, será una contribución adicional para la optimización de recursos y en lo posible mitigación del impacto ambiental en los proyectos definidos como de 4G, traducidos en 8170 Km de vías en proceso de construcción a lo largo y ancho del territorio colombiano, que corresponde aproximadamente a un incremento del 50% de la malla actual, lo que redunda en competitividad para Colombia.

Para establecer el comportamiento de los materiales empleados en las capas granulares es relevante adelantar pruebas de laboratorio donde se evidencia el desempeño de cada uno de estos. Uno de los parámetros fundamentales corresponde a la relación de soporte de California (CBR) el cuál comúnmente permite a partir de este valor utilizar correlaciones para obtener finalmente el valor de MR del material, que corresponde a la relación de las tensiones generadas por una carga vertical cíclica aplicada y las deformaciones recuperables; permitiéndole al diseñador dimensionar la estructura del pavimento. Hoy en día la obtención del MR puede ser más aproximada a las condiciones reales del pavimento, que pueden ser cíclicas y no monotónicas como lo estima el ensayo de CBR. Estas pruebas son realizadas en equipos triaxiales dinámicos que permiten variaciones del estado tensional en la muestra simulando condiciones reales del pavimento.

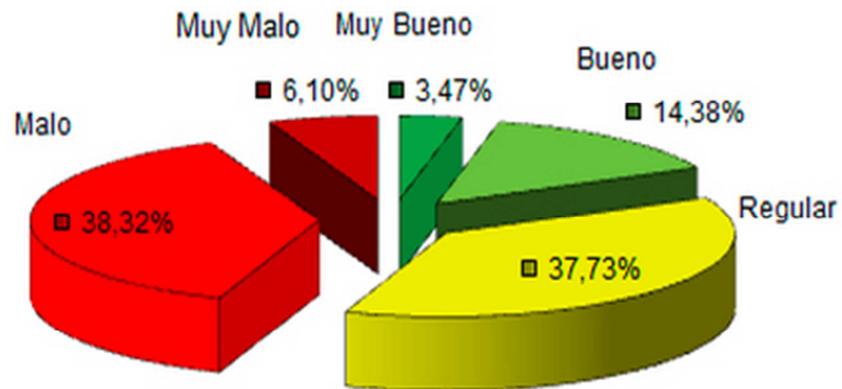
Este trabajo pretende determinar el comportamiento mecánico mediante pruebas de laboratorio y en particular mediante la ejecución del ensayo de MR para un material granular definido como material de sub-base granular en esta investigación. Estas pruebas serán realizadas bajo los lineamientos correspondientes a la normatividad del Instituto Nacional de vías 2013, presentando como alternativa la adición de diferentes porcentajes de adición de concreto hidráulico reciclado al material granular, buscando la reutilización de materiales y mitigando el impacto ambiental producto de este tipo de desechos de la construcción.

Gráfico 1 Estado de la red vial pavimentada 01-06 2014.



Fuente: Ministerio de Transporte – Instituto Nacional de Vías - INVIAS Julio 2014.

Gráfico 2 Estado de la red vial no pavimentada 01-06 2014.



Fuente: Ministerio de Transporte – Instituto Nacional de Vías - INVIAS Julio 2014.

6. MARCOS REFERENCIALES

6.1 MARCO CONCEPTUAL

6.1.1 Pavimento

Es una superficie artificial, superestructura sobre una fundación, “la cual proporciona condiciones de estabilidad y rigidez en un determinado terreno”⁸, para que el piso este sólido y sirva de circulación de personas o vehículos.

Existen varias formas de construir un pavimento el cual se puede determinar según su uso, si es solo para tráfico de personas, de vehículos, el tipo de vehículos, las cargas que tenga que soportar, etc.

6.1.2 Estructura de pavimento

“En nuestro medio los pavimentos se clasifican en: pavimento flexible, semi rígido, semiflexible, rígidos, articulados”⁹ esté está conformado por capas, de la superficie hacia el terreno de fundación

6.1.2.1 Superficie de rodamiento

Es una capa de rodadura o revestimiento, “la capa debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito”¹⁰.

⁸ MONTEJO F., A., Ingeniería de pavimentos para carreteras. 2° edición. Bogotá D.C. 1998. Pág.1

⁹ Ibid. Pág. 2

¹⁰ Ibid. Pág. 4

La función de la capa de rodadura es impermeabilizar el pavimento, para que las capas inferiores mantengan su capacidad de soporte, proveer “resistencia, a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento”¹¹.

6.1.2.2 Base

La base se encuentra bajo la capa de rodadura del pavimento, esta capa debe soportar altas presiones por lo tanto debe tener buena resistencia a la deformación. “La función de la base consiste en proporcionar un elemento que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada”¹².

6.1.2.3 Sub-base

La sub base es una “capa que esta sobre el terreno natural está sometida a menores tensiones, pero su capacidad de soporte debe ser mayor a la del terreno natural, debe ser altamente resistente a la erosión por estar en contacto con el suelo y prevenir el bombeo”¹³, se utiliza para reducir el espesor de la capa base.

6.1.2.4 Suelo compactado

Es el suelo del terraplén, escarificada a cierta profundidad y compactado para alcanzar una resistencia mínima de soporte, “es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a resistencia como a las eventuales variaciones de volumen”¹⁴.

¹¹ Ibid. Pág. 5

¹² Ibid. Pág. 5

¹³ Ibid. Pág. 5

¹⁴ Ibid. Pág. 5

6.1.3 Cargas

El peso de los ejes de los vehículos que transitan por una vía, imparten unas cargas transmitidas a través de los neumáticos, “espectros de carga se calculan usualmente para cada tipo de eje: sencillo dual, tándem y tridem. Se definen como la relación entre el número de ejes con cierto rango de carga y el número total de ese tipo de eje, expresado en porcentaje”¹⁵

Estas cargas son de tipo dinámico y cíclico, varían en intensidad, frecuencia y duración representadas por los vehículos en constante movimiento, durante el proceso de carga “el suelo presenta una deformación total equivalente a la carga soportada, una deformación permanente y una recuperada; esta última expresada unitariamente (ϵ_r), se utiliza en la determinación del módulo resiliente en pruebas de laboratorio, al relacionarla con el esfuerzo desviador (σ_d),”¹⁶

6.1.4 Módulo resiliente (MR)

Es la respuesta del suelo bajo cargas dinámicas de las ruedas que imparten a todas las capas del pavimento, el pavimento sufre una deflexión, en periodos de tiempo cortos que van en función de la velocidad del vehículo y cuando el pavimento es sometido a esas cargas cíclicas y alcanza un valor constante, donde la tensión desviadora axial repetida y la deformación axial son recuperables, bajo una zona elástica supuesta.

¹⁵ GARNICA, P. Espectros de carga y diseño para pavimentos. Sociedad Mexicana de ingeniería geotécnica. Pág. 15

¹⁶ VIDAL, J., OSORIO, R, Comportamiento resiliente de suelos fino granulares. Revista Universidad EAFTI. 2006. Pág. 94.

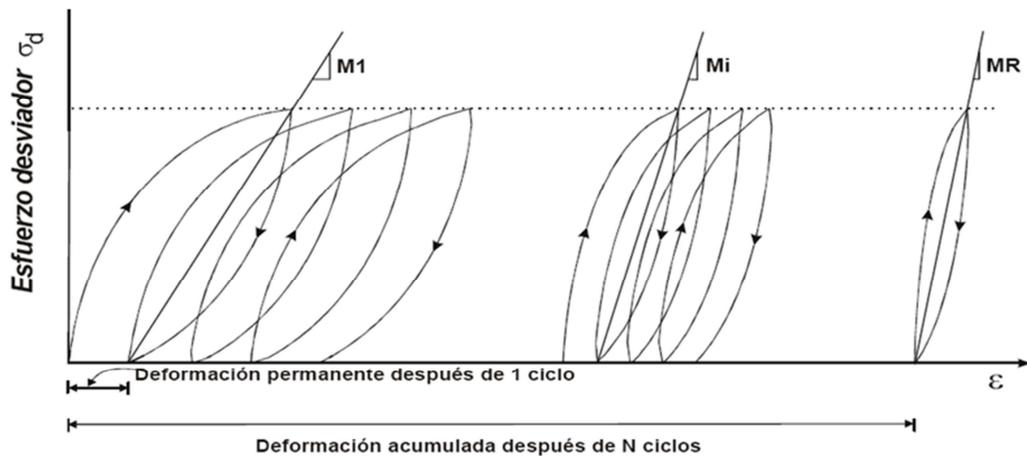
Se obtienen dos valores, uno instantáneo y uno total, debido a que se registran deformaciones durante el ciclo de carga y el otro al terminar el periodo de relajación.

La caracterización de material granular, sub-sabe para capa de pavimento determinan la resistencia mecánica, la durabilidad, textura, estabilidad química, adherencia, la caracterización proporciona las especificaciones mínimas con las que debe cumplir para ser catalogada como sub-base granular.

“Cálculo de módulo resiliente matemáticamente se define como la relación existente entre esfuerzo desviador aplicado y la deformación axial recuperable después de realizar pruebas de carga repetidas en cámara triaxial dinámica”¹⁷.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

Figura 2 Acumulación de la deformación con el número de ciclos



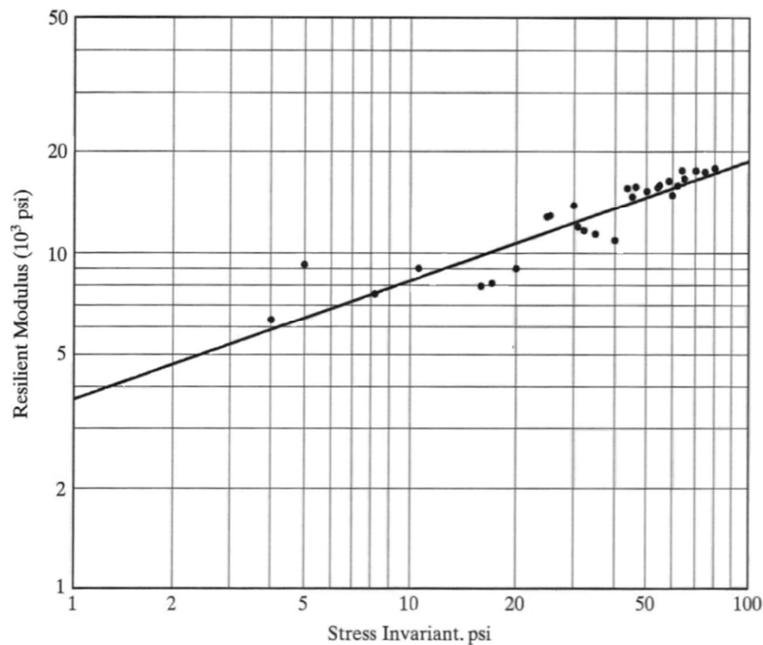
Fuente: GARNICA, P. Espectros de carga y diseño para pavimentos

¹⁷ LEAL NORIEGA, M. Relación del módulo resiliente hallado por retro cálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio. Universidad Nacional de Colombia. 2010. Pág. 17.

6.1.4.1 Módulo resiliente en suelos granulares

Para suelos granulares, se realiza un gráfico logarítmico del módulo resiliente en función de la invariante de esfuerzos. La gráfica 2.3 es una representación idealizada que debe tener el módulo resiliente en materiales granulares.

Figura 3 Representación del Módulo Resiliente en suelos granulares



Fuente: Huang , 2004¹⁸

La invariante de esfuerzos es la suma de los esfuerzos principales:

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (2)$$

Como en el laboratorio, los esfuerzos σ_2 y σ_3 son iguales, y el esfuerzo desviador se define por la resta de σ_1 y σ_3 , la sumatoria de esfuerzos principales se define finalmente como:

$$\theta = \sigma_d + 3\sigma_3 \quad (3)$$

¹⁸ HUANG, Y. Pavement analysis and design 2da ed. New Jersey, USA : Parson Hall, 2004.

Para los suelos granulares, el comportamiento del módulo resiliente está dado por la siguiente ecuación:

$$M_r = K_1 \theta^{K_2} \quad (4)$$

Dónde:

M_r = Módulo resiliente

θ = Invariante de esfuerzos

K_1 , K_2 = Constantes del material

Estudios realizados por Rada y Witczak (1981), indican cuales deben ser las constantes K_1 y K_2 para varios tipos de materiales granulares. La tabla 2.5 muestra los resultados de este estudio:

Tabla 1 Cortantes K_1 , K_2 , para materiales granulares

Tipo de material	N° de datos	K1 (MPa)		K2	
		Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Arena Limosa	8	11,17	0,54	0,62	0,13
Grave arenosa	37	30,89	29,65	0,53	0,17
Arena - Grava	78	30,00	18,13	0,59	0,13
Roca Triturada	115	49,70	51,64	0,45	0,23

Fuente: Garnica, 2002 19

Otros valores para las constantes K_1 y K_2 para materiales granulares no tratados se presentan en la tabla 2

Tabla 2 Rango de K_1 , K_2 , para materiales granulares no tratados

¹⁹ GARNICA, P. GÓMEZ, J. SESMA, J. Mecánica de Materiales para pavimentos. Publicación técnica N.197 del Instituto Mexicano de Transporte IMT 2002. Pág. 84.

Referencias	Materiales	K1 (MPa)	K2
Hicks (1970)	Grava parcialmente triturada, roca triturada	11,03 - 34,48	0,57 - 0,73
Hicks y Finn (1973)	Base no tratada, tramo de prueba (San Diego)	14,48 - 37,23	0,61
Allen (1973)	Grava, roca triturada	12,41 - 55,16	0,32 - 0,70
Kalcheff y Hicks (1973)	Roca triturada	27,58 - 62,06	0,46 - 0,64
Boyce (1976)	Caliza triturada bien gradada	55,16	0,67
Monismith y Witczak (1980)	Materiales de base y subbase en servicio	20,00 - 53,44	0,46 - 0,65

Fuente: Garnica, 2002 20

6.2 MARCO JURÍDICO

Artículo 300-07 “DISPOSICIONES GENERALES PARA LA EJECUCIÓN DE AFIRMADOS, SUBBASES GRANULARES Y BASES GRANULARES Y ESTABILIZADAS”

Establece las especificaciones generales del material usado para afirmados, subbases y bases granulares; la procedencia, tipo de trituración, resistencia, durabilidad, limpieza, disposición granulométrica.

²⁰ GARNICA, P. GÓMEZ, J. SESMA, J. Mecánica de Materiales para pavimentos. Publicación técnica N.197 del Instituto Mexicano de Transporte IMT 2002. Pág. 84.

Tabla 3 Relación de ensayos

Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo - agregado	INV E 122-13
Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos	INV E 123-13
Determinación del límite líquido de los suelos	INV E 125-13
Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	INV E 126-13
Equivalente de arena de suelos y agregados finos	INV E 133-13
Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños menores a 37.5mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles	INV E 218-13
Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños mayores a 19mm (3/4") por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles	INV E 219-13
Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción en agregado fino	INV E 222-13
Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción en agregado grueso	INV E 223-13
Valor de azul de metileno en agregados finos	INV E 235-13
Relaciones de humedad – masa unitaria seca en los suelos (ensayo modificado de compactación)	INV E 142-13
CBR de los suelos compactados en el laboratorio sobre muestra inalterada	INV E 148-13
Módulo resiliente de suelos y agregados	INV E 156-13

Fuente: Propia

7. DISEÑO METODOLÓGICO

7.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se desarrolló bajo el enfoque cuantitativo, dado que se hace una recolección de datos con los cuales se pretende probar una hipótesis, a través de una medición numérica, estableciendo el comportamiento del fenómeno evaluado. Para esta investigación se pretende cuantificar la variación de MR en una sub-base granular con adición de concreto hidráulico reciclado, teniendo el valor inicial del MR de la sub base granular y evaluando el cambio que puede tener con adición propuesta en porcentajes, si aumenta o disminuye o su comportamiento no varía.

La delimitación del objeto de investigación, con lo cual se permita determinar que se va a medir, dando un control en la recolección de los datos y serán representados por números, lo cual no permite ninguna especulación, sino que siga un patrón predecible en cuanto a lo obtenido, generalizando resultados por grupos de acuerdo a las muestras estudiadas, los datos deben tener validez, confiabilidad para llegar a una conclusión la cual depende de lo presentado en el proceso de cálculo, sin la explicación de cómo se llega a esa realidad.

La investigación parte de teorías ya existentes, las cuales pueden ser sometidas al mejoramiento del conocimiento por medio de nuevos procedimientos, métodos y materiales. De esta manera nace la idea de evaluar la efectividad de los materiales reciclados adicionándolos en la Sub-Base granular como un sistema de refuerzo mejoría para el MR.

Utilizando el diseño de experimentación adecuada al enfoque cuantitativo, se brinda la posibilidad de evaluar puntos específicos de fenómenos tales como:

- Determinación de la resistencia de los materiales, (Concreto Hidráulico y material Granular)
- Determinar el porcentaje que se requiere para un adecuado diseño de adición en el material granular
- Determinación de las características mecánicas

El procedimiento que se lleva a cabo, es hipotético-deductivo, teniendo como pasos esenciales:

- Derivación de hipótesis basada en teorías ya existentes sobre el fenómeno de estudio.
- Diseño de investigación desarrolla el procedimiento para evaluar la efectividad de la sub-base granular con adición de concreto hidráulico reciclado, el cual consiste en someter a procesos experimentales el material compuesto por separado y como un sistema reforzamiento estructural, evaluar los diseños y corroborar los valores de módulo resiliente, de acuerdo con la normas de vigentes.
- Concluido el proceso experimental de evaluación de Modulo resiliente, se espera establecer la viabilidad y la conveniencia de la utilización de adición de concreto hidráulico reciclado a la Sub-Base granular.

