

**Determinación del comportamiento del módulo resiliente en bases granulares utilizadas en
la ciudad de Bucaramanga**

Jordan Said Pérez Mercado

Jorge Luis Quintana Vanegas

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

Director:

Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

Doctor en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

Primeramente, darle las gracias a Dios por su constante ayuda y apoyo, por la vida, Por esta gran experiencia que me ayudo a crecer como persona y profesionalmente y por permitirme cumplir este logro de graduarme como Ingeniero Civil.

Seguidamente a mi familia, principalmente a mis padres por su comprensión, ayuda y por hacer parte directa de este proyecto. Y a los demás familiares que con su aporte por más pequeño que fuese contribuyeron con la realización de este, mi proyecto de vida.

A mi compañera de vida, porque a pesar de las dificultades siempre conté con su voz de aliento, porque en ningún momento flaqueo por más complicadas que se tornaran las situaciones.

Gracias a su amor, comprensión y por siempre motivarme a seguir adelante.

Agradecer al alma mater, compañeros y profesores que formaron parte como obtención de conocimiento para mi desarrollo como profesional y a cada una de las personas que fueron una pieza clave durante mi estancia en la Universidad Industrial de Santander.

A mi compañero Jorge Luis Quintana Vanegas, por alcanzar este logro juntos pese a las dificultades surgidas en el camino, sacamos todo adelante.

A mi director de proyecto, al ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, que con su conocimiento y su experiencia fue muy importante para darle desarrollo a este proyecto de grado.

¡Muchas gracias por todo!

Jordán Said Pérez Mercado.

Dedicatoria

Primero que todo darle infinitas gracias a DIOS por ayudarme a cumplir este gran sueño, por darme la sabiduría y haber guiado cada paso en mi carrera universitaria.

A mi familia por emprender conmigo este arduo camino, a mi mamá, a mi papá a mis hermanas, cuñados y sobrinos; especialmente a mi mamá Dora Vanegas y a mis dos hermanas Maryeli Quintana Vanegas y Lili Quintana Vanegas que siempre fueron las que me apoyaron cuando más las necesite.

De igual forma agradecer a la señora Helena Caballero por respaldarme en los momentos más difíciles, gracias a ella di el primer paso en mi carrera universitaria y también a cada una de esas personas que me motivaron día a día para salir adelante y no decaer.

Agradecer a cada uno de mis compañeros que estuvieron ahí en todo momento, vivimos alegrías, tristezas y demás experiencias, pero nunca nos dejamos derrumbar y gracias a eso alcanzamos esta gran meta.

A mi compañero Jordan Pérez por alcanzar estos logros juntos pese a las dificultades surgidas en el camino, sacamos todo adelante.

A mi director de proyecto al ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, quien con su conocimiento y su experiencia fue muy importante para darle desarrollo a este proyecto de grado.

¡Muchas gracias por todo!

Jorge Luis Quintana Vanegas.

Agradecimiento

Los autores agradecen este trabajo a:

Primeramente, a Dios por ser nuestra fortaleza y nuestra guía durante la elaboración de este proyecto y cada una de las etapas de nuestras vidas.

A cada uno de nuestros familiares por ser apoyo incondicional y confianza depositada para el cumplimiento de este gran sueño y cumplir una gran meta.

A nuestro director de proyecto el Ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, por su paciencia y ayuda durante el desarrollo de este proyecto.

A cada una de las personas que de una u otra forma nos ayudaron y colocaron su apoyo para que este proyecto se llevara a cabo.

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Marco teórico	17
1.1 Bases granulares en pavimentos flexibles.....	17
1.2 Características de la base granular	18
1.2.1 Clases de bases granulares	18
1.2.2 Rigidez	19
1.3 Modelos constitutivos usados para describir la variación del módulo resiliente	22
1.3.1 Modelo No.1 K- Θ	23
1.3.2 Modelo No.2 NCHRP, (2001)	23
1.3.3 Modelo No.3 Uzan.....	24
2. Metodología	25
2.1 Material ensayado	25
2.1.1 Fuente De Materiales	25
2.1.2 Granulometría	26
2.1.3 Densidad de los Materiales	27
3. Resultados	28
3.1 Medidas de Módulo resiliente.....	28

