

**ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE BASES
GRANULARES PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE BUCARAMANGA**

**ANDRÉS FELIPE MEZA MESA
SULEY VIVIANA QUITIAN CUESTA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2018**

**ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE BASES
GRANULARES PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE BUCARAMANGA**

**ANDRÉS FELIPE MEZA MESA
SULEY VIVIANA QUITIAN CUESTA**

**Trabajo de Grado modalidad investigativa
Para optar por el Título de:
Ingeniero Civil**

**Director
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
Ph. D en Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por haberme guiado, acompañado y dado la fortaleza para superar aquellos obstáculos que se presentaron en la realización de este gran logro de mi vida, gran parte de esta felicidad se la debo a él, Gracias.

A mi familia, en especial a mi madre Virginia Del Carmen Cuesta Salgado por haber estado conmigo en los momentos más complejos, guiándome y apoyándome incondicionalmente, diciendo siempre que todo estaría bien y que hay que confiar en Dios, Madre este triunfo es nuestro, pues llevamos muchos años juntas luchando por esto, me siento muy bendecida por Dios por ser tu hija, a ti te debo todo lo que fui, soy y seré, Te Amo Madre. A mi única hermana Ester Loyola Quitian Cuesta por siempre estar muy atenta de mí, por su ayuda emocional y económica, por aconsejarme y querer siempre lo mejor para mí, gracias hermanita usted es muy importante para mí. Y también a mi padre y hermanos que fueron un apoyo.

A Roque Julio Pico Hernández porque su ayuda fue fundamental, ha estado conmigo en los momentos difíciles. Este proyecto no fue fácil, pero estuvo motivándome, escuchándome y acompañándome cuando creía que todo estaba perdido.

A mi compañero de proyecto de grado Andrés Felipe Meza Mesa ya que a pesar de los obstáculos y dificultades en el transcurso de este proyecto pudimos alcanzar los logros propuestos.

A todas aquellas personas que me ayudaron a hacer realidad este sueño, en especial, a mis amigas Laura Esperanza Fuentes Sánchez por haber estado conmigo apoyándome desde el comienzo de este ciclo y a Silvia Lorena Serrano Bravo por estar siempre ayudándome, pues fueron unas piezas claves en este logro.

¡Muchas gracias por todo!

Suley Viviana Quitian Cuesta

*A Dios
Por guiarme y darme la sabiduría para saber enfrentar este camino y brindarme la
oportunidad de crecer como persona y profesional, y por esas personas que
desafortunadamente ya no están junto a mí, pero fueron fundamentales en cada
paso que di.*

*A mi madre y padre
Por enseñarme que la humildad nos hace grandes, por su cariño y apoyo
incondicional durante cada paso de mi vida, por ser los que más creen en mí.
Gracias por enseñarme que primero está el ayudar a los demás antes de un
beneficio propio.*

*A mi hermana
Por darme la alegría que necesita mi vida, por ser ese motor y esas ganas de salir
adelante con el único fin de regalarle una sonrisa.*

*A mi familia, amigos y compañeros
Por siempre estar presentes, tener las palabras correctas, los abrazos y apoyo
incondicional cuando más lo necesite, porque cuando me sentía solo, confundido
o triste siempre aparecían y me regalaban una sonrisa que me llenaba de fuerza
para seguir adelante.*

*A la vida
Por enseñarme con el paso de los años que no hay nada más lindo y gratificante
que regalar amor a los demás sin esperar nada a cambio.*

¡Gracias!

Andrés Felipe Meza M.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto de investigación agradecen a:

La Universidad Industrial de Santander por habernos permitido hacer parte de su alma mater y hacer de nosotros unas personas con más ética y principios, fue un orgullo hacer parte de esta prestigiosa universidad.

A Nuestro director de Proyecto de Investigación Ph D. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón que con su dedicación y conocimiento pudo guiarnos durante la realización de este proyecto.

A todas aquellas personas que nos ayudaron a hacer realidad este gran sueño como la secretaria de la Escuela de Ingeniería Civil Sonia Ayala Corzo por su ayuda y motivación y los laboratoristas de la Universidad Industrial de Santander, como el señor German Hernández, Álvaro Novoa y Jairo Hernández que nos ayudaron y guiaron.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. RECOPIACIÓN BIBLIOGRAFICA	18
1.1. PAVIMENTO FLEXIBLE	18
1.2. BASES GRANULARES	18
1.3. CLASES DE BASE GRANULAR	19
1.4. REQUISITOS DE CALIDAD PARA LOS AGREGADOS.	19
1.5. ENSAYO GRANULOMÉTRICO.....	20
1.6. ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO	22
1.7. MODULO RESILIENTE DE AGREGADOS	24
2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL	32
2.1. SELECCIÓN DE MUESTRAS	32
2.2. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL.....	33
2.3. DENSIDAD DE LAS MUESTRAS.....	35
2.4. MODULO RESILIENTE	38
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
3.1. MODELOS CONSTITUTIVOS.....	44
3.2. FIABILIDAD DE LOS MODELOS	46
3.3. CALIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS BASES GRANULARES.....	49
4. RECOMENDACIONES	52
5. CONCLUSIONES.....	53
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	55

BIBLIOGRAFIA.....58
ANEXOS.....59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Corte Transversal de un pavimento flexible.....	19
Figura 2: Porción de muestra de base granular.....	22
Figura 3: Materiales usados para el ensayo de Proctor Modificado.....	23
Figura 4: Proceso de Compactación.....	24
Figura 5: Tipo de onda requerida para el ensayo de módulo resiliente	25
Figura 6: Etapa de acondicionamiento de la muestra.....	28
Figura 7: Cantera río Chicamocha.....	33
Figura 8: Análisis granulométrico Muestra 1	34
Figura 9: Análisis granulométrico Muestra 2.....	35
Figura 10: Análisis del ensayo de proctor modificado para la base Granular BG - 25 A	36
Figura 11: Análisis del ensayo de proctor modificado para la base granular BG - 25 B	37
Figura 12: Esfuerzo Bulk Vs Módulo resiliente de la base BG - 25 A	42
Figura 13: Esfuerzo Bulk Vs Módulo resiliente de la base BG - 25 A	44
Figura 14: Comparación de los módulos en condición de humedad óptima.....	50
Figura 15: Comparación de los módulos en condición saturada.....	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Uso típico de las diferentes clases de base granular	19
Tabla 2: Diámetros nominales en mm (pulg).....	21
Tabla 3: Secuencia de cargas para Base Granular	29
Tabla 4: Densidades secas y porcentaje de humedad.....	37
Tabla 5: Densidad seca y porcentaje de compactación de las muestras	38
Tabla 6: Materiales y Equipos usados para el ensayo de Modulo Resiliente	39
Tabla 7: Modulo resiliente y esfuerzo Bulk para base granular BG-25 A, en condiciones de humedad optima y saturada.....	41
Tabla 8: Modulo resiliente y esfuerzo Bulk para base granular BG-25 B, en condiciones de humedad óptima y saturada.....	43
Tabla 9: Coeficiente de determinación para la base BG-25 A en condición de humedad óptima	47
Tabla 10: Coeficiente de determinación para la base BG-25 A en condición saturada.....	47
Tabla 11: Coeficiente de determinación para la base BG-25 B en condición de humedad óptima	48
Tabla 12: Coeficiente de determinación para la muestra de base granular BG – 25 en condición Saturada	48
Tabla 13: Valores de módulo resiliente	51
Tabla 14: Valores de módulo resiliente	52

LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Requisitos que deben satisfacer los agregados de base granular	59
Anexo B: Franjas granulométricas a las cuales deben ajustarse las bases granulares	61
Anexo C: Secuencia de esfuerzos que se deben tener en cuenta para el acondicionamiento de la muestra.	62
Anexo D: Análisis del ensayo de proctor modificado para la base granular BG - 25 A	63
Anexo E: Análisis del ensayo de proctor modificado para la base granular BG-25 B	64
Anexo F: Procedimiento empleado para el uso de la maquina Triaxial Cíclica	65

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE BASES GRANULARES PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA.*

AUTOR(ES): ANDRÉS FELIPE MEZA MESA
SULEY VIVIANA QUITIAN CUESTA**

PALABRAS CLAVE: Pavimento Flexible, Base Granular, Modulo resiliente, Granulometría, Proctor Modificado, Triaxial cíclico

DESCRIPCIÓN:

Este artículo busca hacer una ampliación del conocimiento que se tiene de la variación del módulo resiliente y de la ecuación constitutiva del módulo resiliente para materiales granulares sometidos a cargas dinámicas y usadas en la construcción de pavimentos flexibles en el Área Metropolitana de Bucaramanga. Para la realización de este artículo se buscó muestras granulares alteradas y se procedió a la realización de los ensayos pertinentes como lo son el ensayo granulométrico para poder clasificar nuestras bases granulares, posterior a esto se realiza el ensayo de proctor modificado para lograr obtener la humedad óptima del material, para así poder simular las condiciones reales de campo, y con esta humedad óptima se compacto el material. Luego se procedió a la realización del ensayo de módulo resiliente para suelos y agregados (INV E- 156-13) tanto con una muestra en condición de humedad optima previamente obtenida y una muestra en condición saturada de cada muestra de base granular, con los resultados obtenidos se pudo determinar el valor del módulo resiliente y posteriormente por ajustar cada valor a una ecuación constitutiva que se ajustara a cada resultado, donde se concluyó que para los diseños en la ciudad de Bucaramanga no se recomienda regirse por los valores sugeridos por la guía AASHTO.