7.2 TIPO DE INVESTIGACION

El proceso de investigación de tipo correlacional, el cual busca la determinación de causa efecto, comprobar por medio de ensayos triaxial, si el módulo resiliente aumenta, disminuye o no incide con la adición de concreto hidráulico reciclado, para ver si efectivamente es una alternativa viable y/o recomendable para el refuerzo de la estructura del pavimento dentro del sistema constructivo.

Este tipo de investigación permite establecer comparaciones, por lo que el diseño experimental será calculado inicialmente sin adición de material reciclado y posteriormente con la adición de concreto hidráulico reciclado en diferentes porcentajes, para demostrar un adecuado desempeño de todo el sistema.

Los resultados se deben organizar de manera estadística (tablas, gráficos), de modo comparativo y determinar si la adición de concreto hidráulico reciclado en Sub-Bases granulares es una alternativa viable y/o recomendable para el diseño de pavimentos.

7.2.1 Caracterización físico mecánica del material

Los materiales empleados en el proceso de investigación, la sub-base granular y el concreto hidráulico reciclado deben ser caracterizados bajo las normas estipuladas por INVIAS requeridas para este tipo de materiales.

7.2.2 Grupo de control

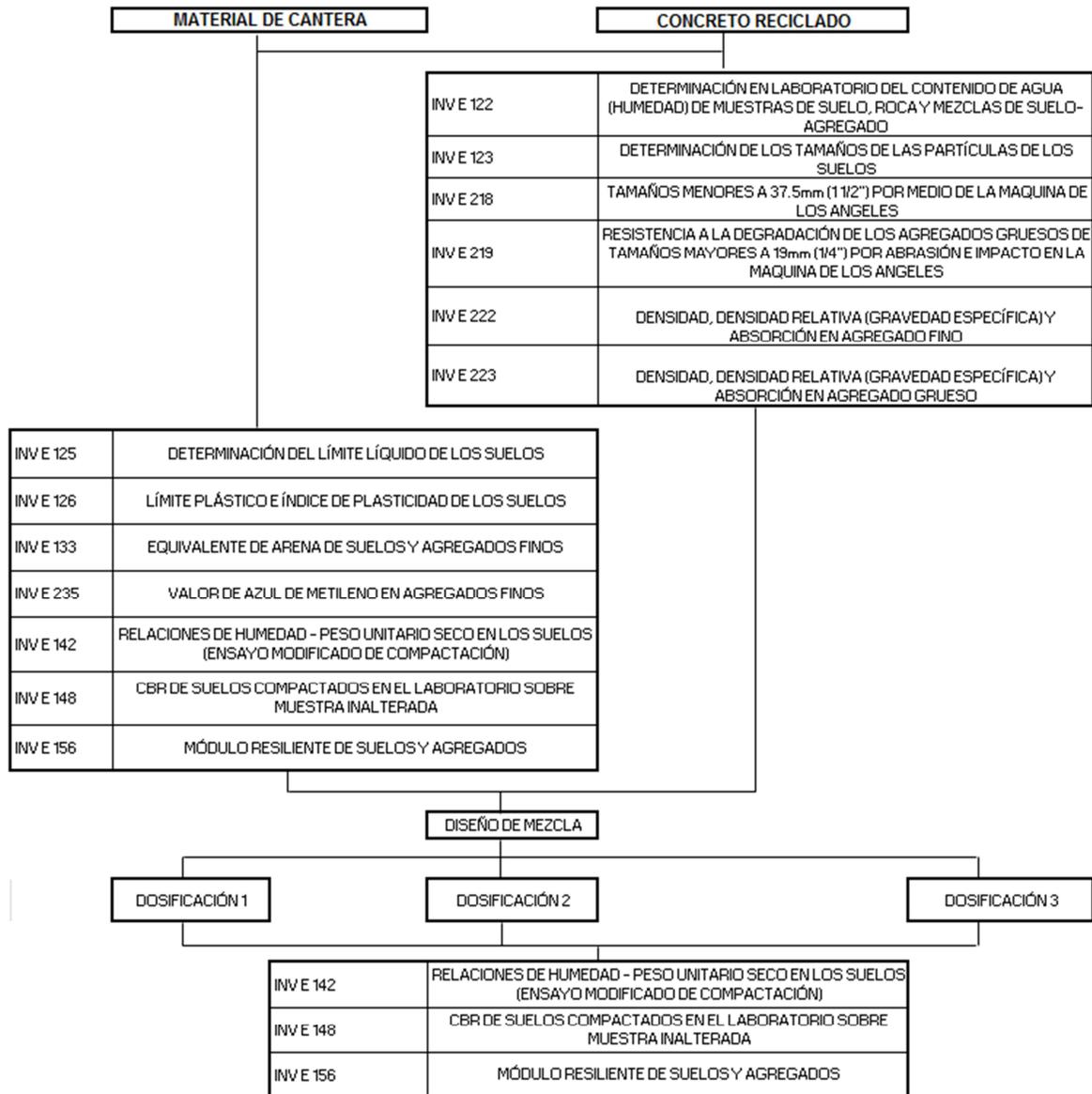
Se construirán 12 probetas para el desarrollo de la investigación, de las cuales tres no llevarán adición de concreto hidráulico reciclado, con el fin de hacer verificable las alteraciones que dicho reforzamiento pueda generar en la evaluación de módulo resiliente para el diseño de pavimentos.

7.2.3 Grupo experimental

Las probetas restantes serán manipuladas con el fin de reforzarlas con adición de concreto hidráulico reciclado, de ellas el 50% tendrá una adición con concreto reciclado variando su porcentaje, y el 50% restante, servirá para determinar cuál sería la mejor opción para este reforzamiento.

7.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Gráfico 3 Desarrollo de las pruebas de laboratorio



Fuente Propia

Debido a las características de la experimentación que requiere dar respuesta a la pregunta de investigación ¿Cómo varía el Módulo Resiliente en un material

granular (sub-Base) con adición de concreto hidráulico reciclado? se hace obligatorio emplear la técnica de análisis de resultados.

Tanto en la recolección de datos obtenidos durante los ensayos realizados, como el seguimiento e inspección del proceso de elaboración de probetas y de adición de porcentajes de concreto hidráulico reciclado, hacen parte del grupo de control y experimental donde debe garantizarse cada uno de los aspectos que puedan afectar la obtención de datos veraces que se encuentren dentro de los parámetros establecidos.

La elaboración de probetas se hará mediante la adición manual de porcentajes diferentes de concreto hidráulico reciclado. Se realizará experimentación de laboratorio, para lo cual las probetas se reforzarán con diferentes porcentajes de adición de concreto reciclado.

La ejecución de los ensayos realizados en las probetas serán realizados con el equipo Triaxial, para lograr determinar los valores de Modulo Resiliente de cada probeta con su respectivo porcentaje de adición de concreto hidráulico.

La observación se realizará controlando los sistemas compuestos de concreto hidráulico reciclado, mediante formatos predefinidos que se relacionan a continuación, lo que permitirá llevar un registro confiable del fenómeno observado.

7.3.1 Variables

Dentro de las características de estudio a la Sub-Base granular adicionando concreto hidráulico reciclado, las variables dependientes como la resistencia a la compresión y deformación, que hacen parte del grupo de control y del grupo experimental respectivamente, proporcionan información que se recolecta en los formatos pertinentes, en estos se evidencian las variables intervinientes dentro de la experimentación.

En principio dichas variables deben cuantificarse y en consecuencia establecer valores que permitan comparar los resultados obtenidos en los ensayos realizados. Se espera que estos valores varíen en función de las distintas adiciones para cada probeta en particular, considerando estas como variables independientes.

7.3.2 Operacionalización de variables

La información generada por el equipo será relacionada mediante formatos creados por el grupo de investigación que se encargará de la recolección de datos que facilitarán el posterior procesamiento de análisis de las hojas de cálculo para fines estadísticos y comparativos por medio de software para análisis como Excel. Para dicha investigación se propone adicionar diferentes porcentajes de material de concreto hidráulico reciclado a un material de sub-base granular como se presenta en la tabla 4.

Tabla 4 Probetas utilizando porcentajes de concreto hidráulico reciclado

PROBETA	A	B	C	D
PORCENTAJE ADICIONAL	---	3%	6%	9%
NUMERO DE PROBETAS	3	3	3	3

Fuente: Propia

A continuación en la tabla 5 y 6 se presenta las diferentes variables dependientes e independientes que se esperan obtener con la experimentación según el esfuerzo desviador la resistencia y la deformación axial con los diferentes dosificaciones empleadas en dicha investigación.

Tabla 5 Variables dependientes. Características y posibles comportamientos mecánicos de las probetas

VARIABLES DEPENDIENTES		
Características y comportamientos mecánicos de las probetas		
VARIABLE	INDICADOR VARIABLE	
Módulo Resiliente	$\sigma d / \epsilon r$ (Mpa)	Nivel
		Bajo
		Medio
		alto
Resistencia a la compresión confinada	σd (Kpa)	Nivel
		Bajo
		Medio
		alto
Deformación axial sin llegar a la falla	%	Nivel
		Bajo
		Medio
		alto

Fuente: Propia

Tabla 6 Variables independientes. Adiciones de concreto hidráulico reciclado en la Sub-Base granular

VARIABLES INDEPENDIENTES	
VARIABLE	INDICADOR VARIABLE
Nivel de comportamiento mecánico	
Sin adición de concreto hidráulico reciclado	Bajo
Con adición de concreto hidráulico reciclado (9%)	Alto
Con adición de concreto hidráulico reciclado (3-6%)	Medio - alto

Fuente: Propia

7.4 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

En el siguiente ítem se expondrá las etapas que permiten al investigador aplicar el diseño metodológico, se enumerará las fases que abarcan por completo los objetivos específicos.

El material usado en el proyecto, será suministrado por la empresa Reciclados Industriales, la sub base granular es material de cantera y el concreto hidráulico después del proceso de reciclado.

7.4.1 Fase I: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA SUB- BASE GRANULAR

- Determinación del contenido de agua
- Determinación límite líquido
- Límite plástico e índice de plasticidad de suelos
- Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos
- Relaciones de humedad – masa unitaria seca en los suelos

7.4.2 Fase II: PROCESO CARACTERIZACIÓN CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO

- Determinación del contenido de agua
- Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos

7.4.3 Fase III: EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

- Ensayo Modulo resiliente a la probeta construida con sub-base granular y la primera propuesta de porcentaje de concreto hidráulico reciclado.
- Ensayo Modulo resiliente a la probeta construida con sub-base granular y la segunda propuesta de porcentaje de concreto hidráulico reciclado.

- Ensayo Modulo resiliente a la probeta construida con sub-base granular y la tercera propuesta de porcentaje de concreto hidráulico reciclado.
- Ensayo Modulo resiliente a la probeta construida con sub-base granular y la cuarta propuesta de porcentaje de concreto hidráulico reciclado.
- Análisis de datos de las probetas sometidas a ensayo triaxial
- Proponer un porcentaje adecuado de acuerdo a los datos obtenidos como un valor óptimo para el mejoramiento de la sub-base
- Ensayo Modulo resiliente a la probeta construida con sub-base granular con el porcentaje optimo obtenido del análisis de resultados para comprobación de módulo resiliente en las probetas restantes.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA DE LA SUB- BASE GRANULAR Y CONCRETO RECICLADO

La caracterización del material esta basada por las Normas INVIAS 2013, se empleó un material de sub-base granular tipo SBG-1, que será denominado a lo largo de este documento como **material original**, el cual fue extraído de la cantera Tequia, ubicada en la localidad de Soacha.

El Concreto hidráulico reciclado fue suministrado por la empresa Reciclados Industriales. Es estos, se emplearon dos tamaños de material reciclado para el estudio, un material grueso el cual se denomina **grava de trituración** y un material fino denominado **arena de trituración**.

A los materiales se les realizó ensayos de laboratorio para la clasificación de acuerdo a la normatividad Nacional del Instituto nacional de Vías, en el orden que se dispone a continuación.

8.1.1 Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de SUELO –AGREGADO.

El ensayo corresponde a la Norma INV E 122 – 2013, (Ver anexo 1), con el cual se determina la cantidad de agua por partículas de suelo, en su procedimiento según lo estipulado por la norma, llevando una porción de material húmedo al horno a una temperatura de 110°C hasta que seque, donde la pérdida de masa sufrida por el material corresponde a contenido de agua y se debe calcular haciendo una relación del material húmedo y seco teniendo en cuenta la masa del agua y será dado en porcentaje.

Resultados

HUMEDAD INICIAL	UNIDAD	VALOR MEDIDO
Material original		3.3
Grava de trituración	%	1.1
Arena de trituración		2.8

8.1.2 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos

El ensayo corresponde a la Norma INV E 123 – 2013, (Ver anexo 2), con el cual se determina la granulometría de los materiales de manera cuantitativa sobre los tamaños del material el cual será utilizado como agregados para carretera correspondiente a SGB-1, los resultados serán comparados con los límites exigidos para el cumplimiento de los requerimientos de las especificaciones, “los tamaños mayores a 75 μ m (retenidas en el tamiz No.200) se determinan por tamizado, mientras que la distribución de los tamaños de las partículas menores de 75 μ m se determinan por un proceso de sedimentación empleando un hidrómetro.²¹

El análisis se realiza en la serie de tamices y tamaños de partículas estipulados en la especificación correspondiente, así mismo, la extracción y posterior selección de la muestra representativa a ensayar fue seleccionada de la manera descrita por la norma I.N.V.E 202-13²², con el cual se determinó un tamaño máximo nominal del agregado (50.0 mm), se procedió a extraer una muestra representativa de aproximadamente 20 kg, establecida de acuerdo a la norma ya mencionada.

²¹ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E -123 -13. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos, 2013.

²² INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E -202 -07. Reducción de muestras de agregados por cuarteo, 2013.

Resultados

Tabla 7 Análisis granulométrico material original por tamices

ABER. DEL TAMIZ (mm) (pulg)		Masa Retenida	% Retenido acumulado	(%) PASA
76.1	3	0	0%	100%
64	2 1/2	0	0%	100%
50.8	2	0	0%	100%
38.1	1 1/2	480.6	7%	93%
25.4	1	730.5	16%	84%
19	0.75	409.8	22%	78%
9.5	0.375	936.8	34%	66%
4.8	No. 4	734	44%	56%
2	No. 10	512.1	51%	49%
0.85	No.20	7.5	0%	46%
0.425	No. 40	3.74	0%	44%
0.25	No. 60	5.85	7%	42%
0.106	No. 140	32.7	10%	28%
0.075	No. 200	13.5	15%	22%

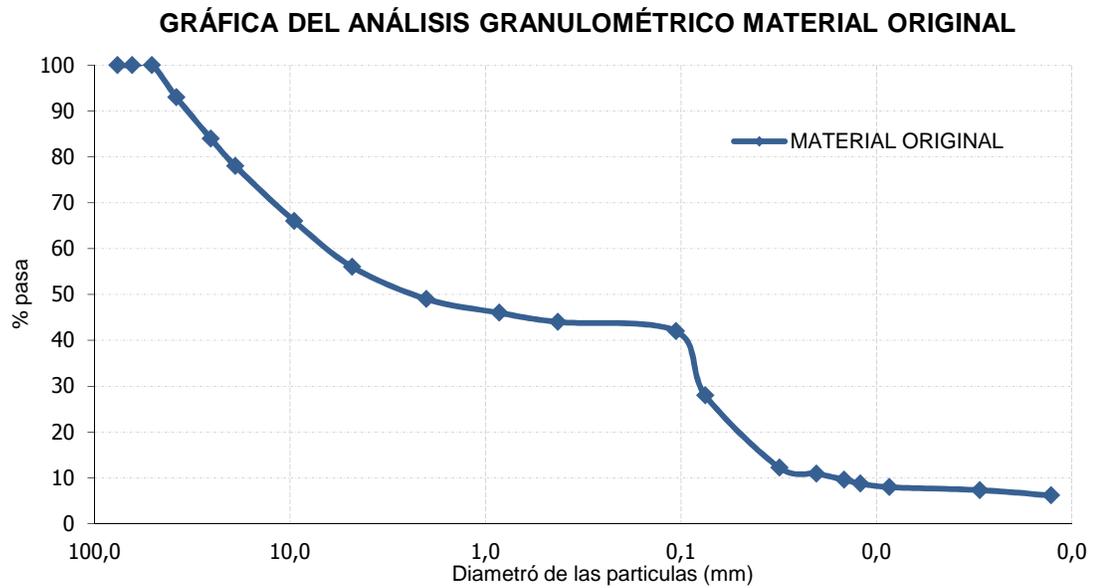
Tabla 8 Análisis granulométrico material original por hidrómetro

Hidrómetro: <u>152-H</u>								
Temperatura (°C) <u>21.7</u> Ct (g/cm ²) <u>0.5</u> Lectura del Hidrómetro en agua con defloculante <u>6</u>								
Periodo de sedimentación t (min)	Temperatura (°C)	Corrección por temperatura (Ct)	Lectura del Hidrómetro	K	L (cm)	Diámetro Partículas (mm) $D = K \sqrt{\frac{L}{t}}$	(% De suelo en suspensión (P))	% Totales Pasantes (P1)
			R (g/l)					
2	21.1	0.3	34	0.01354	10.7	0.03131	24.42	12.21
5	21.2	0.3	31	0.01352	11.2	0.02023	21.81	10.91
10	21.4	0.4	28	0.01349	11.7	0.01459	19.23	9.62
15	21.5	0.4	26	0.01347	12.0	0.01205	17.50	8.75
30	22.3	0.7	24	0.01335	12.4	0.00858	15.97	7.99
250	23.9	1.2	22	0.01309	12.7	0.00295	14.69	7.35
1440	21.9	0.6	20	0.01341	13.0	0.00127	12.35	6.17