3.1.1 Modelos constitutivos del módulo resiliente 31

3.2 Relación de resultados con Valores usualmente empleados en diseños. 39

4. Conclusiones 44

Referencias bibliográficas..... 47

Apéndices..... 49

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Sección Transversal de la Estructura de un Pavimento Flexible.....	17
<i>Figura 2.</i> Deformación de material granular al ser sometido a un ciclo de carga.....	20
<i>Figura 3.</i> Deformación permanente acumulada durante un ciclo de carga.....	21
<i>Figura 4.</i> Probeta, Carga y Deformación.....	22
<i>Figura 5.</i> Cantera material.....	26
<i>Figura 6.</i> Extracción del material.....	26
<i>Figura 7.</i> Granulometría de las muestras del material de base granular.....	27
<i>Figura 8.</i> Montaje completo para el ensayo triaxial dinámico.....	28
<i>Figura 9.</i> Comparación de los valores de Módulo Resiliente del modelo $K-\Theta$ y los valores experimentales.....	32
<i>Figura 10.</i> Valores de Modulo Resiliente y del modelo NCHRP, para el material 1. Condición de humedad óptima.....	32
<i>Figura 11.</i> Valores de Modulo Resiliente y del modelo de Uzan, para el Material 1. Condición de humedad óptima.....	33
<i>Figura 12.</i> Valores de Modulo Resiliente y del modelo NCHRP, para el material 1. Condición Saturada.....	34

Figura 13. Valores de Modulo Resiliente y del modelo de Uzan, para el Material 1. Condición Saturada..... 35

Figura 14. Valores de Modulo Resiliente y del modelo NCHRP, para el material 2. Condición de humedad óptima..... 36

Figura 15. Valores de Modulo Resiliente y del modelo de Uzan, para el Material 2. Condición de humedad óptima..... 37

Figura 16. Valores de Modulo Resiliente y del modelo NCHRP, para el material 2. Condición Saturada..... 38

Figura 17. Valores de Modulo Resiliente y del modelo de Uzan, para el Material 2. Condición Saturada..... 39

Figura 18. Comparación entre los valores de módulo resiliente reportados por AASHTO vs. Ensayo para el módulo resiliente. Condición de humedad óptima. 41

Figura 19. Comparación entre los valores de módulo resiliente reportados por AASHTO vs. Ensayo para el módulo resiliente. Condición saturada. 41

Figura 20. Valores de módulo resiliente de estudios realizados en la ciudad de Bucaramanga. . 43

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Requisitos de los Agregados Para Bases Granulares</i>	19
Tabla 2. <i>Densidad Máxima seca (kN/m³), Grado de compactación % y Humedad %</i>	27
Tabla 3. <i>Valores de módulo resiliente para cada secuencia condición humedad óptima. Muestra 1</i>	29
Tabla 4. <i>Valores de módulo resiliente para cada secuencia condición humedad óptima. Muestra 2</i>	29
Tabla 5. <i>Valores de módulo resiliente para cada secuencia condición saturada. Muestra 1</i>	30
Tabla 6. <i>Valores de módulo resiliente para cada secuencia condición saturada. Muestra 2</i>	30
Tabla 7. <i>Valores de R2 para cada modelo</i>	31
Tabla 8. <i>Constantes del modelo según AASHTO</i>	40
Tabla 9. <i>Diferentes valores de las constantes de regresión del modelo $M_r = k_1 \Theta^{k_2}$</i>	42
Tabla 10. <i>Ecuaciones constitutivas del modelo de K-Θ. Para interpretar valores de Módulos Resiliente en la ciudad de Bucaramanga</i>	44
Tabla 11. <i>Valores Máximos, promedio y mínimos valores de Módulos Resiliente de la bases granulares utilizadas en la ciudad de Bucaramanga</i>	46

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Metodología.....	49

Resumen

Título: Determinación del comportamiento del módulo resiliente en bases granulares utilizadas en la ciudad de Bucaramanga*

Autor: Jordan Said Pérez Mercado**
Jorge Luis Quintana Vanegas

Palabras clave: Triaxial cíclico, granulometría, humedad óptima, saturación, módulo resiliente, bases granulares, pavimento flexible