*Trabajo de investigación

**Facultad de ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de ingeniería civil, Director: Eduardo Castañeda

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE VARIATION OF THE RESILIENT MODULE OF GRANULAR BASES FOR FLEXIBLE PAVEMENTS IN THE METROPOLITAN AREA OF BUCARAMANGA.

AUTHOR(S): ANDRÉS FELIPE MEZA MESA
SULEY VIVIANA QUITIAN CUESTA

KEYWORDS: Flexible Pavement, Granular Base, Resilient Module, Granulometry, Modified Proctor, Cyclic Triaxial

DESCRIPTION:

This article seeks to extend the knowledge of the variation of the resilient module and the constitutive equation of the resilient module for granular materials. Some dynamic loads and used in the construction of flexible pavements in The Metropolitan Area of Bucaramanga. In order to carry out this article, we looked for altered granular samples and proceeded to perform the relevant tests, such as the granulometric test to classify our granular bases, after which the modified proctor test was performed to obtain the optimum humidity of the material, with the In order to be able to simulate the actual conditions of the field, with this optimum humidity the material is compact. The test of elastic modules for soils and aggregates (INV E-156-13) was carried out, both with a sample in condition of optimum humidity previously obtained and a sample in saturated condition of each sample of granular base, With the results obtained it was possible to determine the value of the resilient module and later to adjust each value to a constitutive equation that is adjusted to each result, where it was concluded that for the designs in the city of Bucaramanga it is not recommended to register the values suggested by the AASHTO guide.

*Work research

**Faculty of physical-mechanics science, Civil Engineering School, Director: Eduardo Castañeda

INTRODUCCIÓN

En Colombia se viene presentando una gran inversión por parte de los últimos gobiernos en el mejoramiento de vías y construcción de nuevos trazados, prueba de ello son las concesiones 4G que está promoviendo el gobierno nacional con la cual se espera que el rezago en materia de infraestructura vial ya que dicho atraso restará competitividad y productividad a la hora de enfrentar un mercado abierto; pero no solo basta con invertir una importante suma de dinero, se debe ejecutar vías que cumplan con las demandas requeridas por el parque automotor y el crecimiento exponencial que este viene presentando en los últimos años, dadas estas condiciones los nuevos corredores viales deberán estar en la capacidad de soportar cargas móviles mucho mayores para poder garantizar de esta forma la durabilidad de estos proyectos al transcurrir de los años. [1]

En Colombia se han adoptado métodos empíricos para el diseño de pavimentos basados en los resultados de CBR (California Bearing Ratio) para los materiales granulares. Sin embargo, se han venido presentando cambios en la tecnología de pavimentos, donde se han aceptado métodos mecanísticos o estructurales debido a la introducción de nuevas técnicas de construcción, alternativas de materiales y procesos.

El propósito de este proyecto es implementar el ensayo INV E-156-13 Método de ensayo para determinar el módulo resiliente de suelos y agregados como método alternativo para la caracterización por CBR de materiales granulares y también poder ver la variación de este valor según la gradación del material que se usa frecuentemente en el área metropolitana de Bucaramanga. [2]

Para poder garantizar el buen comportamiento del pavimento, es necesario que los materiales que lo conforman cumplan con todas las características y

especificaciones técnicas estipuladas por el INVIAS. En los métodos de dimensionamiento de pavimentos flexibles, el módulo resiliente es una de las variables que se consideran al definir la contribución estructural de los materiales.

El módulo resiliente es un ensayo que mide la rigidez de materiales particulados que no es una propiedad constante del material, sino que depende de muchos factores. Los principales son: tipo de material, número de aplicaciones del esfuerzo, tixotropía, magnitud del esfuerzo desviador, método de compactación, condiciones de compactación, peso específico, granulometría, contenido de agua, etc.[3]

1. RECOPIACIÓN BIBLIOGRAFICA

1.1. PAVIMENTO FLEXIBLE

Un pavimento flexible es aquella estructura que se deflecta total o se flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. El uso de pavimentos flexibles se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como pueden ser vías, aceras o parkings.

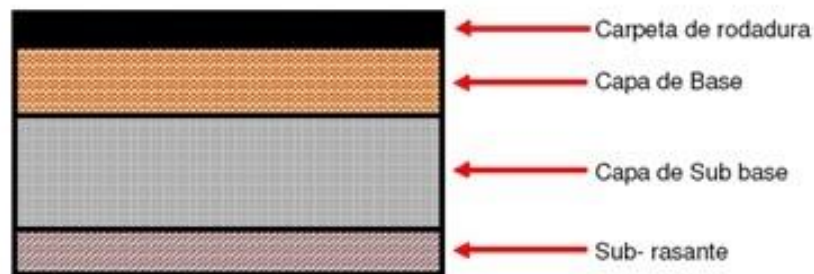
Las capas de un pavimento flexible que conforman un suelo se colocan en orden descendente en capacidad de carga. La capa superior es la que mayor capacidad de soportar cargas tiene de todas las que se disponen. Por lo tanto la capa que menos carga puede soportar es la que se encuentra en la base. La durabilidad de un pavimento flexible no debe ser inferior a 8 años y normalmente suele tener una vida útil de 20 años.

Las capas de un pavimento flexible suelen ser: capa superficial o capa superior que es la que se encuentran en contacto con el tráfico rodado y que normalmente ha sido elaborada con varias capas asfálticas. La capa base es la capa que está debajo de la capa superficial y está, normalmente, construida a base de agregados y puede estar estabilizada o sin estabilizar. La capa sub – base es la capa o capas que se encuentra inmediatamente debajo de la capa base. [4]

1.2. BASES GRANULARES

La base granular es la capa que está localizada entre la subbase granular y las capas asfálticas en los pavimentos asfálticos. Debido a su proximidad con la superficie, posee alta resistencia a la deformación, para soportar las altas presiones que recibe. Se construye con materiales granulares procesados o estabilizados. Se utiliza para la conformación de las estructuras de pavimentos. [5]

Figura 1: Corte Transversal de un pavimento flexible



Fuente: Morales Rosales, 2007

1.3. CLASES DE BASE GRANULAR

Las bases granulares según el INVIAS se clasifican en función del nivel de tránsito para ejes equivalentes de 80 KN en el carril de diseño, como se muestra en la Tabla 1. [6][7]

Tabla 1: Uso típico de las diferentes clases de base granular

CLASE DE BASE GRANULAR	EJES EQUIVALENTES
CLASE C	$< 0.5 \times 10^6$
CLASE B	$0.5 \times 10^6 < 5.0 \times 10^6$
CLASE A	$> 5.0 \times 10^6$

Fuente: Instituto Nacional de Vías, Artículo 330

1.4. REQUISITOS DE CALIDAD PARA LOS AGREGADOS.

Los agregados para la construcción de la base granular deberán satisfacer los requisitos indicados en el numeral 300.2 del artículo 300 para dichos materiales.

[Ver anexo 1] se muestran algunos de los requisitos que deben cumplir los agregados de base granular.

Los agregados de base granular se deberán ajustar a alguna de las franjas granulométricas que se indican en [Ver Anexo 2]. [6]

1.5. ENSAYO GRANULOMÉTRICO

El análisis de granulometría (INV E-123) tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo, determinando los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el 75 μm (No. 200).

Para realizar el análisis granulométrico se debe tener una serie de tamices ordenados de la siguiente forma como se muestra en la Tabla 2. [8]

Tabla 2: Diámetros nominales en mm (pulg)

Diámetro nominal en mm (pulg)	
50.8 (2")	2 (No. 10)
36.1 (1 ½")	0.84 (No. 20)
25.4 (1")	0.42 (No. 40)
19.0 (¾")	0.25 (No. 60)
12.7 (½")	0.149 (No. 100)
9.5 (⅜")	0.074 (No. 200)
4.75 (No. 4)	Pasa 200

Fuente: INV E - 123

El análisis granulométrico de una muestra se realiza con una pequeña porción de ésta como se muestra en la Figura 2.

Figura 2: *Porción de muestra de base granular*



1.6. ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO

Este método de ensayo de proctor modificado (INV E-142-13), se emplea para determinar la relación entre la humedad y la masa unitaria de los suelos compactos, cuando se tienen muestras alteradas.

Para la ejecución del proyecto se empleó un molde de diámetro 152,4 mm (4") y altura de 116,43 mm, un martillo de 4,54 Kg (10 lb) que cae desde una altura de 457 mm (18") y demás elementos necesarios para la buena ejecución de dicho ensayo, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3: Materiales usados para el ensayo de Proctor Modificado



Se forma una muestra compactando el suelo humedecido en el molde en cinco capas aproximadamente iguales, compactando cada capa mediante 56 golpes del martillo, distribuidos uniformemente, como se muestra en la Figura 4. [9]

Figura 4: *Proceso de Compactación*



Para obtener la curva humedad-densidad seca, se realizó el ensayo sobre cuatro sub-muestras de cada base granular, que dieron los puntos que permitieron graficar dicha curva.