Fuente: Tomado norma INV E 123-13

Fuente: Tomado norma INV E 123-13

Gráfico 4 Representación gráfica del análisis granulométrico – material original



Fuente: Propia

Tabla 9 Análisis granulométrico material original por tamices

ABER. DEL TAMIZ (mm)	(pulg)	Masa Retenida	% Retenido acumulado	(%) PASA
76.1	3	0	0.00%	100%
64	2 1/2	0	0.00%	100%
50.8	2	0	0.00%	100%
38.1	1 1/2	0	0.00%	100%
25.4	1	0	0.00%	100%
19	0.75	0	0.00%	100%
9.5	0.375	0	0.00%	100%
4.8	No. 4	185.61	15.40%	85%
2	No. 10	317.45	41.76%	58%
0.85	No.20	27.44	0.00%	42%
0.425	No. 40	21.13	0.00%	30%
0.25	No. 60	16.37	27.44%	20%
0.106	No. 140	18.88	48.57%	9%
0.075	No. 200	2.19	64.94%	8%

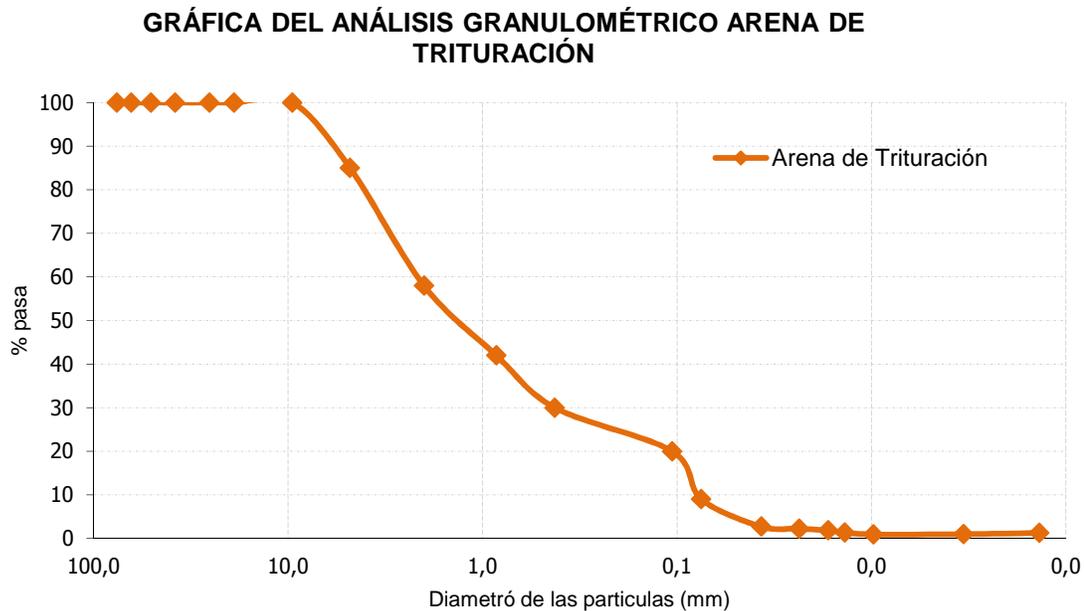
Fuente: Propia

Tabla 10 Análisis granulométrico concreto hidráulico reciclado (Arena de trituración) por hidrómetro

Hidrómetro: <u>152-H</u>		Lectura del Hidrómetro en agua con defloculante <u>6</u>						
Temperatura (°C) <u>21.5</u>		Ct (g/cm ²) <u>0.4</u>						
Periodo de sedimentación t (min)	Temperatura (°C)	Corrección por temperatura (Ct)	Lectura del Hidrómetro	K	L (cm)	Diámetro Partículas $D = K\sqrt{\frac{L}{t}}$	(% De suelo en suspensión (P)	% Totales Pasantes (P1)
			R (g/l)					
2	21.8	0.5	12	0.01378	14.3	0.03686	5.46	2.73
5	21.6	0.5	11	0.01382	14.5	0.02353	4.51	2.25
10	21.8	0.5	10	0.01378	14.7	0.01671	3.67	1.83
15	21.7	0.5	9	0.01380	14.8	0.01371	2.74	1.37
30	21.7	0.5	8	0.01380	15.0	0.00976	1.85	0.92
250	22.1	0.6	8	0.01373	15.0	0.00336	1.96	0.98
1440	24	1.3	8	0.01343	15.0	0.00137	2.54	1.27

Fuente: Tomado norma INV E 123-13

Gráfico 5 Representación gráfica del análisis granulométrico – arena de trituración



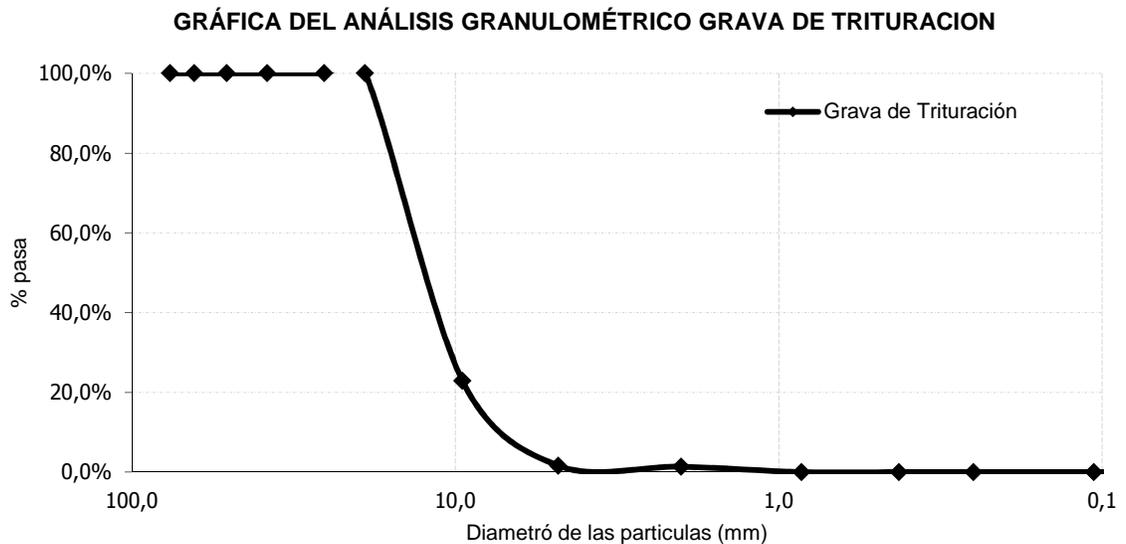
Fuente: Propia

Tabla 11 Análisis granulométrico concreto hidráulico reciclado (Grava de trituración)

ABER. DEL TAMIZ (mm) (pulg)		Masa Retenido	%Retenido acumulado	(%) PASA
76.1	3	0	0.00%	100%
64	2 1/2	0	0.00%	100%
50.8	2	0	0.00%	100%
38.1	1 1/2	0	0.00%	100%
25.4	1	0	0.00%	100%
19	3/4	0	0.00%	100%
9.5	3/8	2096.9	77.08%	23%
4.8	No. 4	579.4	98.38%	2%
2.0	No. 10	5.2	98.64%	1%
0.85	No. 20	4.9	98.75%	0%
0.425	No. 40	0	98.75%	0%
0.25	No. 60	0	98.75%	0%
0.106	No. 140	0	98.75%	0%
0.075	No. 200	0	98.75%	0%

Fuente: Propia

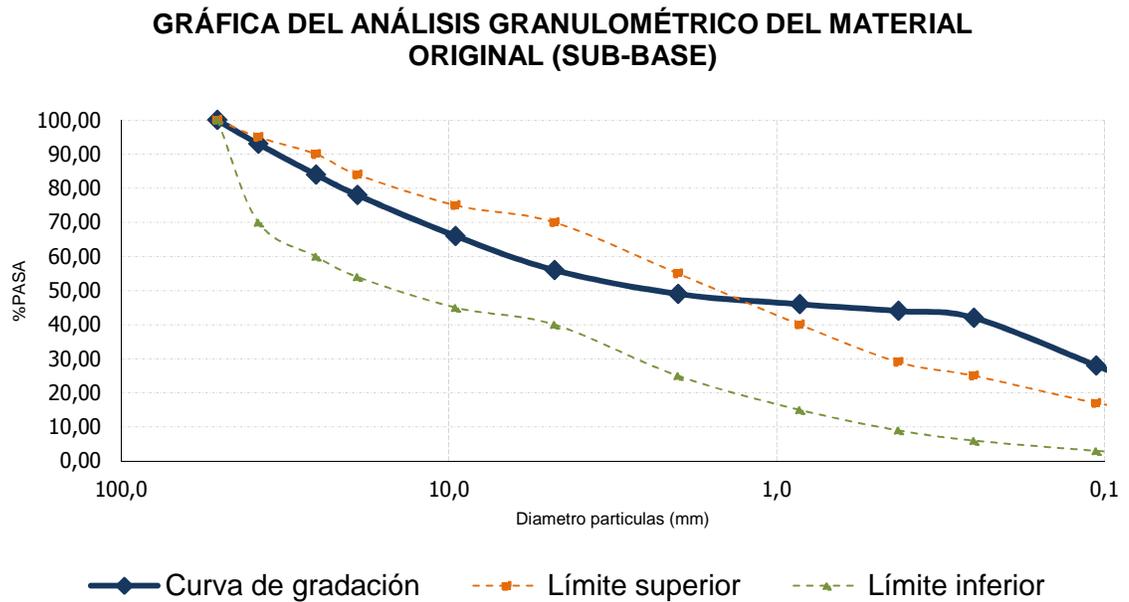
Gráfico 6 Representación gráfica del análisis granulométrico – grava de trituración



Fuente: Propia

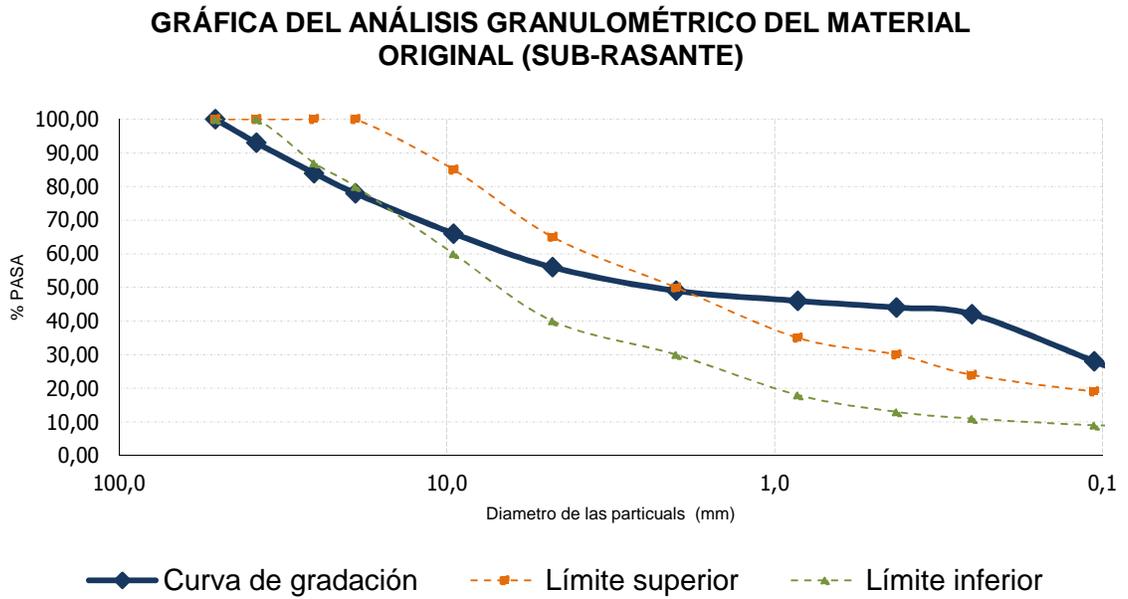
Partiendo de la curva análisis granulométrico del material original se procedió a revisar dentro de los límites de la especificación estipulados dentro de la norma, (ver anexo 3), para revisar si cumple como material para una sub- base obteniendo la siguiente curva.

Gráfico 7 Análisis granulométrico – límites especificación sub-base



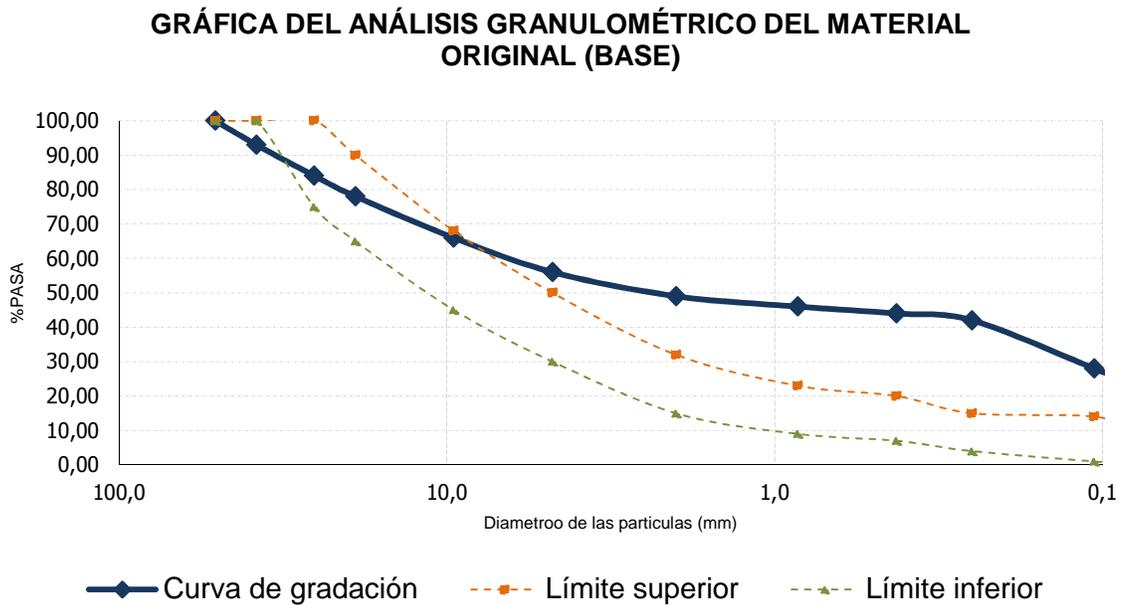
Con la curva obtenida en la Gráfico 7 Análisis granulométrico – límites especificación sub-base, se determina que el material **NO CUMPLE** como una **SUB –BASE** y se procede a revisar la curva con especificaciones para base y sub-rasante, (ver anexo 4), obteniendo lo siguiente:

Gráfico 8 Análisis granulométrico – límites especificación sub-rasante



Fuente: Propia

Gráfico 9 Análisis granulométrico – límites especificación base



Fuente: Propia

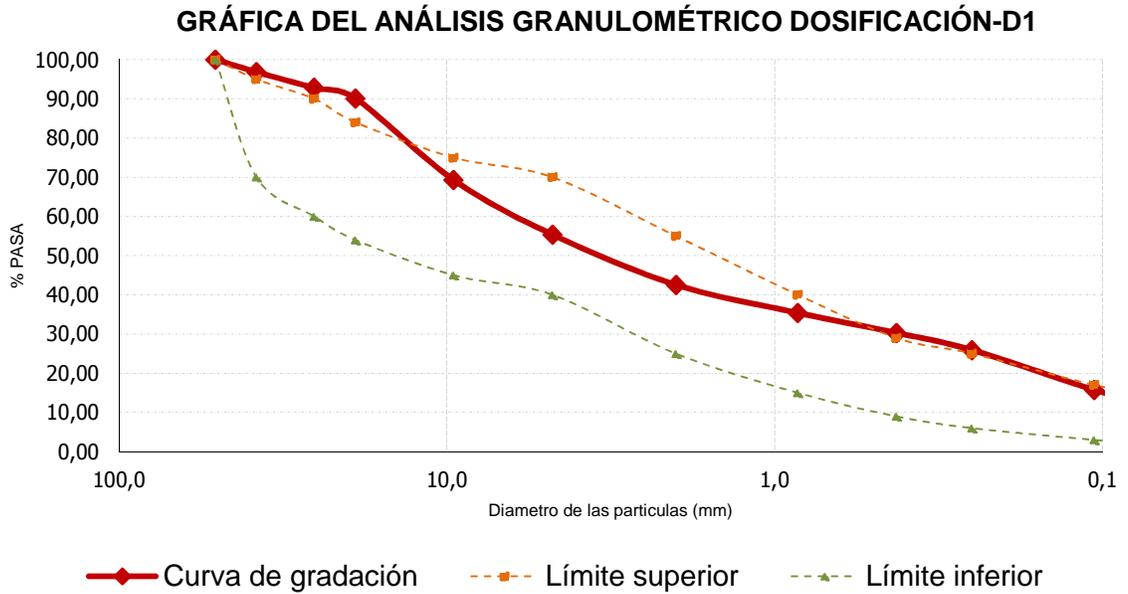
Con el objeto de presentar una análisis de las curvas granulométricas obtenidas anteriormente, se realizó una comparación de acuerdo a las artículos 311, 320, 330 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) para material de carretera, sin embargo , se acuerdo a la investigación la especificación empleada en la investigación corresponde a materiales de Sub-Base granular, a la cual se procede a la adición de concreto reciclado en porcentajes para lograr un ajuste a los límites establecidos como una **SUB- BASE** granular tipo **SBG-1**, esta dosificación se hará de la siguiente manera, (ver anexo 5), primera dosificación que corresponde a **Dosificación D1** de 45% material original, 20% arena de trituración y 35% de grava de trituración; segunda dosificación que corresponde a **Dosificación D2** de 40% material original, 35% arena de trituración y 25% de grava de trituración y la tercera dosificación que corresponde a **Dosificación D3** de 50% material original, 25% arena de trituración y 55% de grava de trituración, para lo cual se obtuvo las siguientes graficas:

Tabla 12 Dosificaciones de los materiales

DOSIFICACIÓN	UNIDAD	VALOR
D1		
Material original		45
Grava de trituración	%	20
Arena de trituración		35
D2		
Material original		40
Grava de trituración	%	35
Arena de trituración		25
D3		
Material original		50
Grava de trituración	%	25
Arena de trituración		25

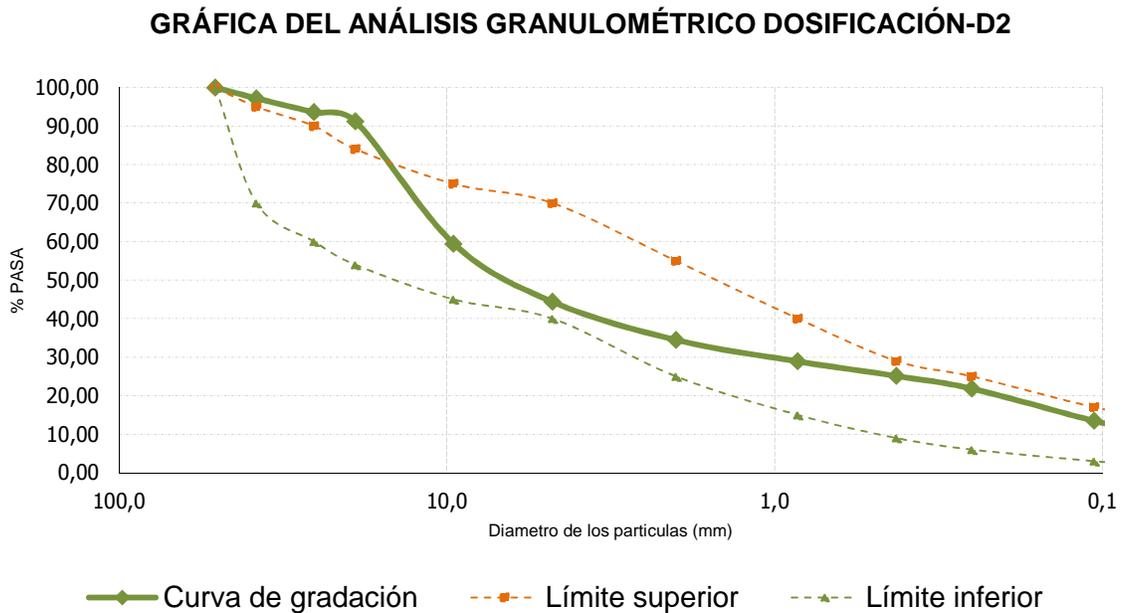
Fuente: Propia

Gráfico 10 Análisis granulométrico – Dosificación D1



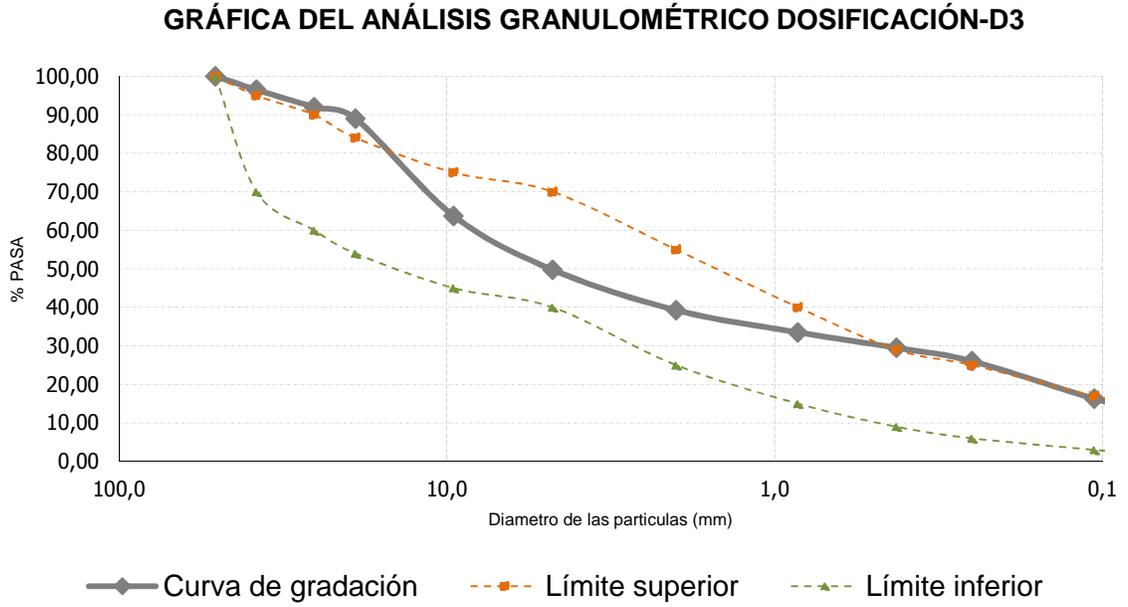
Fuente: Propia

Gráfico 11 Análisis granulométrico – Dosificación D2



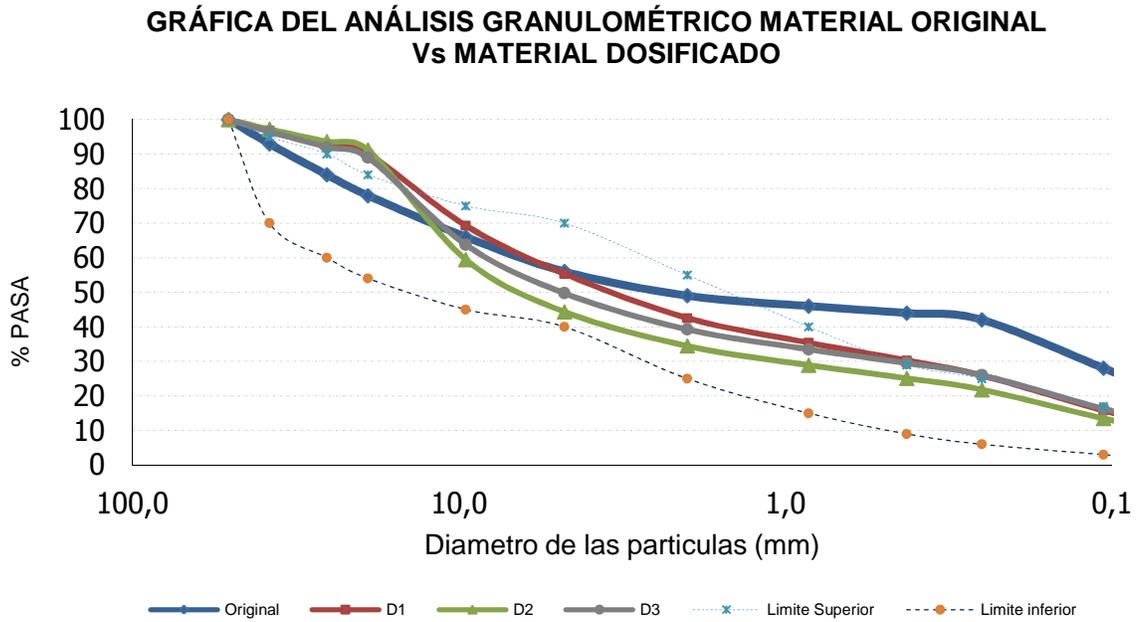
Fuente: Propia

Gráfico 12 Análisis granulométrico – Dosificación D3



Fuente: Propia

Gráfico 11 Análisis granulométrico – Material original y dosificaciones



Fuente: Propia

Dentro del planteamiento inicial del proyecto de investigación se estipuló la adición de concreto reciclado en porcentajes de 3%, 6% y 9%, teniendo como punto de partida un material que cumpliera como tipo SBG-1, pero en los resultados del análisis granulométrico del material original, se pudo comprobar que no cumplía, para poder seguir objetivo de la investigación se inició con el primer porcentaje solo para que se acercara a los límites de una sub base y revisando que los porcentajes usados para las tres dosificaciones no variarían entre sí en más de 5% del material original y que las curvas se acercaran a cumplieran como tipo SBG-1.

8.1.3 Determinación del límite líquido de los suelos; límite plástico e índice de plasticidad de los suelos

Los ensayos corresponden a las Normas INV E 125 – 2013 y INV E 126 -2013, (ver anexo 6), respectivamente, con el cual se caracteriza la fracción fina del suelo y poder “calcular su consistencia o índice de liquidez”²³, “límite líquido e índice de plasticidad de los suelos”²⁴, estos límites calculados son los llamados límites de Atteberg, con los cuales se puede ver el comportamiento en diferentes estados de consistencia de los suelos plásticos, determinar las fronteras y conocer que tan deformables pueden ser, para establecer el desempeño que alcancen ante cualquier obra de ingeniería frente a aplicación de cargas.

El límite líquido se realiza para una porción retenida en tamiz No. 40 y se hace por tanteo en una cazuela de bronce donde se esparce la muestra y con un ranurador se divide, se determina el número de golpes para que las partes fluyan de nuevo, los golpes son provenientes de la caída de la cazuela sobre una base, y determinar el contenido de humedad para el cual el suelo pasa de líquido a plástico.

²³ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E -125 -13. Determinación del límite líquido de los suelos, 2013.

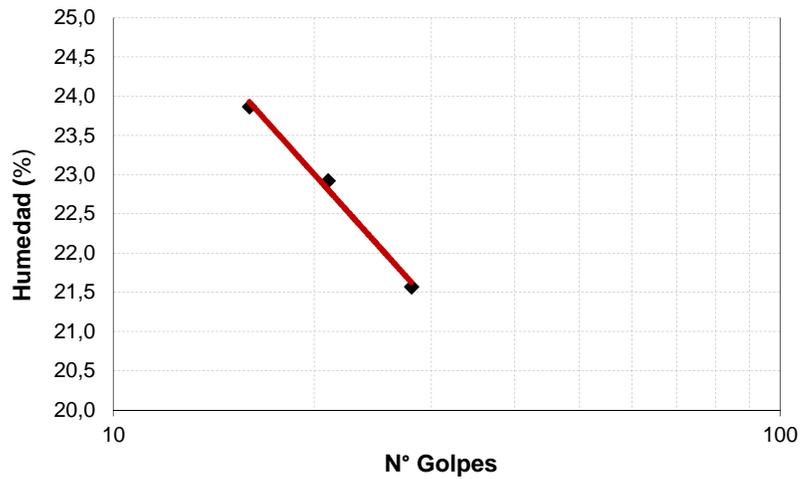
²⁴ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E -126 -13. Determinación del límite de plasticidad de los suelos, 2013.

El límite plástico es la humedad más baja obtenida para que en una porción de suelo húmedo permita formar unos rollos a un determinado diámetro hasta cuando se agrieten y provoque el desmoronamiento de los mismos y determinar el contenido de humedad para que el suelo pase de estado plástico a semi-sólido

Resultados

<u>LIMITES DE CONSISTENCIA</u>	<u>UNIDAD</u>	<u>VALOR MEDIDO</u>
Material original		
Límite líquido		22
Límite plástico		15
índice plasticidad	%	8
Gravas		44
Arenas		34
Finos		22
USC		GC
AASHTO		A-2-4
Arena de trituración		
Limite liquido		NL
Limite plástico		NP
índice plasticidad	%	NP
Gravas		15
Arenas		76
Finos		8
Grava de trituración		
Limite liquido		NL
Limite plástico		NP
índice plasticidad	%	NP
Gravas		98
Arenas		2
Finos		0

Gráfico 13 Curva de fluidez material original



Fuente: Propia

Con los límites de Atteberg el material es clasificado como una **GC**, en el sistema de clasificación USC, y en el sistema de clasificación de **AASHTO A-2-4 con índice de grupo 0**, contenido de material grueso retenido en el tamiz 200 es mayor al 50%, son gravas arcillosas mezcladas con arena y arcilla, clasificándolo así como **GRAVA ARCILLOSA CON ARENA, AMARILLA**.

8.1.4 Equivalente de arena de suelos y agregados finos

El ensayo corresponde a la Norma INV E 133 – 2013, (ver anexo 7), con el cual se determina cantidad de finos platicos que puedan contener los suelos, para determinar la si hay material nocivo en un agregado y establecer su calidad para el proceso de construcción y colocación, evitando la degradación excesiva al momento de compactación.

El procedimiento se realiza en un volumen de suelo con una solución floculante colocada en un cilindro se agitan para generar una mezcla entre las partículas de

suelo y la solución, se deja en proceso de sedimentación para que la arena quede en el fondo y las partículas arcillosas en suspensión.

Resultados

<u>EQUIVALENTE DE ARENA</u>	<u>UNIDAD</u>	<u>VALOR MEDIDO</u>
Material original	%	74
Arena de trituración		87

El porcentaje de equivalente de arena mostró que el material tiene alto contenido de arenas, un 74%, para material original y 87% para arena de trituración, en el Artículo 320 de INVIAS se estipula que los contenidos para una sub-base granular en equivalente de arena es mínimo de 25%, cumpliendo con la especificación.

Ilustración 1 Pruebas para hallar el porcentaje de equivalente de arena



Fuente: Propia

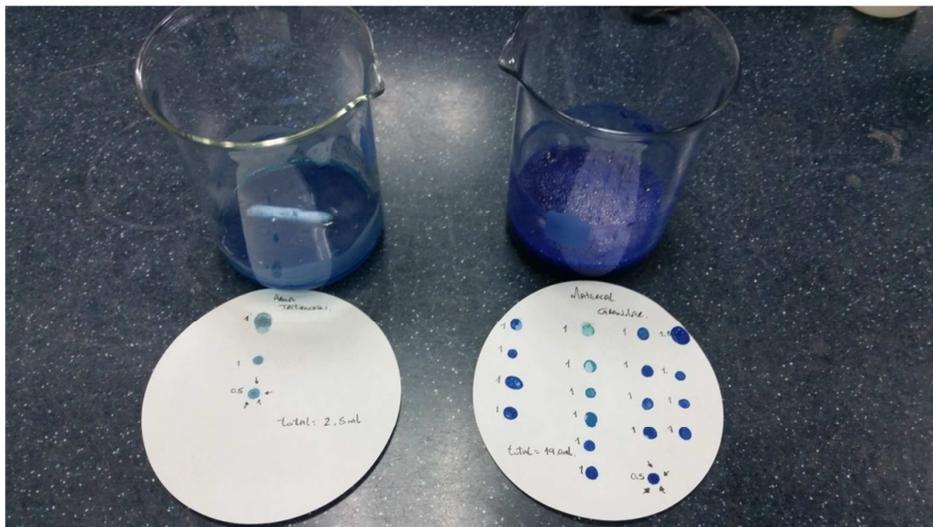
8.1.5 Valor de azul de metileno en agregados finos

El ensayo corresponde a la Norma INV E 235 – 2013, (ver anexo 8), con el cual se determina la cantidad de arcilla nociva que puede estar presente el material.

El proceso se realiza agregando una cantidad de solución de azul de metileno a una muestra de suelo en suspensión a la cual se le realiza pruebas de coloración sobre papel filtro cuando se haya comprobado la absorción de la solución de azul de metileno por parte de la muestra y se consigue un efecto de decoloración sobre la solución.

El resultado obtenido del valor de azul de metileno en mg de azul por gramo de material seco pasa tamiz N° 200 (VA) $((5 \cdot V)/W)$

Ilustración 2 Pruebas para hallar el valor de azul de metileno



Fuente: Propia

Resultados

AZUL DE METILENO	UNIDAD	VALOR MEDIDO
Material original	%	9.5
Arena de trituración		1.3

Con ensayo de azul de metileno se obtuvo contenido 9.5%, para material original y 1.3% para arena de trituración, en el Artículo 320 de INVIAS se estipula que los contenidos para una base granular en porcentaje de azul de metileno es máximo de 10%, cumpliendo con la especificación, es decir que si las muestra si estarían cumpliendo con la especificación requerida.

8.1.6 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores a 1 ½” por medio de la máquina de los ángeles, Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños de tañamos mayores a ¾” por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles

Los ensayos corresponde a la Norma INV E 218 – 2013 y 219 - 2013, respectivamente, (ver anexo 9), con el cual se mide la resistencia a la degradación de material en tamaños menores a 1 ½”, y mayores a ¾”, con estos ensayos se puede determinar la resistencia al desgaste o dureza del agregado para conocer cuál será la incidencia al estar este material sometido a rose de partículas como sucede en capas de pavimentos.

En ambas normas el método consiste en que cierta cantidad de material es sometido a acciones de molienda y abrasión en la máquina de los ángeles la cual consta de un tambor de acero el cual rota y junto al material tiene unas esferas metálicas en su interior, las vueltas o giros del tambor generan un efecto de impacto y trituración, el ensayo debe cumplir con cierta cantidad de giros, después de cumplidos los ciclos el material es tamizado y se calcula la pérdida sufrida por el desgaste.

Resultados

DESGASTE	UNIDAD	VALOR MEDIDO
Material original	%	54
Grava de trituración		30

Para la resistencia a la degradación por medio de máquina de los ángeles el material original no cumple ninguna de las especificaciones ni sub-rasante o afirmado, ni para sub-base, en las especificaciones tienen como máximo 50%, y se obtuvo 54%, la grava de trituración si entra dentro de las especificaciones con un valor de 30%, según el Artículo 320 de INVIAS.

8.1.7 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino y grueso

Los ensayos corresponde a la Norma INV E 222 – 2013 y 223 - 2013, respectivamente, (ver anexo 10), con el cual se determina la humedad superficial del agregado, la absorción que tiene el material en sus poros.

El ensayo se realiza sumergiendo la muestra en agua para llenar los poros durante un día después del cual se seca la muestra y se determina su masa con lo cual es posible determinar la gravedad específica y la absorción del agregado.