Descripción

Este artículo expone el desarrollo y resultados obtenidos para la determinación del módulo resiliente, el cual es un parámetro representativo de diseño en las estructuras de pavimentos flexibles, dicho parámetro se obtuvo para bases granulares utilizadas en la ciudad de Bucaramanga mediante el ensayo triaxial cíclico o dinámico, buscando obtener resultados que puedan aportar la rigidez mecánica a los diseños, ya que este valor se desconoce. En los métodos actuales empleados para el diseño de pavimentos flexibles se utilizan relaciones mediante ábacos o formulas empíricas basándose en los resultados obtenidos del ensayo de CBR, siendo este de menor costo y de más disponibilidad en la ciudad.

Este estudio representa el comportamiento del Módulo Resiliente de bases granulares variando la granulometría de sus partículas, relacionando valores usualmente empleando en diseños y como resultado del estudio determinar una ecuación constitutiva para las bases granulares que sea una herramienta de ayuda para estimar valores de Modulo Resiliente. Para el desarrollo de este estudio se tienen en cuenta los niveles de esfuerzo que soporta el pavimento debido al continuo paso del tránsito vehicular y el contenido de humedad del material correspondiente al aportado por el ensayo del Próctor Modificado, posteriormente modificando este a la condición de saturación. Para lo anteriormente descrito los procedimientos se realizaron de acuerdo con los lineamientos de las normas del Instituto Nacional de Vías E-123, E-142 y E-156.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Omar Giovanni Sánchez Rivera, Magíster en Ingeniería Civil

Abstract

Title: Determination of the behavior of the resilient module in granular bases used in the city of Bucaramanga*

Author: Jordan Said Pérez Mercado **
Jorge Luis Quintana Vanegas

Keywords: Triaxial cyclical, grain, ideal moisture, saturation, resilient module, granular bases, flexible paving.

Description

This article exposes the development and results obtained for the determination of the module resilient, which is a parameter representative of design in the flexible pavements structures, that parameter is obtained for bases granular used in the city of Bucaramanga by rehearsal triaxial cyclic or dynamic, searching to obtain results that can provide the mechanical rigidity to the designs, since this value is unknown. In the current methods used for the design of flexible pavements are used relationships using graphs or formulas empirical based on the results of the test of CBR, this being of lower cost and greater availability in the city.

This study represents the behavior of the module resilient of bases granular by varying the granulometry of its particles, linking values usually used in designs and as a result of the study to determine an equation constitutive bases to granular is a helpful tool to estimate values of Module resilient. For the development of this study were to take into account the levels of effort that supports the pavement due to the continuous passage of transit vehicular and the moisture content of the material corresponding to that provided by the test of the próctor modified, later by editing this to the condition of saturation. For the above procedures are carried out in accordance with the guidelines of the standards of the National Institute of Tracks E-123, E-142 and E-156.

* Degree work

** Faculty of Mechanical Physics Engineering. School of Civil Engineering. Director: Omar Giovanny Sánchez Rivera, Master in Civil Engineering

Introducción

Los pavimentos flexibles están compuestos por una serie de capas granulares rematadas por una capa de rodamiento en concreto asfáltico. La capa de base granular debe estar compuesta por materiales seleccionados y su rigidez mecánica se caracteriza con el parámetro denominado Módulo Resiliente. Como consecuencia del alto costo de los ensayos y a la poca disponibilidad de la máquina para la realización del ensayo triaxial cíclico o dinámico, se desconoce el valor de rigidez que pueden aportar las bases granulares de pavimentos flexibles utilizadas en diferentes regiones de Colombia. Gracias a la disponibilidad de la máquina en la Universidad Industrial de Santander, se desarrolló el ensayo y se realizaron medidas sobre muestras de material de bases granulares utilizadas en la ciudad de Bucaramanga. Los resultados de ensayos practicados sobre muestras con variación en su granulometría se compararon con valores usualmente empleados en el dimensionamiento de estructuras de pavimentos.