1.7. MODULO RESILIENTE DE AGREGADOS

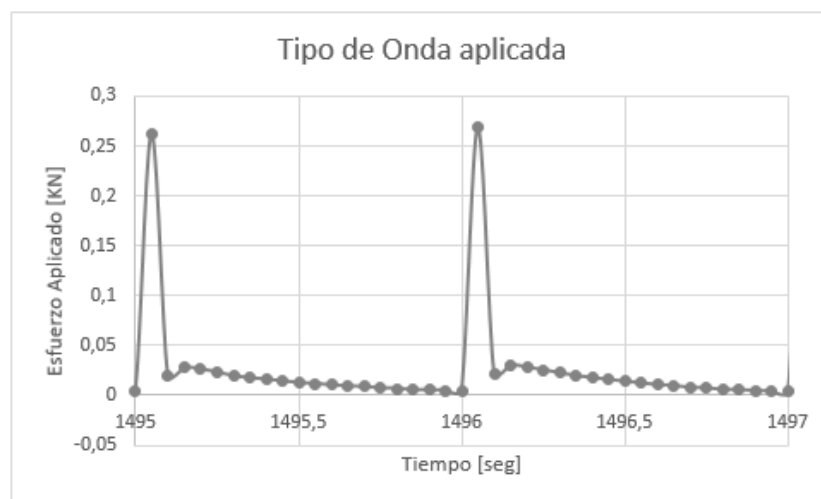
El módulo resiliente de un suelo o agregado es la relación entre el esfuerzo aplicado al material y su deformación recuperable. La norma de ensayo INV E-156-13 describe los procedimientos para la determinación del módulo de resiliencia de materiales granulares de base. Incluye la preparación de las muestras y el ensayo bajo condiciones que simulan, razonablemente, las características físicas y los estados de esfuerzos de los materiales en pavimentos flexibles sometidos a las cargas móviles del tránsito.

Los valores del módulo resiliente se pueden emplear en conjunto con modelos de análisis de respuesta estructural, tanto para valorar la respuesta de los materiales ante la acción de las cargas, como para diseñar estructuras de pavimentos.

Para determinar el valor del módulo resiliente, se aplica un esfuerzo axial cíclico repetido, de magnitud, duración (0.1 s) y frecuencia fijas, a un espécimen cilíndrico de ensayo, debidamente preparado y acondicionado. Durante y entre las aplicaciones del esfuerzo dinámico desviador, el espécimen está sometido a un esfuerzo estático en su contorno, proporcionado por medio de una cámara de presión triaxial. Se mide la deformación axial total resiliente (recuperable) de respuesta del espécimen y se calcula el módulo resiliente relacionando el esfuerzo axial desviador con la deformación unitaria axial resultante.

Un ciclo de carga está constituido por un pulso de duración 0,1 segundos de forma medio seno verso y un descanso entre cargas de 0,9 s. Como se muestra en la Figura 5.

Figura 5: Tipo de onda requerida para el ensayo de módulo resiliente



El esfuerzo axial máximo aplicado ($S_{\text{máx}}$) es el esfuerzo total aplicado a la muestra, que incluye el esfuerzo de contacto y el esfuerzo cíclico, como se muestra en la ecuación (1).

$$S_{\text{máx}} = \frac{P_{\text{máx}}}{A} \quad (1)$$

Donde,

A: Sección transversal inicial del espécimen

El esfuerzo axial cíclico (S_{ciclico}) es el esfuerzo vertical cíclico (resiliente) aplicado en cada serie contemplada en la prueba, como se muestra en la ecuación (2)

$$S_{\text{ciclico}} = \frac{P_{\text{ciclico}}}{A} \quad (2)$$

El esfuerzo de contacto (S_{contacto}) es el esfuerzo axial aplicado a la muestra, que se mantiene durante la prueba para asegurar el contacto entre la platina cabezal y el espécimen, como se muestra en la ecuación (3) y (4)

$$S_{\text{contacto}} = \frac{P_{\text{contacto}}}{A} \quad (3)$$

$$S_{\text{contacto}} = 0,1 * S_{\text{máx}} \quad (4)$$

El esfuerzo radial total (S_3) es la presión de confinamiento aplicada en la cámara triaxial (esfuerzo principal intermedio y menor).

La deformación axial resiliente (ϵ_r) es la deformación axial resiliente (recuperada) debida a S_{ciclico}

La deformación unitaria axial resiliente (ϵ_r) es la deformación unitaria axial resiliente (recuperada) debida a S_{ciclico} como se muestra en la ecuación (5)

$$\epsilon_r = \epsilon_r / L \quad (5)$$

Donde,

L: Longitud inicial de la muestra de ensayo

El módulo resiliente (M_r) es la relación entre las amplitudes del esfuerzo axial repetido y de la deformación unitaria axial resultante, como se muestra en la ecuación (6)

$$M_r = \frac{Sciclico}{\epsilon_r} \quad (6)$$

El acondicionamiento de la muestra es para la eliminación de los efectos del intervalo entre la compactación y la carga, y la eliminación de la carga 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.

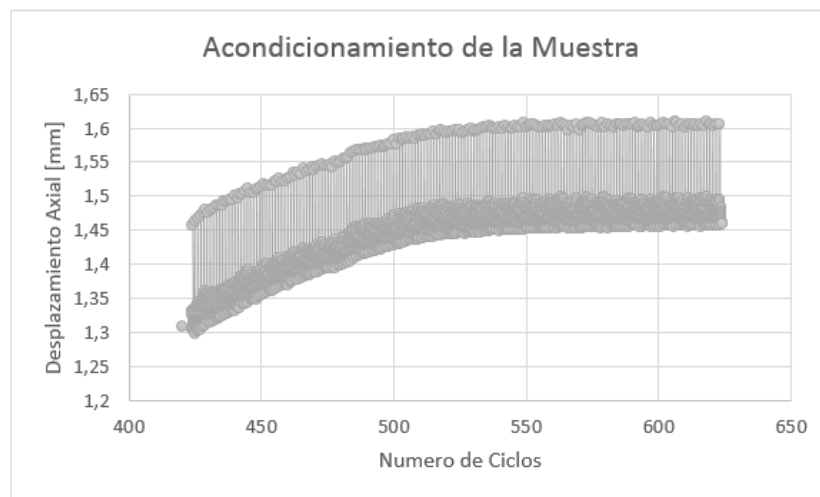
Se debió colocar una presión de confinamiento y aplicar un mínimo de 500 repeticiones de una carga equivalente al máximo esfuerzo axial y el correspondiente al esfuerzo cíclico, de acuerdo con la secuencia 0 de la Tabla 156-2 de la INV E-156-13 [Ver Anexo C] [10]

En la etapa de acondicionamiento aunque no sirve para determinar el módulo resiliente del material es indispensable porque permite llevar el material a un estado de resiliencia, es decir el material a ensayar luego de esta secuencia entra en un estado donde tiende a comportarse elásticamente y para que el material de base granular llegue a comportarse de esta manera la deformación recuperada que sufre el material luego del cese de la carga aplicada sobre ella debe ser la misma

deformación total que sufre el material justo en el momento de aplicación de la carga. [11]

En la Figura 6 se logra apreciar como el material luego de recibir una secuencia de cargas logra entrar en su estado de resiliencia.

Figura 6: Etapa de acondicionamiento de la muestra



Si la muestra está experimentando disminución de longitud al final de las 500 repeticiones, se deberá continuar hasta completar 1000. Si la deformación permanente total alcanza 5% durante el acondicionamiento, el proceso de acondicionamiento se debe terminar. Se debe repasar el proceso de compactación para identificar las razones por las cuales la muestra no alcanzo una compactación apropiada.

Para la realización del ensayo de modulo resiliente se debieron ingresar unos valores de carga constate y carga ciclica correspondientes a los esfuerzos aplicados en cada uno de los diferentes ciclos como lo indica la norma INV E-156-13.

Para la buena practica del ensayo del modulo resiliente para agregados se recomienda seguir el procedimiento descrito en [Ver Anexo F].

En la Tabla 3 se muestra los valores de carga constante y carga ciclica que se deben tener en cuenta para cada una de las secuencias de carga. [9]

$$Carga\ Constante [KN] = Esfuerzo\ Cte * Area$$

$$Carga\ Ciclica [KN] = Esfuerzo\ Ciclico * Area$$

Tabla 3: Secuencia de cargas para Base Granular

Secuencia de cargas para Base Granular				
Secuencias	Esfuerzo Cíclico [kPa]	Esfuerzo Constante [kPa]	Carga Cíclica [kN]	Carga Cte. [kN]
0	93,1	10,3	0,73121	0,08090
1	18,6	2,1	0,14608	0,01649
2	37,3	4,1	0,29295	0,03220
3	55,9	6,2	0,43904	0,04869
4	31	3,5	0,24347	0,02749
5	62	6,9	0,48695	0,05419
6	93,1	10,3	0,73121	0,08090
7	62	6,9	0,48695	0,05419
8	124,1	13,8	0,97468	0,10838
9	186,1	20,7	1,46163	0,16258
10	62	6,9	0,48695	0,05419
11	93,1	10,3	0,73121	0,08090
12	186,1	20,7	1,46163	0,16258
13	93,1	10,3	0,73121	0,08090
14	124,1	13,8	0,97468	0,10838
15	248,2	27,6	1,94936	0,21677

El módulo resiliente se calcula a partir de las ecuaciones 7,8 y 9 establecidas en la norma INV E 156-13:

$$Mr(\text{kPa}) = \frac{\text{Sciclico}}{\epsilon_r} \quad (7)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r}{L} \quad (8)$$

$$\Theta = (3 * S3) + Smax \quad (9)$$

Donde:

Θ = Esfuerzo bulk, es la suma de los esfuerzos principales y corresponde al esfuerzo de compresión en todas las direcciones

S3 = Presión de cámara definida para cada secuencia de aplicación de carga.