Resultados

GRAVEDAD ESPECIFICA	UNIDAD	VALOR MEDIDO
Material original (finos)		2.60
Material original (grueso)	%	2.59
Grava de trituración		2.51
Arena de trituración		2.457

ABSORCIÓN	UNIDAD	VALOR MEDIDO
Material original (finos)		4.32
Material original (grueso)	%	4.7
Grava de trituración		6.3
Arena de trituración		10.18

Los resultados de gravedad específica en los materiales, material original grueso y fino, arena de trituración y grava de trituración se calcularon dentro de los mismos rangos, la diferencia no sustancial, pero la humedad en el la arena y grava de trituración si son elevadas respecto al material original.

8.1.8 Relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación)

El ensayo corresponde a la Norma INV E 142 – 2013, (ver anexo 11), con el cual se puede determinar el porcentaje de humedad óptimo para obtener una densidad seca máxima en el material al momento de la compactación y para que este pueda llegar a un comportamiento más adecuado en cuanto a resistencia y lograr una mejor estabilidad en las obras fundadas en estos suelos.

El ensayo se realiza a una muestra de suelo con una humedad determinada para moldeo, se ejecuta con una energía de compactación de 56000 Lb-pie/pie³, obtenida por el caída de 18” de un martillo que tiene una masa de 10 libras, se

compacta en 5 capas de 56 golpes, se debe realizar una curva humedad vs densidad con minimo 4 puntos, para ello se realizan 4 probetas, para la energía de compactación dada por el martillo, representada en la siguiente ecuación.

$$E_c = \frac{h * P_m * N * n}{V} = \frac{\left(\frac{18in * 1ft}{12in}\right) * 10lb * 5 * 56}{0.07ft^3} = 56293lb/ft^2 \quad (5)$$

Dónde:

Ec: Energía de compactación aplicada en el ensayo.

H: Altura de caída del martillo.

Pm: peso del martillo.

N: número de capas.

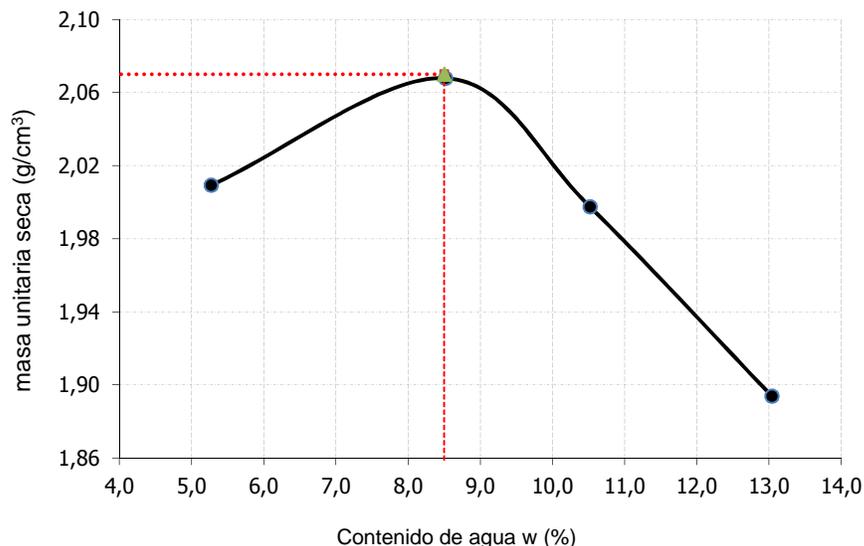
n: número de golpes por capa.

V: volumen del recipiente según método D. molde 6" de diámetro.

Resultados

ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN MODIFICADO	UNIDAD	VALOR MEDIDO
Material original		
Densidad seca máxima	g/cm ³	2.07
Humedad optima	%	8.5

Gráfico 14 Curva de compactación – material de original



Fuente: Propia

En el ensayo modificado de compactación se obtuvo que para una humedad de 8,5% se obtiene una densidad seca máxima de 2.070g/cm^3 , siendo el 8,5% la humedad óptima de compactación para obtener la mayor resistencia, lo cual presenta una elevada densidad máxima seca en relación a valores típicos de materiales de sub-base granular mostrados en la Tabla 13 Valores típicos para $v_{d\text{max}}$ para materiales de sub-base granular que generalmente varían en un rango entre $1.700\text{-}1.900\text{ g/cm}^3$.

“La alta densidad presentada por el material con respecto a valores representativos, es un primer indicio de las posibles altas características de resistencia, compresibilidad, relación esfuerzo-deformación, permeabilidad, flexibilidad y de resistencia a la erosión que puede tener el material de sub-base granular; sin embargo, la densidad máxima seca no es el único factor por el que se puede evaluar el comportamiento del material tal como fue discutido antes, y es así que el material puede tener un mejor comportamiento a densidades más bajas

dependiendo de (entre otros), el grado de saturación, y el contenido de material grueso o fino de la muestra total”²⁵.

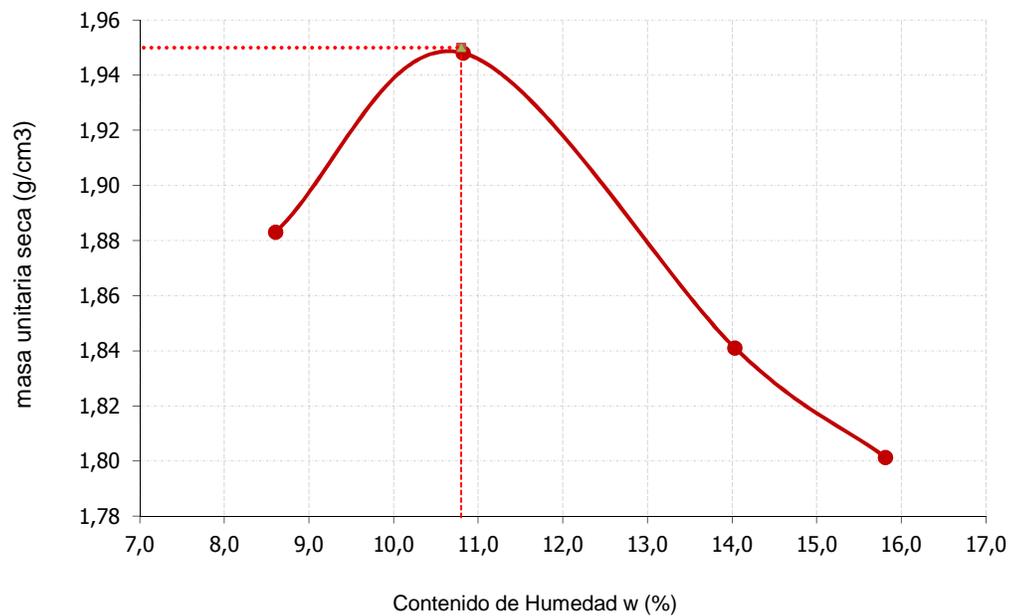
Tabla 13 Valores típicos para γ_{dmax} para materiales de sub-base granular

Material	γ_{dMAX} (g/cm ³)
SBG	1.750
SBG	1780
SBG	1.850
SBG	1.900

Fuente: FRANQUICIA DIDENSA S.A.²⁶

Para las dosificaciones del material original con adición de concreto hidráulico reciclado (ver anexo 12), se obtuvo lo siguiente

Gráfico 15 Curva de compactación – Dosificación D1

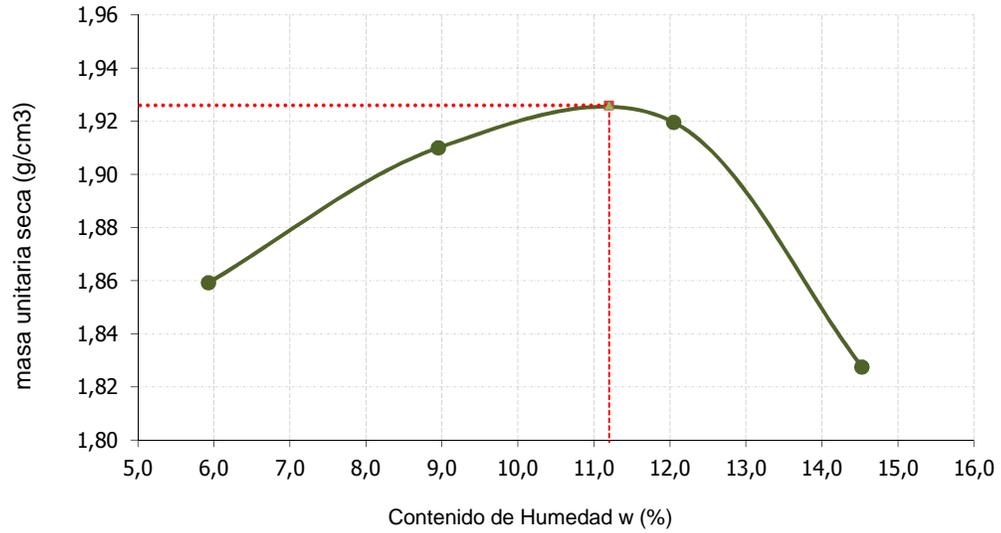


Fuente: Propia

²⁵ MONTEJO F., A., Ingeniería de pavimentos para carreteras. 2° edición. Bogotá D.C. 1998. Pág. 333-337.

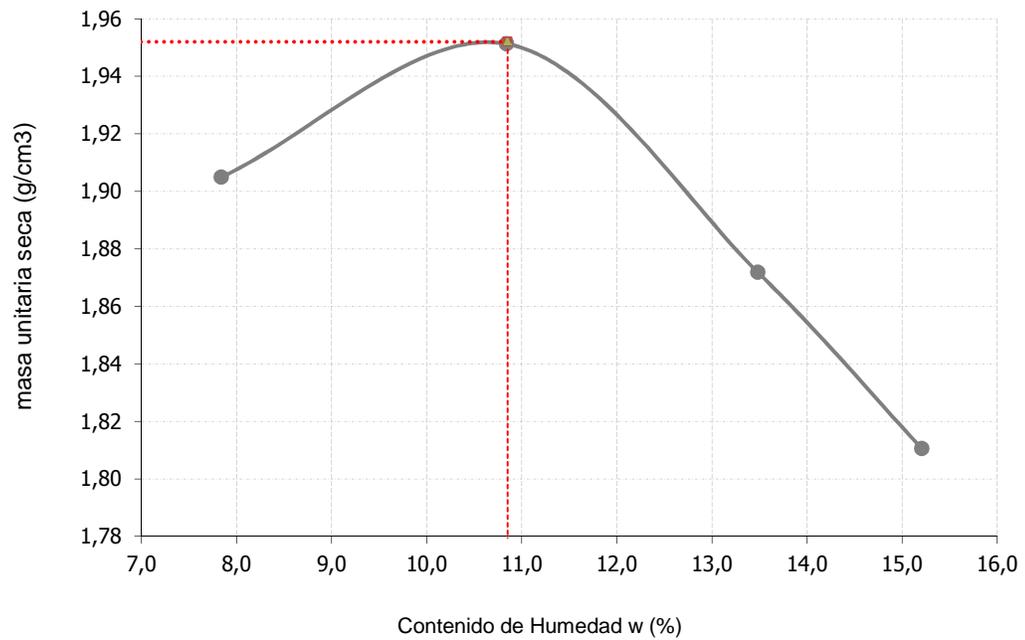
²⁶ FRANQUICIA DIDENSA S.A. Catálogo de productos: agregados. Ecuador. 2008 Pág. 7-9

Gráfico 16 Curva de compactación – Dosificación D2



Fuente: Propia

Gráfico 17 Curva de compactación – Dosificación D3

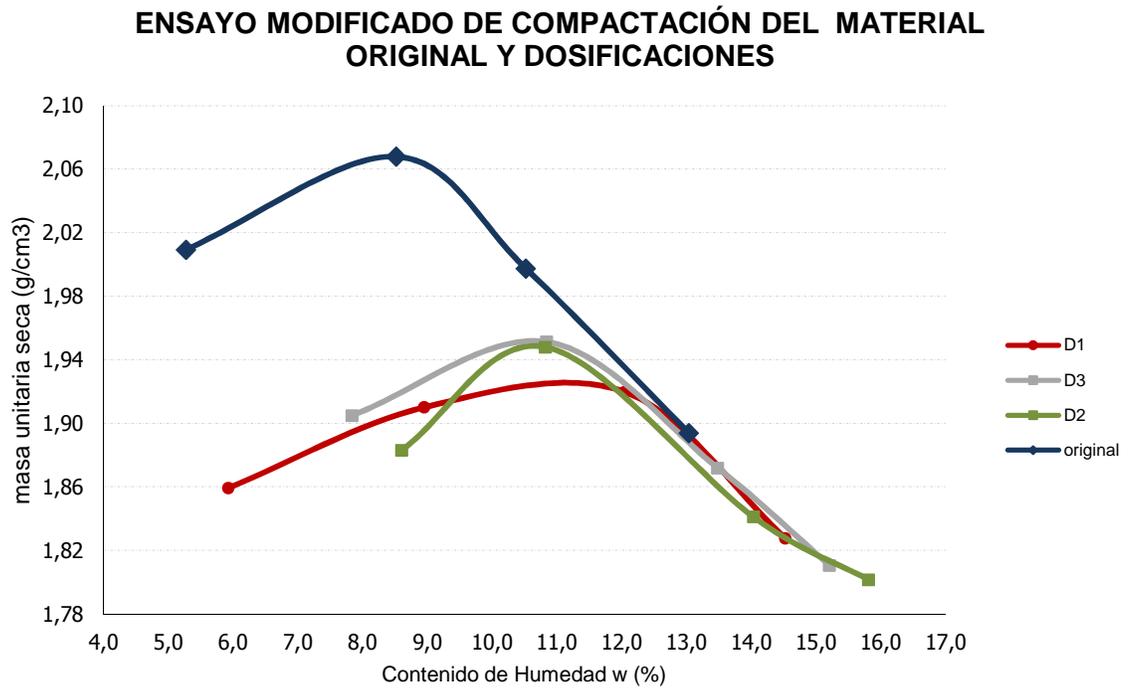


Fuente: Propia

Resultados

ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN	UNIDAD	VALOR MEDIDO
D1		
Masa unitaria seca máxima	g/cm ³	1.95
Humedad Óptima	%	10.8
D2		
Masa Unitaria seca máxima	g/cm ³	1.926
Humedad Óptima	%	11.2
D3		
Masa Unitaria seca máxima	g/cm ³	1.952
Humedad Óptima	%	10.85

Gráfico 18 Curva de compactación – Material de original y dosificaciones



Fuente: Propia

En la Gráfico 18 Curva de compactación – Material de original y dosificaciones, se observa el comportamiento del material original y las muestras D1, D2, D3, donde se puede evidenciar que las curvas de compactación para las dosificaciones tienen la humedad óptima más alta y la densidad seca máxima es más baja con respecto al material original, teniendo en cuenta la absorción de la arena y grava de trituración anteriormente calculada dio 6% y 2% más que el material original, por ello para alcanzar la compactación requiere de más contenido de agua y por consiguiente el volumen de la muestra aumenta para la misma masa y el cociente entre el masa y el volumen de la muestra disminuye.

8.1.9 Nomogramas de relaciones de fase del material

El nomograma de relaciones de fase establece de manera gráfica las características que describen el estado de un material a partir de su peso específico y variables que pueden cambiar como su contenido de humedad, su grado de saturación, su relación de vacíos y su densidad. A partir de estos valores se establece el modo en que las características del material cambian ante un proceso de compactación, sabiendo de esta forma que una disminución o aumento de la densidad del material se verá reflejado en un cambio de los valores de relación de vacíos, y por otra parte describirá el grado de saturación y condiciones de humedad que el material debe conservar, con el fin de alcanzar el grado de densidad necesario.

Las ecuaciones que permiten generar este tipo de nomograma y las condiciones de frontera asociadas con estas son las siguientes:

$$\gamma_t = \frac{W_t}{V_t} = \frac{G_s(1+w)\gamma_w}{(1+e)} \quad \left| \begin{array}{l} w = \frac{e_{max}}{G_s} \\ w = 0 \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{l} e = e_{min} \\ e = e_{max} \end{array} \right. \quad (6)$$

Ecuación para nomograma de relaciones de fase en función del contenido de humedad y relación de vacíos. (Extraído de BERDUGO, 2000)²⁷

$$\gamma_t = \frac{W_t}{V_t} = \frac{G_s(1+w)\gamma_w S}{(S + G_s w)} \quad \left| \begin{array}{l} S = 100\% \\ S = 0\% \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{l} w = \frac{e_{máx} S}{G_s} \\ w = \frac{e_{min} S}{G_s} \end{array} \right. \quad (7)$$

Ecuación para nomograma de relaciones de fase en función del contenido de humedad y saturación. (Extraído de BERDUGO, 2000)²⁸

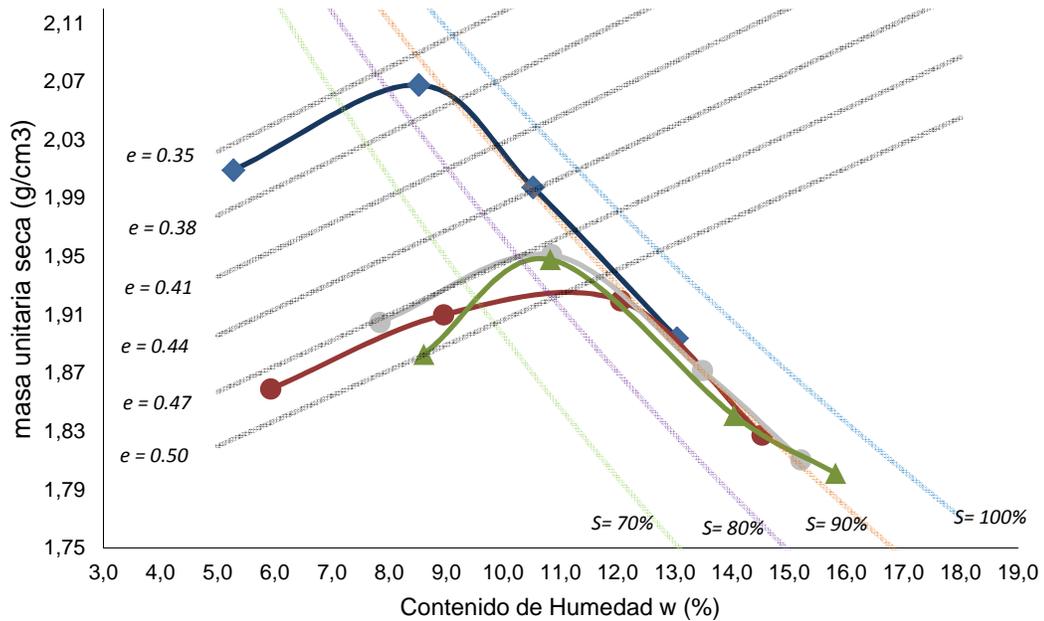
Usando las ecuaciones anteriores, para una relación de vacíos mínima considerada $e_{min}=0.35$, y una relación máxima $e_{máx}=0.50$, una saturación del 70% al 100%, y un $G_s=2.60$ se obtiene el siguiente nomograma de relaciones de fase:

²⁷ BERDUGO, Iván. Relaciones de fase. Conceptos básicos y aplicaciones, ecuación 31.a. Bogotá, 2000. p. 26

²⁸ *Ibíd.* p. 25 .

Gráfico 19 Nomograma de relaciones de fase - Curva de compactación – Material de original y dosificaciones

NOMOGRAMA DE RELACIONES DE FASE



Fuente: Propia

Gráfico 19 Nomograma de relaciones de fase - Curva de compactación – Material de original y dosificaciones, se observa el nomograma de estados de fase con respecto a la densidad total del material, el cual incluye la curva de compactación obtenida de acuerdo a las densidades medias totales dadas para cada contenido de humedad y su respectiva dosificación.

8.1.10 CBR de suelos compactados en el laboratorio

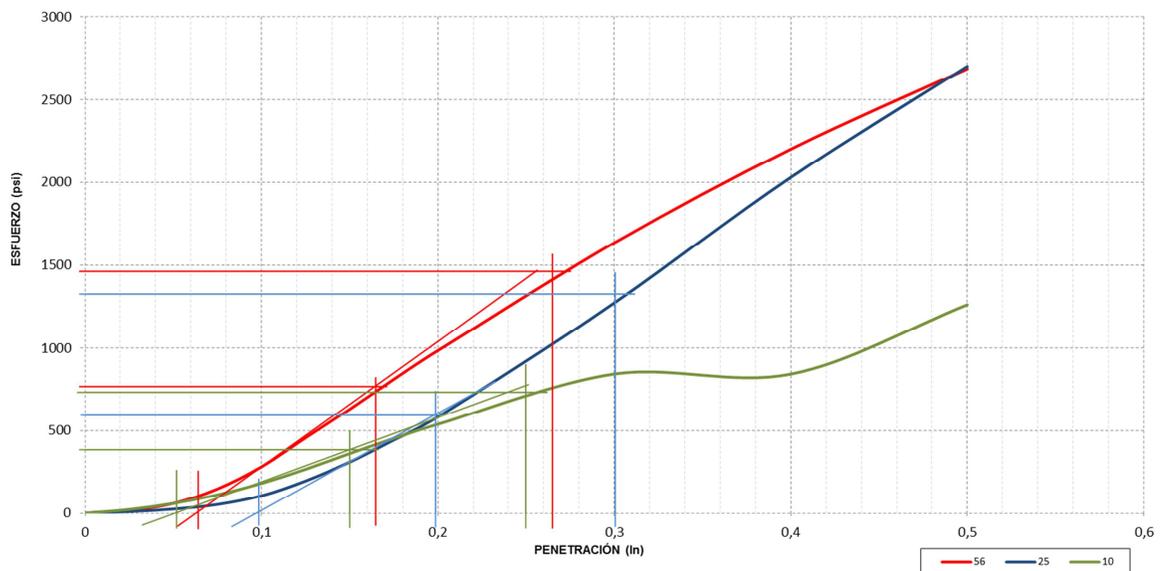
El ensayo corresponde a la Norma INV E 148 – 2013, (ver anexo 13), con el cual se determina un índice de resistencia, los resultados obtenidos se utilizan como dato inicial para el diseño de pavimentos flexibles.

El ensayo se realiza con la penetración de un pistón en la muestra de suelo con una velocidad constante, con el cual se calcula el esfuerzo que se necesita para que dicho pistón penetre en la muestra 0.1 o 0.2" y se revisa con el esfuerzo de referencia de una muestra patrón, la muestra de suelo se realiza en un molde similar al usado para el ensayo de compactación, a continuación se presentan los resultados obtenidos a 0.1" y 0.2" del material original:

RESULTADOS

CBR	UNIDAD	VALOR MEDIDO
Material original		
CBR 0.1" - 56 golpes		74.0
CBR 0.1" - 25 golpes		57.0
CBR 0.1" - 10 golpes		36.5
CBR 0.2" - 56 golpes	%	94.0
CBR 0.2" - 25 golpes		85.33
CBR 0.2" - 10 golpes		47.33

Gráfico 20 Curva de penetración vs el esfuerzo – muestra original



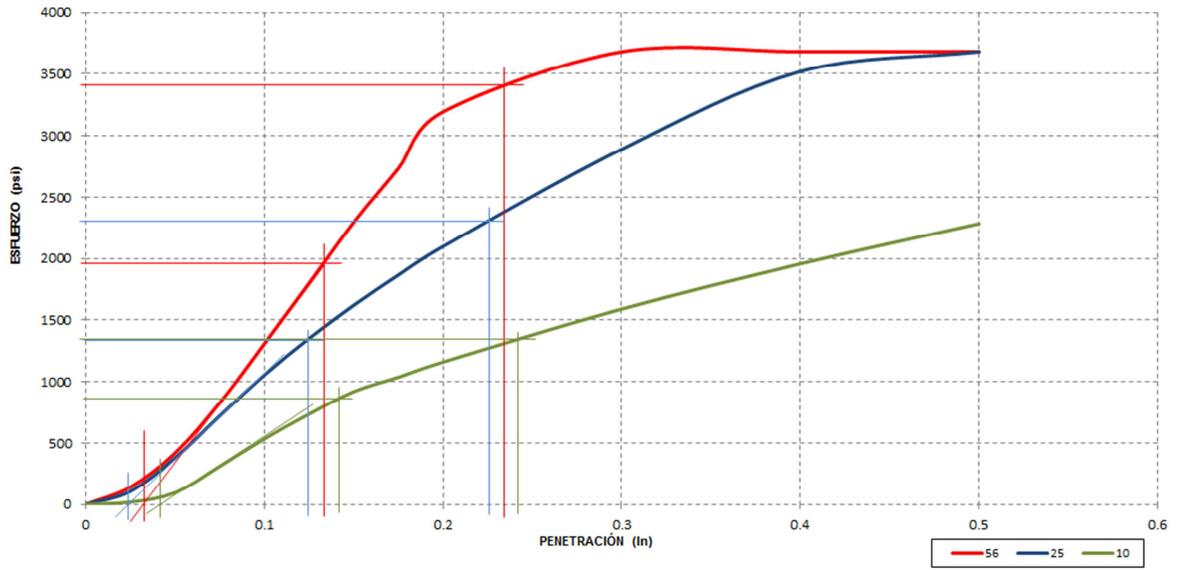
Fuente propia

De igual manera en la Grafica 21, 22 y 23 se presenta los resultados obtenidos en las dosificaciones D1, D2 y D3, se observa un aumento significativo de los materiales dosificados respecto al material original para una penetración de 0.2", esto se puede atribuir al comportamiento mecánico de los materiales ya que a pesar que estamos cambiando un material aparentemente de gravedad especifica en un material cementicio, el material es un concreto el cual se puede comportar como una grava y bajo una carga estática su resistencia es mejor.

RESULTADOS

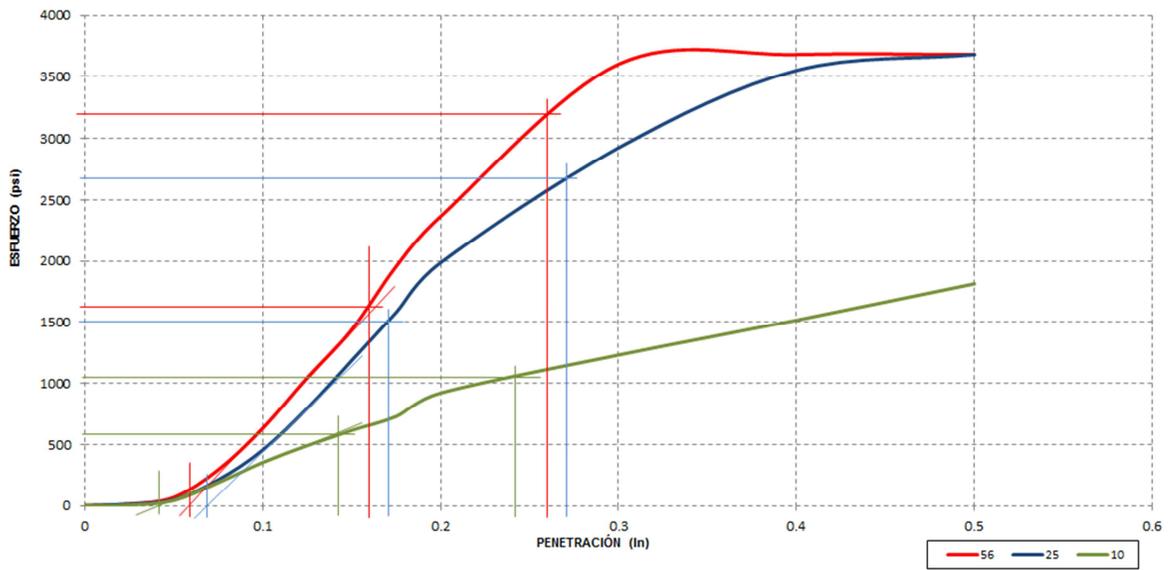
CBR	UNIDAD	VALOR MEDIDO
DOSIFICACIÓN D1		
CBR 0.1" - 56 golpes		197.0
CBR 0.1" - 25 golpes		135.0
CBR 0.1" - 10 golpes	%	87.0
CBR 0.2" - 56 golpes		227.3
CBR 0.2" - 25 golpes		154.0
CBR 0.2" - 10 golpes		90.0
DOSIFICACIÓN D2		
CBR 0.1" - 56 golpes		162.0
CBR 0.1" - 25 golpes		150.0
CBR 0.1" - 10 golpes	%	58.0
CBR 0.2" - 56 golpes		213.3
CBR 0.2" - 25 golpes		178.67
CBR 0.2" - 10 golpes		70.0
DOSIFICACIÓN D3		
CBR 0.1" - 56 golpes		112.0
CBR 0.1" - 25 golpes		79.0
CBR 0.1" - 10 golpes	%	74.0
CBR 0.2" - 56 golpes		162.7
CBR 0.2" - 25 golpes		129.33
CBR 0.2" - 10 golpes		99.33

Gráfico 21 Curva de penetración vs el esfuerzo – Dosificación D1



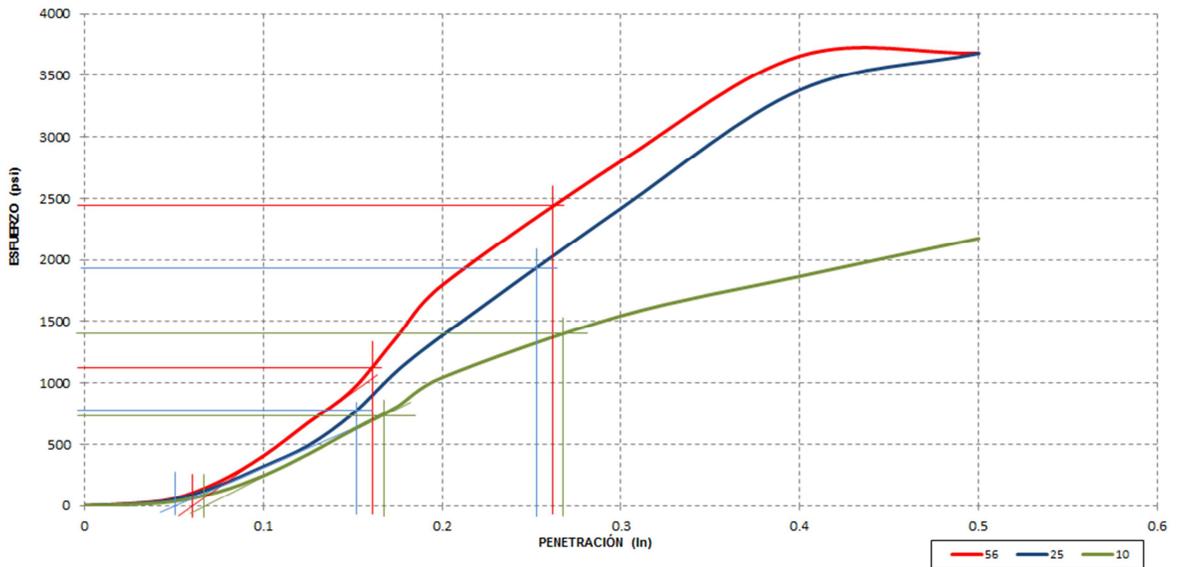
Fuente propia

Gráfico 22 Curva de penetración vs el esfuerzo – Dosificación D2



Fuente propia

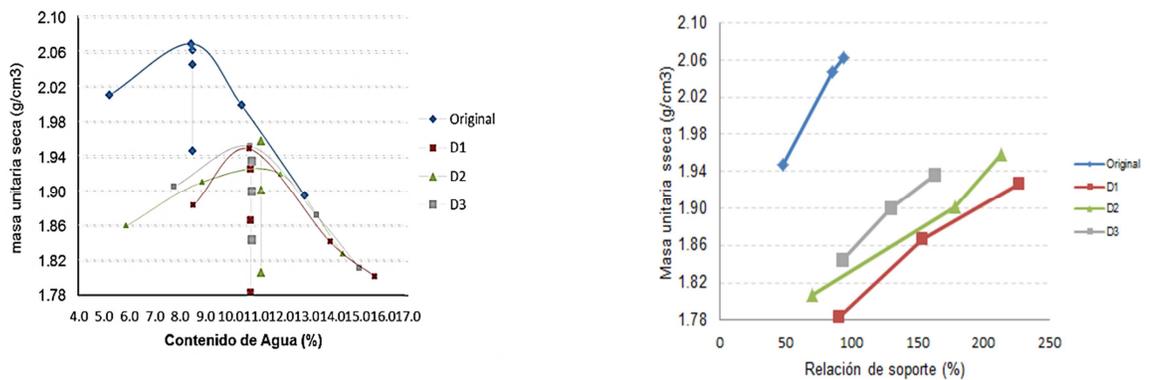
Gráfico 23 Curva de penetración vs el esfuerzo – Dosificación D3



Fuente propia

Teniendo en cuenta el Gráfico 24 Comparación: Relación de soporte CBR con Ensayo Modificado de compactación, se observa que el compartimiento mecánico del material es coherente en cuanto a la relación de los dos ensayos realizados.

Gráfico 24 Comparación: Relación de soporte CBR con Ensayo Modificado de compactación



Fuente: Propia

Para la muestra de ensayo se obtiene un valor de CBR (California bearing ratio) igual para 10 golpes es de 47.33% y para 56 golpes de 94%, la especificación estipula un valor mínimo del 30%. El valor dado por la prueba en laboratorio de CBR establece una capacidad de resistencia a la compresión de un material por medio de una relación de resistencia con respecto a un material de muy buenas condiciones ya calibrado. Del resultado obtenido se puede hacer constar de las condiciones óptimas del material al presentar un valor significativo de resistencia a la compresión; de esta manera siendo el material una (sub-base) granular que no necesita de mayores propiedades mecánicas o resistencia, esta muestra propiedades muy superiores a las normales presentadas por otros estudios.

8.1.11 Módulo resiliente en suelos y agregados

El ensayo corresponde a la Norma INV E 156 – 2007, (ver anexo 15), con el cual se obtiene la relación del esfuerzo y la deformación ante cargas cíclicas a las que se ven sometidas las capas de pavimento por el paso de los vehículos.

El ensayo se realiza bajo la Norma INVIAS de 2007, la cual se hace compactación por impacto y no por compactación mecánica que aparece especificada en la norma de 2013, puesto que no se tienen los equipos para realizarlo bajo esa especificación, el método es someter la muestra a un esfuerzo dinámico y conocer su respuesta de recuperación al ser sometido a diferentes cargas.

El equipo en el cual se obtiene el módulo resiliente para el material de tipo granular es una máquina triaxial universal con mando electromecánico, la cual presenta una alta capacidad de respuesta ya que trabaja con bastante precisión ante las cargas solicitadas, se tiene en cuenta tanto la magnitud como la frecuencia; además es capaz de aplicar tanto carga dinámica como presión de confinamiento de magnitud y duración controlada para simular el estado de esfuerzos producido por un vehículo en movimiento; el equipo se compone de tres unidades: unidad de registro de información (computador), unidad de aplicación de

carga (cámara triaxial) y unidad de regulación de presión, ver Ilustración 3 Unidad de registro de información y unidad de aplicación de carga y Unidad de regulación de presión.

Ilustración 3 Unidad de registro de información y unidad de aplicación de carga y Unidad de regulación de presión universidad la Gran Colombia



Fuente: Propia

La primera unidad (computador) es la encargada de registrar toda la información obtenida y desarrollada a través del ensayo; en esta unidad se encuentran los controles que permiten accionar el equipo electrónicamente. La computadora facilita al usuario ejecutar varias pruebas de manera automática.