Smax = Esfuerzo desviador. Corresponde a la suma del Sciclico más el esfuerzo de contacto (Scontacto)

El módulo resiliente es cambiante y para describir ese cambio se utilizan ecuaciones que podrían indicar como cambia la rigidez cuando se modifican las condiciones de la prueba. A continuación se describen los modelos o ecuaciones que intentan describir la variación del valor de rigidez con los esfuerzos impuestos durante la ejecución del ensayo triaxial. [10]

Modelo 1. Hicks y Monismith, 1971, es la ecuación (10) más utilizada dada a su simplicidad a la hora de calcular el módulo resiliente. [12]

$$Mr = k1 * \theta^{K2} \quad (10)$$

Donde,

M_r = Modulo resiliente del material

Θ = Esfuerzo bulk, es la suma de los esfuerzos principales y corresponde al esfuerzo de compresión en todas las direcciones

k_1, k_2 = Constantes del modelo matemático

Modelo 2. El national cooperative highway research program (NCHRP) y Yau y Von Quintus plantearon el siguiente modelo. (11) [13]

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3} \quad (11)$$

M_r = Modulo resiliente del material

Θ = Esfuerzo bulk, es la suma de los esfuerzos principales y corresponde al esfuerzo de compresión en todas las direcciones

k_1, k_2, k_3 = Constantes del modelo matemático

P_a = Presión atmosférica que equivale a 101,325 kPa

τ_{oct} = Esfuerzo *cortante octahedrico* (12)

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} * ((s_3 - s_3 + s_{max})^2 + (s_3 + s_{max} - s_3)^2 + (s_3 - s_3)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

S_3 = Presión de cámara definida para cada secuencia de aplicación de carga.

S_{max} = Esfuerzo desviador. Corresponde a la suma del Sciclico más el esfuerzo de contacto ($S_{contacto}$)

Modelo 3. Este modelo es muy parecido al modelo 1 involucrando al esfuerzo bulk (Θ) pero al mismo tiempo involucra el esfuerzo desviador, como se aprecia en la ecuación 13. [11]

$$M_r = A \theta^{k_1} \sigma_d^{k_2} \quad (13)$$

M_r = Modulo resiliente del material

Θ = Esfuerzo bulk, es la suma de los esfuerzos principales y corresponde al esfuerzo de compresión en todas las direcciones

k_1, k_2 = Constantes de regresión

σ_d =esfuerzo desviador. Es el mismo S_{max} , corresponde a la suma del Scíclico más el esfuerzo de contacto ($S_{contacto}$)

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Este proyecto de investigación consistió en el estudio de la variación del módulo resiliente de bases granulares para pavimentos flexibles en el área metropolitana de Bucaramanga, para la realización de dicho proyecto se hizo el estudio de dos bases granulares de diferentes composiciones granulométricas. Con dichas muestras granulares alteradas se procedió a la preparación de las mismas para poder así simular lo que se presenta en campo como se indica en el numeral 6.3 del INV-E 156-13 de INVIAS. Dado que no se tiene información relacionada a la densidad y humedad del material, las muestras debieron ser sometidas a los ensayos de granulometría (INV E-123), proctor modificado (INV E-142-07), una vez se pudo determinar la densidad y humedad óptima de las muestras se procedió a realizar el ensayo del módulo resiliente (INV E-156) para cada muestra.

2.1. SELECCIÓN DE MUESTRAS

La fuente principal de agregado para bases granulares que se usa actualmente para la construcción y mantenimiento de pavimentos en el área metropolitana de Bucaramanga es la cantera del río Chicamocha, como se puede evidenciar en la Figura 7.

Figura 7: Cantera río Chicamocha



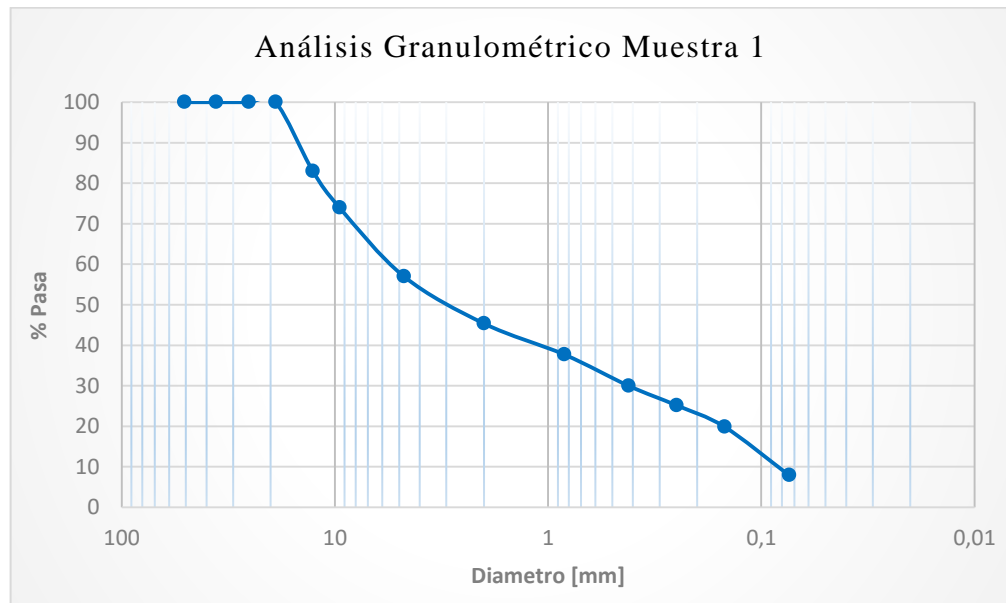
Fuente: Arenera Chicamocha S.A.S.

Para el desarrollo del Proyecto de Grado se obtuvo un tipo de muestra de base granular que fue proporcionada por la empresa Arenera Chicamocha S.A.S., ya que para el desarrollo del proyecto se requería de dos muestras diferentes de base granular, una de estas fue la muestra con la gradación original que se le llamó Muestra 1 y la otra fue la que se diseñó de acuerdo a las franjas establecidas por el INVIAS [Ver Anexo B] y a esta se le llamó Muestra 2, nombres que fueron dados para identificarlas.

2.2. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL

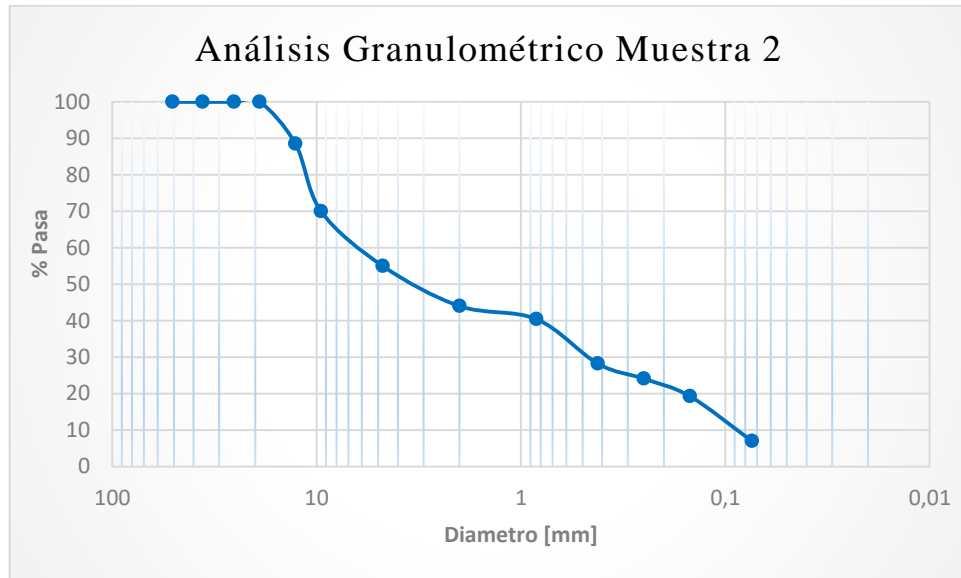
Para la realización de este ensayo se procedió a tamizar una porción de la Muestra 1 con un peso de 5000 gr donde se obtuvo la siguiente configuración granulométrica como se muestra en la Figura 8, a partir de esto se pudo determinar que la Muestra 1 se clasifica según la Tabla 330-3 del Art. 330 de INVIAS [Ver Anexo B], que es una base granular BG-25 A.

Figura 8: Análisis granulométrico Muestra 1



Para la Muestra 2 se tomó una porción de 6800 gr, donde se obtuvo la siguiente configuración granulométrica como se muestra en la Figura 9, a partir de esto se determinó que la muestra se clasifica según la tabla 330-3 del Art. 330 de INVIAS [Ver anexo B], que es una base granular BG-25 B.

Figura 9: Análisis granulométrico Muestra 2

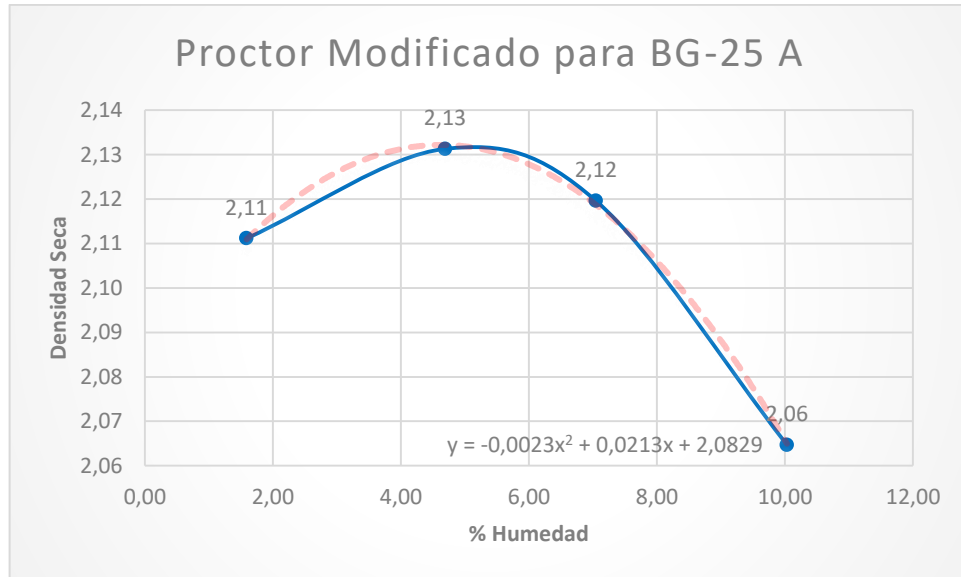


2.3. DENSIDAD DE LAS MUESTRAS

Para definir la densidad de las muestras en la prueba de módulo resiliente, se practicaron ensayos de Compactación Proctor, se estableció el valor de humedad óptima de compactación y su máxima densidad. Los cuerpos de prueba fueron compactados con humedad óptima y mediante impactos con energía similar a la del Proctor Modificado.