La segunda de las unidades (unidad de regulación de presión), consiste en un equipo que aplica la presión necesaria para la realización de las pruebas triaxiales y de permeabilidad; por ello cuenta con la posibilidad de lograr una presión de hasta 1400 kPa, (14 kg/cm²). La tercera unidad (cámara), es la correspondiente a la de aplicación de carga vertical mediante un pistón mecánico.

La medida de la deformación se debe al instante dado por la velocidad de circulación de un vehículo sobre la estructura de un pavimento; así, cada pulso de 0.1 s equivale a una velocidad de operación del vehículo en promedio de 80 km/h. las dimensiones de la cámara están diseñadas de tal forma que se pueden ensayar muestras de 10 cm de diámetro y de 20 cm de altura o de menores dimensiones manteniendo una relación de h/d igual a 2. En la parte superior tiene una válvula que sirve para aplicar el aire comprimido que proporciona la presión de confinamiento a la muestra. En la parte inferior se encuentran cuatro válvulas para drenar la muestra, y para efectuar el llenado y el vaciado de ésta.

El equipo triaxial cuenta con un software destinado a generar las formas de la onda de la aplicación de la carga sobre la probeta de ensayo y así mismo medir las presiones, las cargas y las deformaciones presentes en la muestra de ensayo para cada ciclo de carga.

Para el procedimiento para el ensayo de módulo resiliente las muestras fueron obtenidas de acuerdo al procedimiento descrito por las normas I.N.V.E- 13, el material a ensayar fue tamizado por el tipo de gradación del método D (3/4"), de acuerdo a las características del material escogido para las pruebas de Ensayo modificado de compactación modificado y C.B.R, pero teniendo en cuenta que las tres primeras pruebas fueron realizadas con el material original y luego con el material dosificado en diferentes porcentajes, con el fin de mantener constante la gradación del material y no alterar en lo más mínimo la densidad máxima seca y contenido de humedad óptimo de la muestra en Ilustración 4

Ilustración 4 Material dosificado



Fuente: Propia

Para la compactación de las muestras a ensayar en la cámara triaxial, se procedió a mantener constante la energía de compactación utilizada en el ensayo de Ensayo modificado de compactación modificado, con el fin de garantizar tanto la invariabilidad del comportamiento mecánico del material por efectos de la energía de compactación, como la máxima densidad seca y contenido óptimo de humedad; por otra parte, el método de compactación es el mismo de tipo de impacto descrito en la norma citada. De esta forma, tomando en consideración un volumen de molde promedio de dimensiones: Altura = 20cm, diámetro =10cm, y unas condiciones de compactación: Numero de capas = 5, Peso Martillo = 10 lb, energía de compactación = 56239 lb/ft². Se obtiene un número de golpes del martillo igual a 42/capa. Diferentes a los 56 golpes originales ejecutados en la prueba de Ensayo modificado de compactación modificado, pero garantizando la misma energía de compactación como se muestra en la

Ilustración 5 Proceso de compactación

$$n = \frac{EC * V}{Pm * N * h} = \frac{56293lb/ft^2 * 0.056ft^3}{10lb * 5 * \left(\frac{18in * 1ft}{12in}\right)} \cong 42/capa \quad (8)$$

Ilustración 5 Proceso de compactación



Fuente: Propia

Luego de ejecutada la compactación, la muestra es enrasada, desencofrada, pesada, y medida con el fin de obtener sus dimensiones en base a las cuales se calculará el esfuerzo real en promedio que se estará aplicando a la muestra en cada ciclo.

En los casos en que la muestra no pudiera ser ensayada inmediatamente en la cámara triaxial, se procede a implementar un proceso de curado necesario para evitar la pérdida de humedad. Este proceso consiste en cubrir la muestra con bolsas de plástico e introducirla en una cámara de curado a una temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$, si el proceso se puede llevar a cabo inmediatamente se hace el montaje en cámara triaxial, ver Ilustración 6 e Ilustración 7.

Ilustración 6 Muestra compactada y enrasada en el molde



Fuente: Propia

Ilustración 7 Inicio de montaje de la muestra compactada en cámara triaxial



Fuente: Propia

Posteriormente de montada la muestra, se sella en la cámara triaxial tal como se aprecia en la siguiente ilustración.

Ilustración 8 Muestra en cámara triaxial



Fuente: Propia

ENSAYO EN LA CÁMARA TRIAXIAL:

Acondicionamiento, posteriormente a montar el espécimen en la cámara, se aplica una presión inicial de confinamiento igual a 103.4 kPa y se aplica un mínimo de 500 repeticiones de una carga equivalente al máximo esfuerzo axial desviador 103.4 kPa y correspondiente al esfuerzo cíclico de 93.1 kPa. La anterior secuencia de esfuerzos constituye el acondicionamiento de la muestra, esto es, la eliminación de los efectos del intervalo entre la compactación y la carga, y la eliminación del cargue inicial contra la recarga. Este acondicionamiento de carga ayuda también a disminuir los efectos de un contacto inicialmente imperfecto entre las platinas de los extremos y el espécimen de ensayo.

Prueba del espécimen, luego de acondicionar la muestra, se ejecutan quince (15) ciclos de carga a una frecuencia de 1 Hz con cien (100) repeticiones del esfuerzo cíclico para cada ciclo de carga, registrando la deformación recuperable a las últimas cinco (5) repeticiones del esfuerzo aplicado. La norma indica un rango de frecuencias permitidas para la realización del ensayo, el cual va desde 0.31 Hz

hasta 10 Hz²⁹. Varios autores han estudiado la influencia de la frecuencia de carga en el comportamiento resiliente de materiales granulares, encontrando que esta no afecta el comportamiento de los materiales. Dentro de estos se encuentran Kalcheff y Hicks (1973), los cuales “observaron que el cambio en la respuesta resiliente de cuatro materiales granulares bien gradados es mínimo cuando se ensayan en un rango de frecuencias de carga entre 0.04 y 10 Hz”³⁰. Para el ensayo descrito, se ejecutó los quince (15) ciclos de carga dados por la norma invias 156-07. Los ciclos ejecutados se encuentran descritos en la siguiente tabla:

Tabla 14 Ciclos ejecutados en el ensayo de módulo resiliente para material SBG-1

Serie	Presión de cámara σ_3		Máximo esfuerzo axial desviador σ_d		Esfuerzo cíclico σ_c		Esfuerzo constante 0.01		Nº de aplicaciones de carga
	kPa	Lb/pulg ²	kPa	Lb/pulg ²	kPa	Lb/pulg ²	kPa	Lb/pulg ²	
0	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	500-100
1	20.7	3	20.7	3	18.6	2.7	2.1	0.3	100
2	20.7	3	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
3	20.7	3	62.1	9	55.9	8.1	6.2	0.9	100
4	34.5	5	34.5	5	31.0	4.5	6.5	0.5	100
5	34.5	5	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	34.5	5	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
7	68.9	10	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
8	68.9	10	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
9	68.9	10	206.8	30	186.1	27.0	27	3.0	100
10	103.4	15	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
12	103.4	15	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
13	137.9	20	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
14	137.9	20	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
15	137.9	20	275.8	40	248.2	36	27.6	4	100

Fuente: Norma INVIAS – tabla N.3 INV E 156-07

³⁰ KALCHEFF, I.V. y HICKS, R.G. A test Procedure for Determining the Resilient Properties of Granular Materials. 1993. Citado en REYES, Fredy Alberto y RONDÓN, Hugo Alexander. Comportamiento de materiales granulares en pavimentos flexibles. Bogotá. 2008. p. 49.

Prueba de corte, al finalizar la prueba del espécimen se aplica una presión de confinamiento de 34.5 kPa al espécimen. Se aplica carga axial por el método de deformación controlada a una velocidad de 1% de deformación por minuto. Se continúa cargando hasta que la carga decrezca con un incremento de deformación, o hasta que se alcanza el 5% de deformación, o hasta que la capacidad de la celda de carga sea alcanzada. En el caso de las muestras ensayadas, se produjo el incremento de carga hasta la falla de la muestra, ver Ilustración 9.

Ilustración 9 Falla de espécimen en cámara triaxial



Fuente: Propia

Ilustraciones del procedimiento realizado se encuentra numerado por orden de ejecución; cada paso se especifica en la norma correspondiente.

RESULTADOS

Luego de realizar los ensayos de módulo resiliente para cada una de las humedades establecidas, y las regresiones potenciales para calcular los coeficientes K1 y K2 que caracterizan la función de comportamiento del módulo

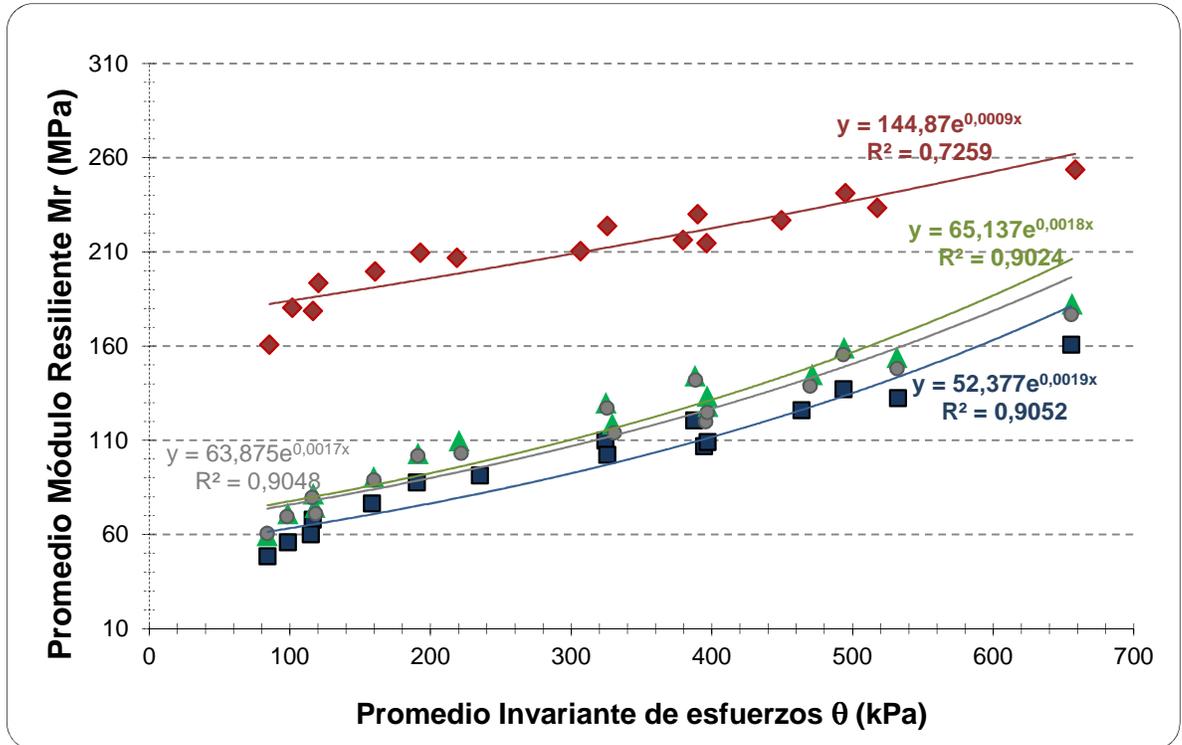
resiliente en función de la invariante de esfuerzos, se obtuvieron los resultados que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 15 Resultado de los coeficientes K1, K2 y R2 de las muestras ensayadas

Dosificación (%)	TIPO	Humedad (%)	K1	K2	R2
ORIGINAL	M1	8,5	6.2165	0.4936	0.963
	M2		5.1953	0.5299	0.977
	M3		4.1576	0.5529	0.969
45%-20%-35%	D1	10,80	112.00	0.1241	0.806
	D1		171.53	0.0981	0.727
	D1		6.3510	0.5147	0.980
40%-35%-25%	D2	11,20	7.229	0.4894	0.979
	D2		8.240	0.4729	0.971
	D2		7.139	0.4996	0.973
50%-25%-25%	D3	10,85	9.422	0.4518	0.986
	D3		6.955	0.4873	0.956
	D3		7.013	0.4932	0.959

En el Gráfico 25 se observa el incremento del MR en la D1 con relación al material original y a las dosificaciones D2 y D3 en 100 Mpa, lo que nos indica que dicha dosificación es la que nos presenta un mejor comportamiento mecánico entre sus partículas.

Gráfico 25 Promedio Invariante de esfuerzos vs Promedio módulo resiliente



Fuente: Propia

En la Tabla 16 se presenta el resumen de los resultados obtenidos promedio de Módulo resiliente y las Invariantes de esfuerzos de cada material, teniendo como material de referencia el original y las dosificaciones D1, D2 y D3.

Tabla 16 Resumen ensayo de módulo resiliente

ORIGINAL		D1		D2		D3	
PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO
Módulo Resiliente s d / e r	Invariante de esfuerzos q	Módulo Resiliente s d / e r	Invariante de esfuerzos q	Módulo Resiliente s d / e r	Invariante de esfuerzos q	Módulo Resiliente s d / e r	Invariante de esfuerzos q
0	0	0	0	0	0	0	0
108.3	391.8	186.7	401.1	133.5	396.8	119.9	395.7
51.1	84.9	150.8	85.1	59.5	83.9	60.6	83.9
57.5	99.4	168.4	101.9	71.2	98.6	69.6	97.9
70.7	117.1	179.3	120.9	81.7	116.8	79.7	115.7
63.0	115.2	165.4	118.0	74.5	117.8	71.1	118.4
80.0	158.7	183.0	162.5	90.6	159.7	89.1	159.6
90.2	190.6	189.1	194.5	103.1	191.1	101.8	190.9
94.7	243.4	184.8	222.8	109.9	220.4	103.2	221.7
112.5	324.6	194.6	328.0	130.0	324.7	127.1	325.4
120.1	387.5	198.5	392.1	144.4	388.2	142.0	388.3
106.0	324.8	185.0	326.8	118.9	329.2	114.0	330.7
111.1	397.4	187.7	398.8	128.2	397.1	124.8	396.8
140.1	493.7	202.4	497.0	159.3	494.0	155.5	493.4
130.3	463.3	193.1	474.1	145.1	471.3	138.9	469.9
137.5	532.7	195.8	534.4	154.1	531.7	148.0	531.6
161.3	656.2	209.8	659.6	182.6	656.0	176.8	655.5

Fuente: Propia

Con la utilización de todos los puntos obtenidos por las diferentes dosificaciones, los valores promedio de K_1 , K_2 y R^2 productos de una regresión potencial en escala exponencial fueron los siguientes.

Tabla 17 Resultado de los coeficientes K1, K2 y R2 correspondientes al promedio de las muestras ensayadas

Dosificación (%)	Promedio	Humedad (%)	K1	K2	R2
ORIGINAL	M1	8,5	52.377	0.0018	0.9052
45%-20%-35%	D1	10,80	144.87	0.0009	0.7959
40%-35%-25%	D2	11,20	65.137	0.0018	0.9024
50%-25%-25%	D3	10,85	63.875	0.0017	0.9048

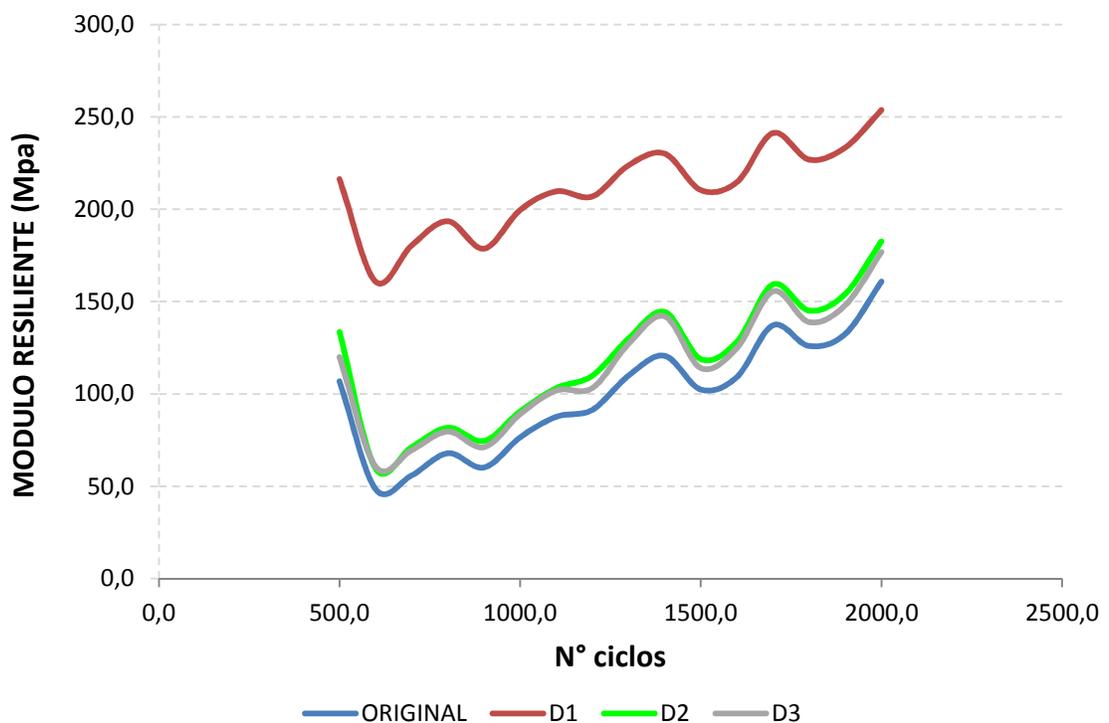
Los valores de MR obtenidos para las diferentes dosificaciones se pueden atribuir al efecto que tienen los esfuerzos y el tipo de grano que conforme el material, ya que las probetas fueron ensayadas para condiciones de humedad, saturación y masa unitaria óptima según el diseño establecido. Además se puede evidenciar que las dosificación D1 presenta mayor módulo debido a la granulometría que tiene dicha mezcla de material. Un valor de MR varía más en una matriz granular de suelos con poco contenido de material fino.