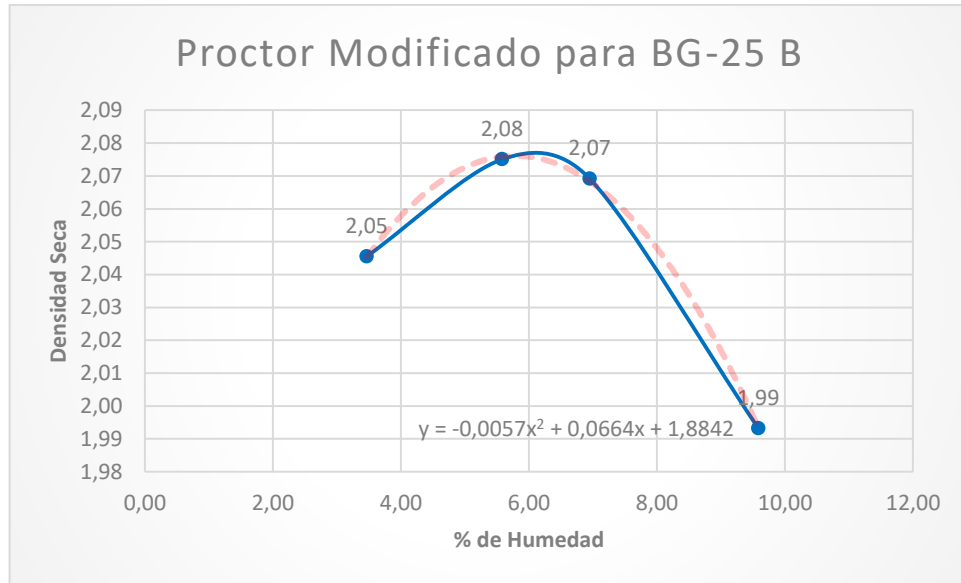
El resultado en la muestra BG-25 A [Ver anexo D], se muestra en la Figura 10.

Figura 10: Análisis del ensayo de proctor modificado para la base Granular BG - 25 A



Los resultados para la muestra BG-25 B [Ver anexo E], se muestran en la Figura 11.

Figura 11: Análisis del ensayo de proctor modificado para la base granular BG - 25 B



A partir de las gráficas obtenidas en las Figuras 8 y 9 se pudo establecer el valor de densidad seca y porcentaje de humedad óptima para cada una de las muestras de base granular, resultados que se pueden apreciar en la Tablas 4.

Tabla 4: Densidades secas y porcentaje de humedad

Muestra	Densidad Seca (gr/cm ³)	% W
BG – 25 A	2,13	4,9
BG – 25 B	2,075	5,8

Las muestras ensayadas en módulo resiliente presentaron unas densidades secas y porcentajes de compactación como se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5: Densidad seca y porcentaje de compactación de las muestras

Muestra	Densidad Seca (gr/cm³)	% Compactación
BG – 25 A	2,18	1,02
BG – 25 B	2,19	1,06

2.4. MODULO RESILIENTE

Se utilizaron dos muestras (BG-25 A y BG-25 B) para cada una de estas fue necesario la realización de tres etapas, la primera en la cual la muestra tiene una humedad optima y se le aplicaron las secuencias de cargas establecida por la norma INV E 156-13 Tabla 156-2. En la segunda etapa la muestra entro en un proceso de saturación y consolidación para simular una situación crítica que podría presentar el suelo. En la tercera etapa la muestra saturada y consolidada previamente se le fue aplicada la misma secuencia de cargas que en la primera etapa.

Para la realización del ensayo fue necesario la utilización de los siguientes materiales y equipos como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Materiales y Equipos usados para el ensayo de Modulo Resiliente

NOMBRE	IMAGEN
<p>Materiales para el acondicionamiento de la muestra (membrana, piedras porosas, ligas, tubo de succión, etc.)</p>	
<p>Cámara Triaxial</p>	

<p>Controladores Hidráulicos</p>	 Two hydraulic control units are shown side-by-side. Each unit consists of a vertical wooden frame with a pressure gauge at the top and a digital display in the middle. The displays show numerical values and some text. Below the displays are hydraulic cylinders with pistons. Various hoses and electrical wires are connected to the units.
<p>Controlador Digital</p>	 A digital controller unit is shown, which is a rectangular metal box. It has several ports on the front panel, including a power jack, a USB port, and several signal ports. Numerous cables are plugged into these ports, and the unit is sitting on a surface.
<p>Depósito de Almacenamiento de Agua</p>	 A water storage tank is shown, which is a clear plastic container filled with water. It is mounted on a metal stand. The tank is rectangular and has a lid. The stand has four legs and a central support structure.



En las siguientes tablas (Tabla 7 y Tabla 8,) se muestran los resultados de Módulo resiliente bajo diferentes condiciones de esfuerzo (BG-25 A y BG-25 B)

Tabla 7: *Modulo resiliente y esfuerzo Bulk para base granular BG-25 A, en condiciones de humedad optima y saturada*

Secuencia	BG-25 A Condición humedad óptima		BG-25 A Condición saturada	
	Θ [kPa]	Mr [kPa]	Θ [kPa]	Mr [kPa]
1	83	29585	78,2	35083
2	102,5	37019	115,1	170232
3	144	45477	125,8	145186
4	128,1	19901	141,5	188532
5	203,6	81247	182,3	173198
6	218,3	88027	218	156565
7	259,3	46532	278,9	163459
8	382,7	106806	393	166664
9	518,2	135296	459,4	158191
10	394,5	80847	385,1	158191
11	421,7	98453	446,3	166731
12	596,2	175061	599	173153
13	529,5	114757	540,9	176986
14	555,8	121822	587,1	176679
15	798,6	213251	813,1	186326

En la Figura 12 se puede observar la dispersión de puntos obtenida al realizar el ensayo del modulo resiliente en condición de humedad optima y saturada con la maquina Triaxial Ciclica y su respectiva linea de tendencia potencial y ecuación representativa de dicha linea para la base granular BG – 25 A.

Figura 12: Esfuerzo Bulk Vs Módulo resiliente de la base BG - 25 A

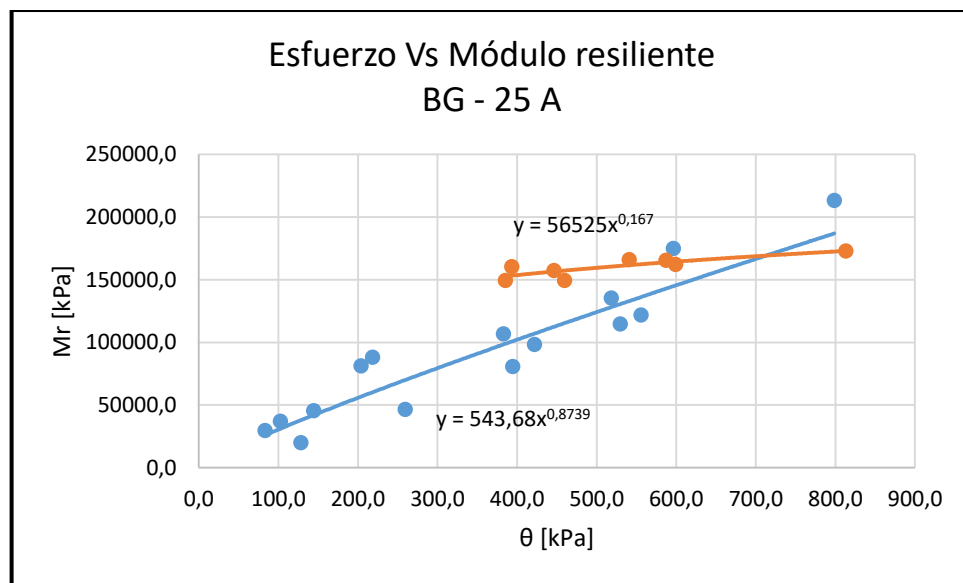
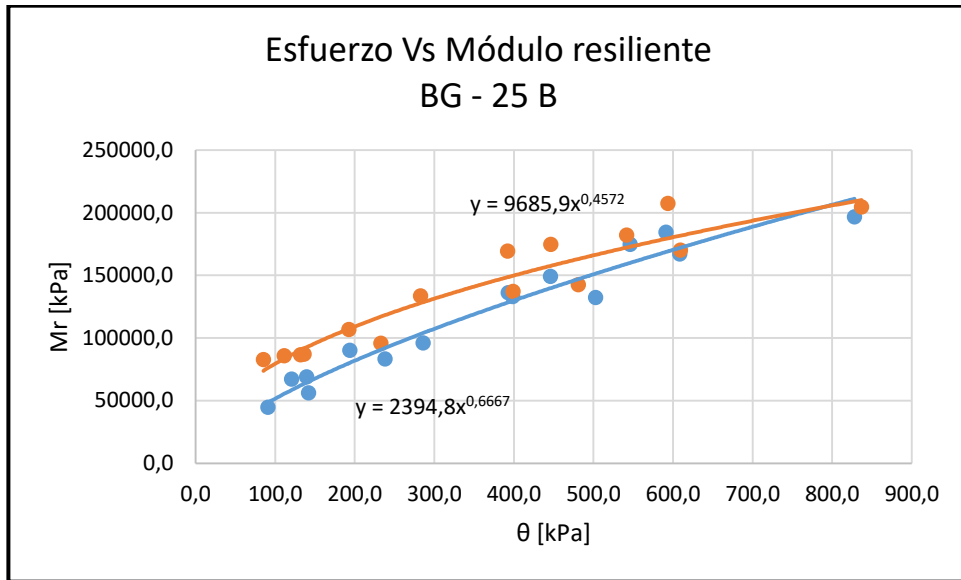