Tabla 18 Resultados coeficientes promedios para MR

Material	w%	K1	K2	R2	Mr θ100Kpa	Mr θ150Kpa	Mr θ200Kpa
Original	8.50	52.377	0.0018	0.9052	52.81	52.85	52.88
Dosificación 1 - D1	10.80	144.87	0.0009	0.7959	145.47	145.52	145.56
Dosificación 2 - D2	11.20	65.137	0.0018	0.9024	65.68	65.73	65.76
Dosificación 3 - D3	10.85	63.875	0.0017	0.9048	64.38	64.42	64.45

Se observa en el Gráfico 26 la evolución al paso de ciclos de cargas para los cuales fue ensayado el material original y las diferentes dosificaciones. En los cambios de esfuerzos de confinamiento hay aumento de MR y en especial en la D1 donde se presenta un aumento significativo comparado con el material original y las Dosificaciones D2 y D3.

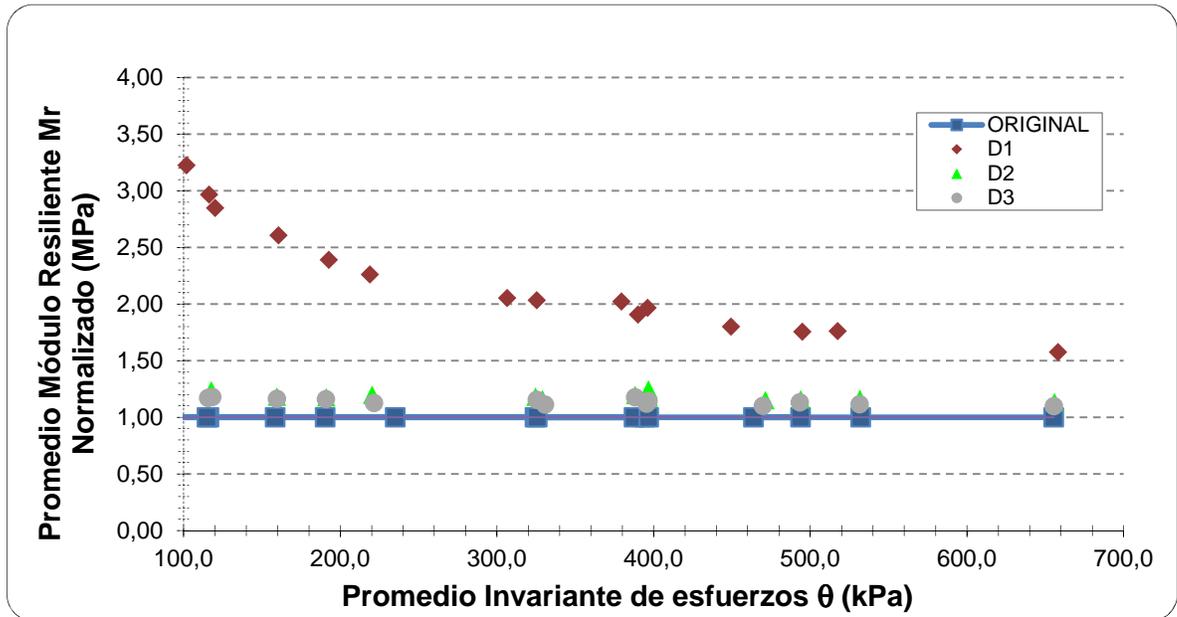
Gráfico 26 Variación de MR para 2000 ciclos de carga



Fuente: Propia

El Gráfico 27, módulo normalizado con el valor de MR de material original deja ver la variación del parámetro dinámico con respecto a las demás dosificaciones donde se observa claramente que en la D1 el aumento del MR con respecto al original es de aproximadamente de 3.2 veces mayor, además se observa que el comportamiento del MR de las demás dosificaciones no varían significativamente.

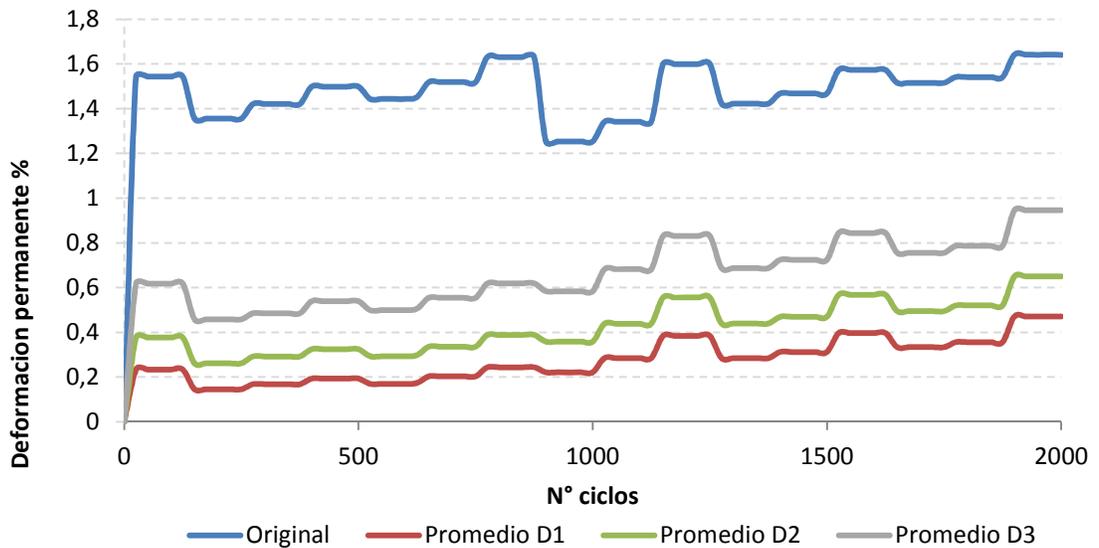
Gráfico 27 Promedio Invariante de esfuerzos vs Promedio módulo resiliente normalizado



Fuente: Propia

Los resultados obtenidos en el ensayo de deformación permanente permitieron identificar 3 fases de comportamiento para los cuatro materiales ensayados, los cuales se presentan a continuación en el Gráfico 28 y Gráfico 29.

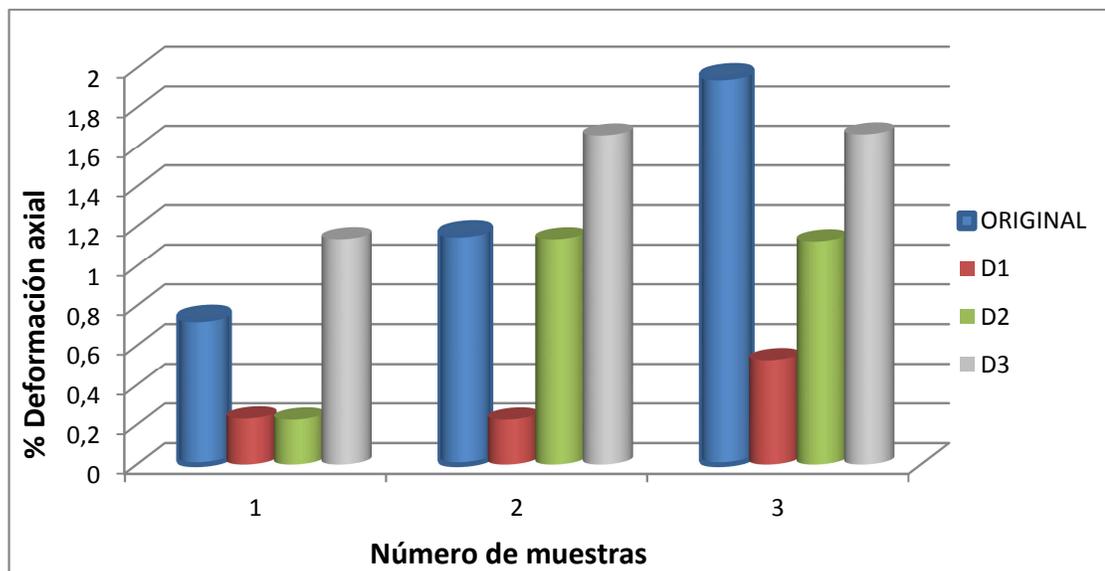
Gráfico 28 Comportamiento promedio de la deformación permanente vs Número de ciclos de carga



Fuente: Propia

Donde se observa un cambio en la disminución de la deformación con respecto al material original, esto puede deberse a las características mecánicas de los materiales empleados, sin embargo la D1 es la que presenta un mejor comportamiento con relación a las demás dosificaciones empleadas.

Gráfico 29 Deformación permanente



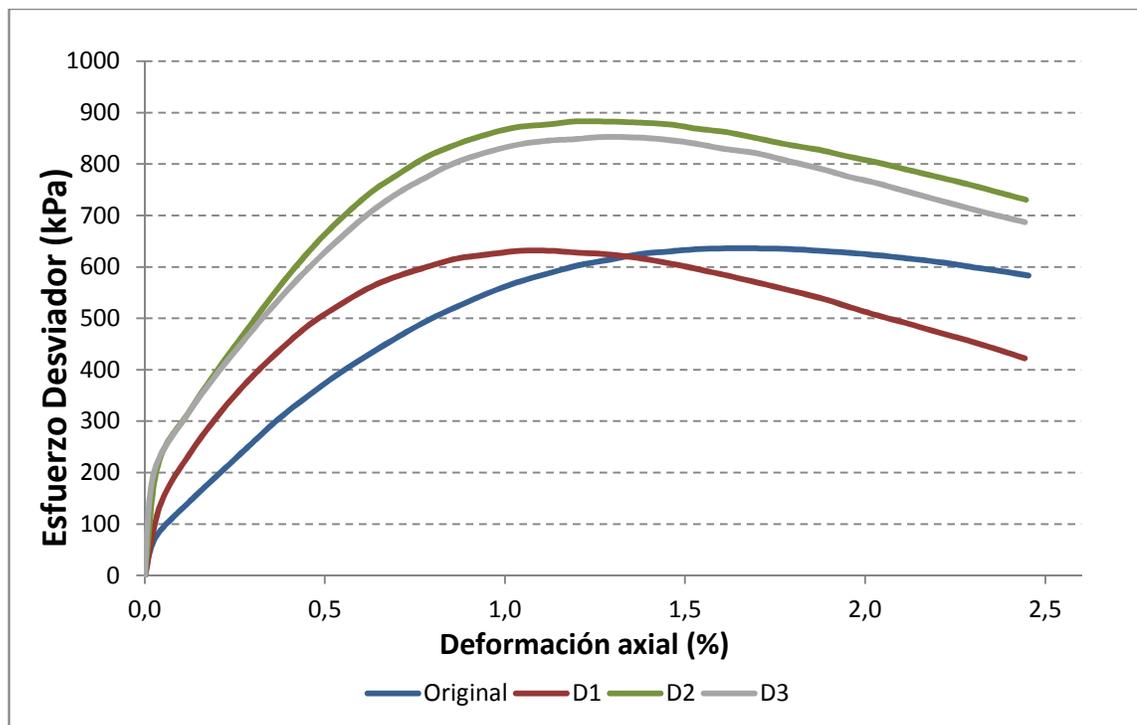
Fuente: Propia

Luego de ejecutar las 15 secuencias enunciadas en la Tabla 14 a cada una de las dosificaciones, se realizó la prueba de corte rápido o compresión confinada, donde “se evalúa el comportamiento de resistencia del material bajo carga estática”³¹. Para cada una de las dosificaciones, se realizaron 3 pruebas de corte es decir una para cada muestra. A partir de los 3 ensayos, se obtuvo valores medios en la prueba de corte los cuales son graficados y se presentan a continuación en la.

³¹ VACCA, Hermes. RODRÍGUEZ, Jorge. RUIZ, Mauricio. Análisis del comportamiento del módulo resiliente con respecto a la variación de energía de compactación y contenido de humedad para suelos granulares del área de Bogotá D.C. XVI Simposio Colombiano sobre ingeniería de pavimentos (2007, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales). p 13.

Como se puede observar en la gráfica, la resistencia del material obtenido a partir del corte rápido, aumenta en la D2 y en la D3 diferente a la muestra original y a la D1, la cual era la que presentaba un buen comportamiento mecánico entre sus partículas, es decir que aunque esta dosificación presenta un incremento en el MR, y la deformación permanente es baja, su resistencia disminuye y esto se puede deber a el desgaste del material y la absorción de los agregados.

Gráfico 30 Promedio esfuerzo desviador vs promedio deformación axial



Fuente: Propia

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se observa una disminución en la deformación permanente (50%) en las probetas evaluadas para las dosificaciones D1 y D2 con respecto al material original, sin embargo para la dosificación D3 dicho comportamiento aumentó con respecto al original, esto se estima debido a los puntos de discontinuidad en la curva granulométrica definida para esta dosificación.

El MR a partir de las distintas dosificaciones y en particular la dosificación D1 compuesta por 45% de material original, 20% de grava de trituración y 35% de arena de trituración, presentó un aumento de tres veces el MR con respecto al material original. Este aumento del MR se evidencia para las dosificaciones de concreto hidráulico restantes pero en menor proporción.

Se observó una disminución en las densidades para las tres dosificaciones con respecto al original, sin embargo el parámetro de CBR aumentó 241% para D1, 226% para D2 y 172% para D3, esto evaluado a la máxima energía de compactación.

Se evidenció que las gravedades específicas medidas para los materiales reciclados disminuyen notablemente con respecto al material original (de 2.60 a 2.50 aproximadamente) y la absorción tiende a aumentar, esto consecuentemente se ve reflejado en la disminución de la masa unitaria seca máxima obtenida en el método de compactación modificada, al igual que el aumento de la humedad óptima del mismo ensayo en los materiales con adiciones de material reciclado.

Se recomienda que para futuras investigaciones la universidad UGC, adquiera el equipo de vibración para poder cumplir con las especificaciones de la del Instituto nacional de vías INVIAS, en su actualización para la norma INV E 156 – 13 - Modulo resiliente en suelos y agregados, teniendo en cuenta que esta

investigación se desarrolló bajo la norma INV E 156 - 07 ya que el laboratorio de la universidad cuenta no con el equipo de compactación vibratoria.

Para investigaciones futuras se recomienda un mayor análisis de los materiales granulares usados en carretera reutilizando así materiales de desecho que son el resultado de los diferentes procesos constructivos con el fin de obtener un mejor comportamiento mecánico de estos materiales y ayudando así con la mitigación del impacto ambiental.

10. BIBLIOGRAFÍA

RONDON, A. REYES, F. Comportamiento de los materiales granulares en pavimentos flexibles. Universidad Católica de Colombia. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C. 2008.

VACCA, H. RODRÍGUEZ, J. RUIZ, M. Análisis del comportamiento del módulo resiliente con respecto a la variación de energía de compactación y contenido de humedad para suelos granulares del área de Bogotá D.C. XVI Simposio Colombiano sobre ingeniería de pavimentos. 2007.

FONSECA A, J. GARCIA M, C. Análisis del comportamiento del módulo Resiliente con respecto a la variación del contenido de húmedas para un material sub-base granular tipo SBG-1 del área de Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana. 2008.

GARNICA, P. Espectros de carga y daño para diseño para pavimentos. Sociedad Mexicana de ingeniería geotécnica. Quinta Conferencia magistral “Alfonso Rico Rodríguez”. 2011

LEAL NORIEGA, M. Relación del módulo resiliente hallado por retrocalculo y el encontrado en ensayos de laboratorio. Universidad Nacional de Colombia. 2010.

LÓPEZ, D. Variabilidad del módulo resiliente de una mezcla asfáltica MDC-2 dentro de la ventana de diseño propuesta por Witczak. Manizales, Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Junio 2008.

MONZON CH., J. Influencia del comportamiento viscoso de arcillas sobre el módulo resiliente y la deformación permanente de subrasante. 2012.

BERDUGO, I. Relaciones de fase. Conceptos básicos y aplicaciones, ecuación 31.a. Bogotá, 2000.

RONDON, A. REYES, F. Deformación permanente de materiales granulares en pavimentos Flexibles: Estado del conocimiento. Publicación Revista Ingeniería Universidad de Medellín. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. DNP. Consejo Nacional de Política Económica y Social. Documento CONPES 3761. Cuarta generación de concesiones viales. Proyectos pioneros. 2013.

DIAGNE, M. TINJUM, J. NOKKAEW, K. The effects of recycled clay brick content on the engineering properties, weathering durability, and resilient modulus of recycled concrete aggregate. University of Wisconsin-Madison. Transportation Geotechnics 3 (2015) 15–23.

VIDAL, J., OSORIO, R, Comportamiento resiliente de suelos fino granulares. Revista Universidad EAFTI. 2006.

FRANQUISIA DIDENSA S.A. Catálogo de productos: agregados. Ecuador. 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 122 - 13. Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 123 - 13. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 125 - 13. Determinación del límite líquido de los suelos. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 126 - 13. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 133 - 13. Equivalente de arena de suelos y agregados finos. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 142 - 13. Relaciones de humedad – Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación). 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 148 - 13. CBR de los suelos compactados en el laboratorio sobre muestra inalterada. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 156 - 07. Módulo Resiliente de suelos y agregados. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 218 - 13. Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños menores a 37.5mm (1 1/2”) por medio de la máquina de los ángeles. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 219 - 13. Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños mayores a 19mm (3/4”) por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 222 - 13. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción en agregado fino. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 223 - 13. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción en agregado grueso. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma I.N.V.E - 235 - 13. Valores de azul de metileno en agregados finos. 2013.

11. ANEXOS