Tabla 8: Modulo resiliente y esfuerzo Bulk para base granular BG-25 B, en condiciones de humedad óptima y saturada

Secuencia	BG-25 B Condición humedad óptima		BG-25 B Condición saturada	
	Θ [kPa]	Mr [kPa]	Θ [kPa]	Mr [kPa]
1	90,9	44722	85	82697
2	120,4	67079	111,4	85692
3	139,5	68967	131,7	96608
4	141,9	56199	136,1	87111
5	193,9	90017	192,6	106612
6	237,9	83201	232,8	95803
7	285,8	95847	282,5	133618
8	398,5	132938	399	137005
9	502,8	132217	481,1	142549
10	392,9	136022	392	169154
11	446,1	149116	446,4	174765
12	608,2	166862	609,1	169952
13	546,2	174587	541,8	182148
14	591	184405	593,7	207389
15	827,8	196512	836,9	204570

En la Figura 13 se puede observar la dispersion de puntos obtenida al realizar el ensayo del modulo resiliente en condición de humedad optima y saturada con la maquina Triaxial Ciclica y su respectiva linea de tendencia potencial y ecuación representativa de dicha linea para la base granular BG – 25 B.

Figura 13: Esfuerzo Bulk Vs Módulo resiliente de la base BG - 25 A



3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en los resultados se establecieron ecuaciones o modelos constitutivos que permiten calcular el valor de Módulo resiliente del material de acuerdo con los niveles de esfuerzos aplicados. Se estableció la fiabilidad de las ecuaciones y adicionalmente se compara los resultados con valores usuales de materiales de bases granulares empleados en pavimentación.

3.1. MODELOS CONSTITUTIVOS

Modelo 1.

La ecuación 14 obtenida del modelo matemático para el ensayo del módulo resiliente al material BG-25 A en condición de humedad óptima

$$Mr = 543,7 * \theta^{0,873} \quad (14)$$

La ecuación 15 obtenida del modelo matemático para el ensayo del módulo resiliente al material BG-25 A en condición saturada

$$Mr = 56525 * \theta^{0,167} \quad (15)$$

La ecuación 16 obtenida del modelo matemático para el ensayo del módulo resiliente al material BG-25 B en condición de humedad optima

$$Mr = 2394,8 * \theta^{0,667} \quad (16)$$

La ecuación 17 obtenida del modelo matemático para el ensayo del módulo resiliente al material BG-25 B en condición saturada

$$Mr = 9685,9 * \theta^{0,457} \quad (17)$$

Modelo 2.

La ecuación 18 obtenida del modelo matemático para el ensayo del módulo resiliente al material BG-25 A en condición de humedad optima

$$Mr = 288,6 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,349} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{1,373} \quad (18)$$

La ecuación 19 obtenida del modelo matemático para el ensayo del módulo resiliente al material BG-25 A en condición saturada

$$Mr = 960,8 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,356} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,16} \quad (19)$$

La ecuación 20 obtenida del modelo matemático para el ensayo del módulo resiliente al material BG-25 B en condición de humedad optima

$$Mr = 466,9 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,641} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{0,127} \quad (20)$$

La ecuación 21 obtenida del modelo matemático para el ensayo del módulo resiliente al material BG-25 B en condición saturada

$$Mr = 913,65 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,506} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,252} \quad (21)$$

Modelo 3.

La ecuación 22 obtenida del modelo matemático para el ensayo del módulo resiliente al material BG-25 A en condición de humedad optima

$$Mr = 1398,3 * \theta^{0,489} * \sigma_d^{0,275} \quad (22)$$

La ecuación 23 obtenida del modelo matemático para el ensayo del módulo resiliente al material BG-25 A en condición saturada

$$Mr = 49185 * \theta^{0,22} * \sigma_d^{-0,033} \quad (23)$$

La ecuación 24 obtenida del modelo matemático para el ensayo del módulo resiliente al material BG-25 B en condición de humedad optima

$$Mr = 2677,06 * \theta^{0,548} * \sigma_d^{0,108} \quad (24)$$

La ecuación 25 obtenida del modelo matemático para el ensayo del módulo resiliente al material BG-25 B en condición saturada

$$Mr = 4056,15 * \theta^{1,01} * \sigma_d^{-0,485} \quad (25)$$

3.2. FIABILIDAD DE LOS MODELOS

El coeficiente de determinación (R^2), de las ecuaciones obtenidas de los modelos matemáticos, fue una medida descriptiva que sirvió para evaluar la bondad de ajuste de los modelos matemáticos a los datos obtenidos por el ensayo triaxial cíclico, ya que mide la capacidad predictiva del modelo ajustado.

El coeficiente de determinación (R^2) se calculó de acuerdo a la ecuación 26

$$R^2 = \frac{\sum(Yo - \bar{y})^2 - \sum(Yo - Ya)^2}{\sum(Yo - \bar{y})^2} \quad (26)$$

Donde;

Ya: Es el dato obtenido con la función ajustada.

Yo: Es la deflexión medida por el grupo.

\bar{y} : Es el promedio de las deflexiones medidas por el grupo. [14] [15]

En la Tabla 9 se muestra el valor obtenido del coeficiente de determinación para los diferentes modelos matemáticos de la muestra de base granular BG-25 A en condición de humedad óptima y el modelo que más se ajusta.

Tabla 9: Coeficiente de determinación para la base BG-25 A en condición de humedad óptima

BG-25 A EN CONDICIÓN DE HUMEDAD OPTIMA			
Modelo matemático	1	2	3
R^2	0,85	0,91	0,93
Modelo adecuado	3 y 2		

En la Tabla 10 se muestra el valor obtenido del coeficiente de determinación para los diferentes modelos matemáticos de la muestra de base granular BG-25 A en condición saturada y el modelo que más se ajusta.

Tabla 10: Coeficiente de determinación para la base BG-25 A en condición saturada

BG-25 A EN CONDICIÓN SATURADA			
Modelo matemático	1	2	3
R^2	0,66	0,55	0,56
Modelo adecuado	1		

En la Tabla 11 se muestra el valor obtenido del coeficiente de determinación para los diferentes modelos matemáticos de la muestra de base granular BG-25 B en condición de humedad óptima y el modelo que más se ajusta

Tabla 11: Coeficiente de determinación para la base BG-25 B en condición de humedad óptima

BG-25 B EN CONDICIÓN DE HUMEDAD OPTIMA			
Modelo matemático	1	2	3
R^2	0,95	0,91	0,89
Modelo adecuado	1		

En la Tabla 12 se muestra el valor obtenido del coeficiente de determinación para los diferentes modelos matemáticos de la muestra de base granular BG-25 B en condición saturada y el modelo que más se ajusta

Tabla 12: Coeficiente de determinación para la muestra de base granular BG – 25 en condición Saturada

BG-25 B SATURADA			
Modelo matemático	1	2	3
R^2	0,88	0,87	0,91
Modelo adecuado	3		

3.3. CALIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS BASES GRANULARES

Analizando el modelo matemático No.1, se realizó una comparación entre los materiales de base granular frecuentemente utilizados en el Área Metropolitana de Bucaramanga y los materiales utilizados en el AASHTO Road Test.

La ecuación que fue utilizada para el cálculo del módulo resiliente fue la obtenida por el modelo 1 descrito previamente, dado su similitud a la ecuación utilizada por AASHTO Road Test.

AASHTO indica para materiales en condición de humedad óptima las ecuaciones 27 y 28, y para materiales en condición saturada las ecuaciones 29 y 30. [16]

Condición de humedad óptima

$$Mr \min[psi] = 4000 * (\theta^{0,5}) \quad (27)$$

$$Mr \max[psi] = 6000 * (\theta^{0,7}) \quad (28)$$

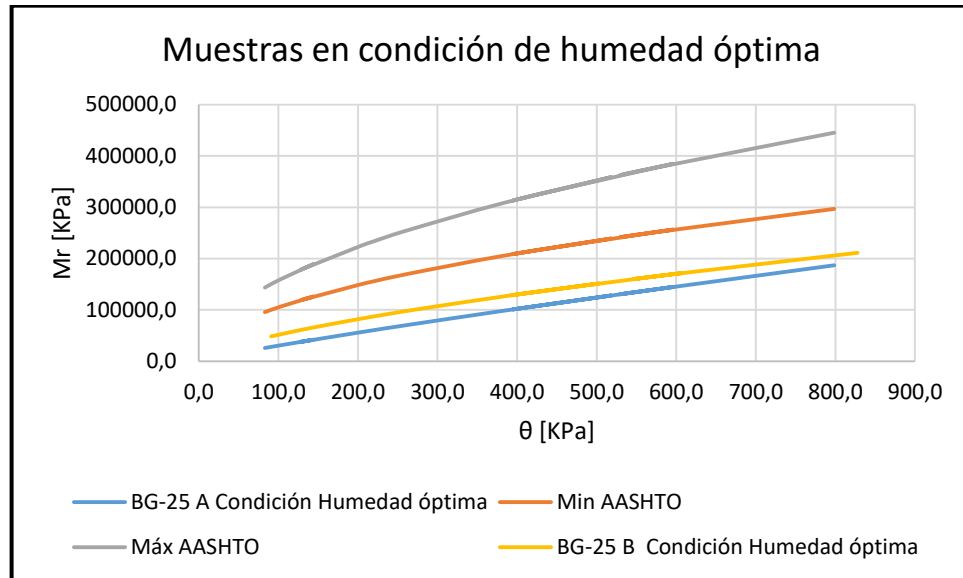
Condición Saturada

$$Mr \min[psi] = 2000 * (\theta^{0,5}) \quad (29)$$

$$Mr \max[psi] = 4000 * (\theta^{0,7}) \quad (30)$$

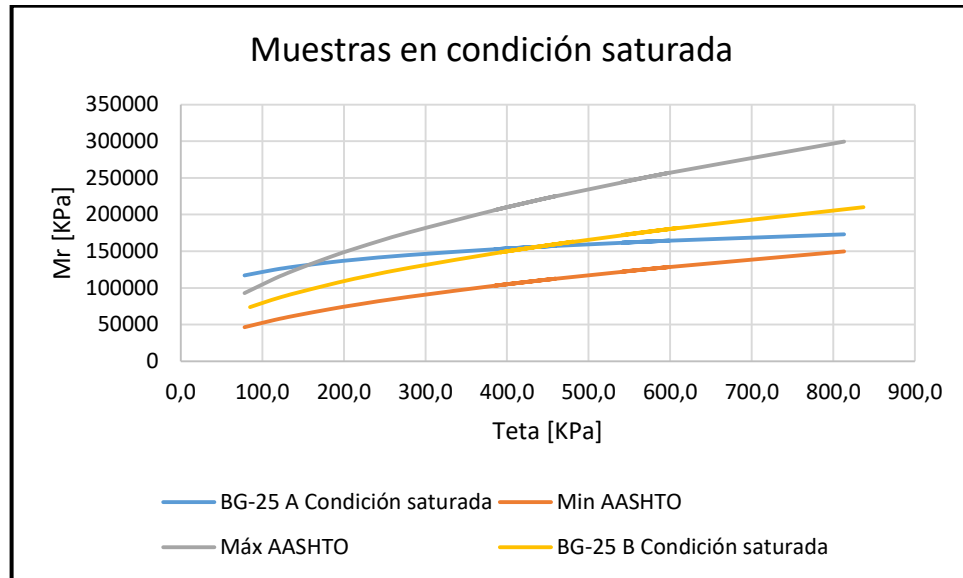
En la Figura 12 se puede apreciar la variación del módulo para las bases granulares en condición de humedad óptima usadas en el área metropolitana de Bucaramanga y las indicadas por AASHTO

Figura 14: Comparación de los módulos en condición de humedad óptima



En la Figura 13 se puede apreciar la variación del módulo para las bases granulares en condición saturada usadas en el área metropolitana de Bucaramanga y las propuestas por AASHTO

Figura 15: Comparación de los módulos en condición saturada



En la Tabla 13 se puede apreciar los valores de Modulo resiliente para las bases granulares en condición de humedad óptima calculados por el modelo matemático 1 propio y el sugerido por AASHTO para los esfuerzos bulk de 20 y 30 psi (138 y 207 kPa).

Tabla 13: Valores de módulo resiliente

Valor del módulo resiliente para muestras en condición de humedad óptima [kPa]		
Base granular	$\theta=138$ [kPa]	$\theta=207$ [kPa]
BG - 25 A	40307	57447
BG - 25 B	63963	83816
AASHTO MIN	123333	151000
AASHTO MÁX	185000	226580

En la Tabla 14 se puede apreciar los valores de Modulo resiliente para las bases granulares en condición saturada calculados por el modelo matemático 1 propio y el sugerido por AASHTO para los esfuerzos bulk de 20 y 30 psi (138 y 207 kPa).

Tabla 14: Valores de módulo resiliente

Valor del módulo resiliente para muestras en condición saturada [kPa]		
Base granular	$\sigma=138$ [kPa]	$\sigma=207$ [kPa]
BG - 25 A	120124	136379
BG – 25 B	92149	110918
AASHTO MIN	61666	75525
AASHTO MÁX	224500	298239

4. RECOMENDACIONES

- Para realizar los diseños utilizando bases granulares con agregados de la cantera del Rio Chicamocha, no se recomienda regirse por las ecuaciones de AASHTO porque con estas se podría estar sobrevalorando la capacidad mecánica de los materiales de base empleados en Bucaramanga.
- El incremento en el valor del módulo resiliente obtenido al saturar el material, podría ser un efecto no previsto al utilizar la misma muestra en dos sesiones de

prueba, la primera en condición de humedad óptima y la segunda después de un proceso de saturación. Se recomienda que en futuros estudios se realice una probeta para las medidas en condición de humedad óptima y otra para la condición saturada y así evitar efectos de acomodación de las partículas en la muestra.

- El proceso de compactación fue realizado por medio de impactos al igual que el ensayo de proctor modificado método por el cual, seguramente, se obtiene una capa superior con características de densidad diferentes a la capa inferior. Para futuros proyectos se recomienda que el proceso de compactación se realice por medio de vibración como lo aconseja la norma y que las medidas de deformación se hagan en la parte central de la probeta para reducir el efecto de problemas en el ajuste del cabezal con las caras de la probeta.

5. CONCLUSIONES

- Se establecieron y corrigieron algunas inconformidades que se venían cometiendo al configurar el equipo triaxial dinámico del laboratorio de la UIS, para realizar el ensayo de módulo resiliente ajustado a la norma INV E-156-13.
- Se establecieron para materiales que se ajustan a la especificación de construcción indicada en el Artículo 330-13 del Instituto Nacional de Vías (Tipo BG-25), modelos constitutivos para el cálculo del módulo resiliente de bases granulares con las que se construyen pavimentos, en la zona de Bucaramanga.
- Los valores obtenidos de módulo resiliente, sobre las bases granulares en condición de humedad óptima utilizadas en el área metropolitana de Bucaramanga, son menores que los valores recomendados en “AASHTO guide

for design of Pavements Structures”. El valor medido es del orden de 55% con respecto a los menores valores de la Guía AASHTO.

- Los resultados obtenidos en esta investigación son contrarios a los resultados de los estudios realizados anteriormente por Madrid y Meza (MADRID CUADRADO B. & MEZA SAAVEDRA E. M. RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE HALLADO POR RETROCALCULO Y EL ENCONTRADO EN ENSAYOS DE LABORATORIO. [TESIS]. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. BUCARAMANGA 2017).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] MINISTERIO DE COMERCIO, INDUSTRIA Y TURISMO. EL REZAGO VIAL COLOMBIANO. [EN LÍNEA].

www.tlc.gov.co/publicaciones/12913/el_rezago_vial_colombiano

[2] IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE EN BASES GRANULARES PARA PAVIMENTOS. [EN LÍNEA].

<http://investigacion.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/publicaciones/ui-07-09.pdf>

[3] MODULOS DE RESILIENCIA EN SUELOS FINOS Y MATERIALES GRANULARES. [En línea]

<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt142.pdf>

[4] PAVIMENTOS FLEXIBLES [EN LÍNEA]

<http://www.urbanismo.com/pavimentos-flexibles/>

[5] CANTERAS DE COLOMBIA – BASE GRANULAR. [EN LÍNEA].

http://www.canteradecombia.com/detalles_productos.php?codigo=5&categoria=5

[6] INVIAS E – ART. 330. BASE GRANULAR

http://constriturar.com/assets/330_base_granular.pdf

[7] NORMAS Y ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN. [En línea]

[https://www.epm.com.co/site/Portals/3/documentos/Cap%C3%ADtulo%203/NEGC%20307-00%20Carpeta_asf_\(V2013-09-26\).doc](https://www.epm.com.co/site/Portals/3/documentos/Cap%C3%ADtulo%203/NEGC%20307-00%20Carpeta_asf_(V2013-09-26).doc)

[8] NORMAS Y ESPECIFICACIONES INVIAS 2012

<ftp://ftp.ani.gov.co/Licitaci%C3%B3n%20VJVGLP%20001-2016-M-1/Normas%20de%20Ensayo%20de%20materiales%20para%20carreteras/SECCI%C3%93N%20100.pdf>

[9] INV E – 142-13 RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACION. [EN LÍNEA]

<ftp://ftp.ani.gov.co/Licitaci%C3%B3n%20VJVGLP%20001-2016-M-1/Normas%20de%20Ensayo%20de%20materiales%20para%20carreteras/SECCI%C3%93N%20100.pdf>

[10] INV E- 156-13 MODULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS. [EN LÍNEA].

<https://es.scribd.com/document/363328949/INV-E-156-13-pdf>

[11] MADRID CUADRADO B. & MEZA SAAVEDRA E. M. RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE HALLADO POR RETROCALCULO Y EL ENCONTRADO EN ENSAYOS DE LABORATORIO. [TESIS]. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. BUCARAMANGA 2017. 15 p

[12] LEAL NORIEGA MARIO HELBERTO. RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE HALLADO POR RETROCALCULO Y EL ENCONTRADO EN ENSAYOS DE LABORATORIO. [MAESTRÍA]. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. BOGOTA 2010.

<http://www.bdigital.unal.edu.co/3774/1/296497.2011.pdf>

[13] P. SOLANKI, M ZAMAN, AND A. EBRAHIMI. INTELLIGENT AND SOFT COMPUTING IN INFRASTRUCTURE SYSTEMS ENGINEERING. 2008. 124 p.

[14] COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN O ESTADÍSTICA R^2
http://virtual.uptc.edu.co/ova/estadistica/docs/libros/2007315/lecciones_html/capitulo_6/leccion1/Rcuadrado.html

[15] COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN
https://www.uv.es/webgid/Descriptiva/6_coeficiente_de_determinacin.html

[16] AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES

BIBLIOGRAFIA

INV E- 156-13 MODULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS. [EN LÍNEA].
<https://es.scribd.com/document/363328949/INV-E-156-13-pdf>

LEAL NORIEGA MARIO HELBERTO. RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE HALLADO POR RETROCALCULO Y EL ENCONTRADO EN ENSAYOS DE LABORATORIO. [MAESTRÍA]. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. BOGOTA 2010.

<http://www.bdigital.unal.edu.co/3774/1/296497.2011.pdf>

MADRID CUADRADO B. & MEZA SAAVEDRA E. M. RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE HALLADO POR RETROCALCULO Y EL ENCONTRADO EN ENSAYOS DE LABORATORIO. [TESIS]. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. BUCARAMANGA 2017

ANEXOS

Anexo A: Requisitos que deben satisfacer los agregados de base granular

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	BASE GRANULAR		
		CLASE C	CLASE B	CLASE A
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones - 100 revoluciones	E-218	40 8	40 8	35 7
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	-	30	25
Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10 % de finos - Valor en seco, mínimo (KN) - Relación húmedo/seco, mínimo (%)	E-224	- -	70 75	90 75
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18	12 18
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	-	-
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 Y E-126	3	0	0
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	30	30	30
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	E-211	2	2	2

Geometría de las partículas (F)				
Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	E-230	35	35	35
Caras fracturadas, mínimo (%)				
- Una cara	E-227	50	70	100
- Dos caras		-	50	70
Angularidad de la fracción fina, mínimo (%)	E-239	-	35	35
Resistencia del material (F)				
CBR (%): Porcentaje asociado al grado de compactación mínimo específico (numeral 330.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión	E-148	≥80	≥80	≥95

Anexo B: Franjas granulométricas a las cuales deben ajustarse las bases granulares

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm/U.S. Standard)							
	37.5	25	19	9.5	4.75	2	0.425	0.075
	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
% PASA								
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN GRUESA								
BG-40	100	75-100	65-90	45-68	30-50	15-32	7-20	0-9
BG-27	-	100	75-100	52-78	35-59	20-40	8-22	0-9
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN FINA								
BG-38	100	75-100	60-90	45-75	30-60	20-45	10-30	5-15
BG-25	-	100	70-100	50-80	35-65	20-45	10-30	5-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0%	7%			6%			3%

Anexo C: Secuencia de esfuerzos que se deben tener en cuenta para el acondicionamiento de la muestra.

Secuencia No.	Presión de cámara S ₃		Esfuerzo axial máximo S _{máx}		Esfuerzo cíclico Scíclico		Esfuerzo constante 0.1 S _{máx}		Número de aplicaciones de carga
	kPa	lbf/pg ²	kPa	lbf/pg ²	kPa	lbf/pg ²	kPa	lbf/pg ²	
0	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	500-1000
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	4.5	3.5	0.5	100
5	34.5	5	68.9	10	62	9	6.9	1	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	9	6.9	1	100
8	68.9	10	137.9	20	124.1	18	13.8	2	100
9	68.9	10	206.8	30	186.1	27	20.7	3	100
10	103.4	15	68.9	10	62	9	6.9	1	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	20.7	3	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	13.8	2	100
15	137.9	20	275.8	40	248.2	36	27.6	4	100

Anexo D: Análisis del ensayo de proctor modificado para la base granular BG - 25 A

Determinación del Contenido de Humedad de BG-25 A								
Sub-Muestras	1		2		3		4	
Cantidad de agua adicionada [ml]	50		150		260		370	
Peso de la tara [gr]	5.5	4.5	8.3	5.7	5.5	4.5	4.5	8.3
Peso de la tara + suelo húmedo [gr]	44.5	45.2	41.4	41.8	44.6	44.4	43.1	44.3
Peso de la tara + suelo seco [gr]	43.9	44.4	39.9	40.2	42	41.8	39.6	41
Peso del agua [gr]	0.6	0.8	1.5	1.6	2.6	2.6	3.5	3.3
Peso del suelo seco [gr]	38.4	39.9	31.6	34.5	36.5	37.3	35.1	32.7
Contenido de Humedad [gr]	1.56	2.01	4.75	4.64	7.12	6.97	9.97	10.09
Promedio de Humedad [gr]	1.78		4.69		7.05		10.03	

Determinación de la Densidad de BG-25 A				
Sub-Muestras	1	2	3	4
Contenido de Humedad %	1.78	4.69	7.05	10.03
Peso del molde [gr]	6514	6514	6514	6514
Peso del suelo Compactado + molde [gr]	11069	11253	11333	11339
Peso del suelo Compactado [gr]	4555	4739	4819	4825
Densidad Húmeda	2.14	2.23	2.27	2.27
Densidad Seca	2.11	2.13	2.12	2.06

Volumen del molde	
Altura	11.643
Diámetro	15.24
Volumen [cm ³]	2123.85

Anexo E: Análisis del ensayo de proctor modificado para la base granular BG-25 B

Determinación del Contenido de Humedad de BG-25 B								
Sub-Muestras	1		2		3		4	
Cantidad de agua adicionada [ml]	180		290		300		410	
Peso de la tara [gr]	8,3	5,5	4,5	5,4	5,6	4,5	5,3	8,3
Peso de la tara + suelo húmedo [gr]	46,7	44,8	43,5	44	43,2	42,3	46,3	47,2
Peso de la tara + suelo seco [gr]	45,3	43,6	41,5	41,9	40,7	39,9	42,1	44,4
Peso del agua [gr]	1,4	1,2	2	2,1	2,5	2,4	4,2	2,8
Peso del suelo seco [gr]	37	38,1	37	36,5	35,1	35,4	36,8	36,1
Contenido de agua [gr]	3,78	3,15	5,41	5,75	7,12	6,78	11,41	7,76
Promedio de Humedad [gr]	3,47		5,58		6,95		9,58	

Volumen del molde	
Altura	11,643
Diámetro	15,24
Volumen [cm ³]	2123,85

Determinación de la Densidad de BG-25 B				
Sub-Muestras	1	2	3	4
Contenido de Humedad %	3,47	5,58	6,95	9,58
Peso del molde [gr]	6514	6514	6514	6514
Peso del suelo Compactado + molde [gr]	11009	11167	11214	11153
Peso del suelo Compactado [gr]	4495	4653	4700	4639
Densidad Húmeda	2,12	2,19	2,21	2,18
Densidad Seca	2,05	2,08	2,07	1,99

Anexo F: Procedimiento empleado para el uso de la maquina Triaxial Cíclica

Procedimiento para el montaje de la muestra en la maquina triaxial
<ol style="list-style-type: none">1. Preparación de la maquina triaxial2. Conexión de manguera de presión de poros3. Conexión de manguera de succión4. Preparación de la muestra en el laboratorio5. Compactación de la muestra con humedad optima6. Montaje de la muestra en el equipo triaxial7. Aplicación de la precarga y succión8. Llenado de la cámara triaxial9. Ingreso al programa <i>GDSLAB</i> desde el equipo de computo10. Seleccionar <i>Test station</i>11. Seleccionar <i>Data save</i> y después <i>choose data file</i>12. Seleccionar <i>single directory</i> y luego <i>next</i>13. En <i>data saving format</i> seleccionar <i>Standar GDSLAB</i>14. Se registra el nombre del archivo y se guarda en la carpeta <i>GDSLAB Disco local C</i>15. Se procede con la aplicación de cargas
Aplicación de cargas
<ol style="list-style-type: none">1. Seleccionar <i>add test</i>2. Seleccionar <i>GDS_ttDynamic_loading</i>3. Seleccionar <i>create new test stage</i> y '<i>OK</i>'4. Seleccionar en <i>test type, Dynamic cyclic (load-KN)</i>5. Se procede a ingresar la frecuencia de aplicación de carga en <i>frecuency</i>6. Se ingresan los datos de Amplitud y Datum correspondientes a cada ciclo según la norma7. Se registra la presión de cámara correspondiente a la secuencia8. Se registra el número de ciclos y los puntos graficados por el programa9. Se cierra la llave de contrapresión en cero (0 KN) y se abre la llave de presión de poros10. Seleccionar <i>go to test</i> para iniciar el ensayo11. Se exportan los resultados a Excel
Etapas de saturación y consolidación
<ol style="list-style-type: none">1. Se abren las llaves de presión y contrapresión2. Seleccionar <i>GDS_ttSatcon</i>3. Se ingresa el valor de presión y contrapresión junto con el tiempo de saturación4. Se verifica el grado de saturación de la muestra5. Se procede a la etapa de consolidación de la muestra6. Se selecciona <i>create new test stage</i> y se escoge <i>consolidation</i>7. Luego se selecciona <i>go to test</i> y se configuran las graficas8. Finalmente se comprueba que las presiones hayan llegado a las presiones establecidas8. Nuevamente se procede a cargar la muestra como se explica anteriormente (Aplicación de cargas)