1. Marco teórico

1.1 Bases granulares en pavimentos flexibles

En los pavimentos flexibles existe una capa superficial de asfalto que está constituida por agregados pétreos tratados con ligantes bituminosos, de ahí proviene el nombre de pavimento flexible debido a las propiedades elásticas del bitumen, el cual permite importantes deformaciones cuando es sometido a grandes cargas; bajo la capa superficial se encuentran las capas de base y subbase granular que están formadas por material granular seleccionado y finalmente el material del terreno el cual también debe ser apto para resistir los esfuerzos transmitidos por las capas superiores. (Cuadrado Madrid & Meza Saavedra, 2017)

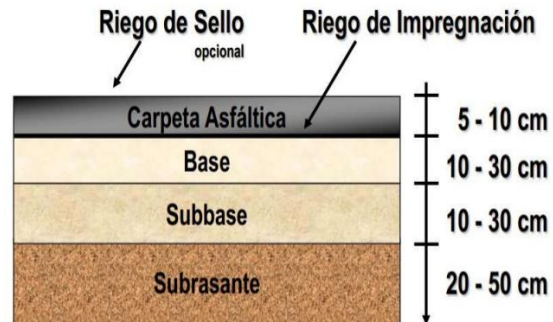


Figura 1. Sección Transversal de la Estructura de un Pavimento Flexible. Adaptado de Pavimentos Flexibles y Rígidos. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/nievesiita/pavimento-flexible-y-rigido>. [Consulta: 24-02-2018]

1.2 Características de la base granular

El material usado en la construcción de bases de pavimentos debe ser durable, resistente y aportar rigidez a la estructura.

1.2.1 Clases de bases granulares. El Instituto Nacional de Vías en su Artículo 330 del año 2013, considera tres clases de base granular en función de la calidad de los agregados (clases A, B y C). En la siguiente tabla se indican los requisitos de calidad para evaluar los materiales de base granular y obtener un material durable y resistente bajo la acción repetida de cargas vehiculares y de las condiciones climáticas. (Instituto Nacional De Vías - INVIAS, sf)

Tabla 1.

Requisitos de los Agregados Para Bases Granulares

características	norma de ensayo inv	base granular		
		clase C	clase B	clase A
dureza (O)				
desgaste en la maquina de los angeles (gradacion A), maximo (%)	E-218			
-500 revoluciones		40	40	35
- 100 revoluciones		8	8	7
degradacion por abrasion en el equipo Micro-deval, maximo (%)	E-238	-	30	25
evaluacion de la resistencia mecanica por el metodo del 10% de finos				
- valor seco, minimo (KN)	E- 224	-	70	90
-relacion humedo/seco, minimo (%)		-	75	75
durabilidad (O)				
perdidas en ensayo de solidez en sulfatos, maximo (%)	E - 220			
- sulfato de sodio		12	12	12
-sulfato de magnesio		18	18	18
Limpieza (F)				
limite liquido, maximo (%)	E-125	25	-	-
indice de plasticidad, maximo (%)	E-125 y E-126	3	0	0
equivalente de arena, minimo (%)	E-133	30	30	30
valor de azul de metileno, maximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
contenido de terrones de arcilla y particulas deleznales, maximo (%)	E-211	2	2	2
geometria de las particulas (F)				
indices de alargamiento y aplanamiento, maximo (%)	E-230	35	35	35
caras fracturadas, minimo (%)	E-227			
-Una cara		50	70	100
- Dos cara		-	50	70
angularidad de la fraccion fina, minimo (%)	E-239	-	35	35
resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactacion minimo especificado (numeral 330.5.2.2.2); el CBR se medira sobre nuestras sometidas previamente a cuatro dias de inmersion.	E-148	>= 80	>= 80	>= 95

Fuente: Instituto Nacional De Vías. Base granular. Bogotá: INVIAS, 17h. (Artículo 330-13).

1.2.2 Rigidez. El paso de los vehículos sobre una carretera somete al pavimento a una gran cantidad de cargas cíclicas que hace que los distintos materiales que conforman dicho pavimento estén sometidos a diferentes esfuerzos y sufran variadas deformaciones. Estas deformaciones pueden ser permanentes o resilientes si desaparecen al retirar la carga. (Castro Nova & Quintero Guerrero, 2010)

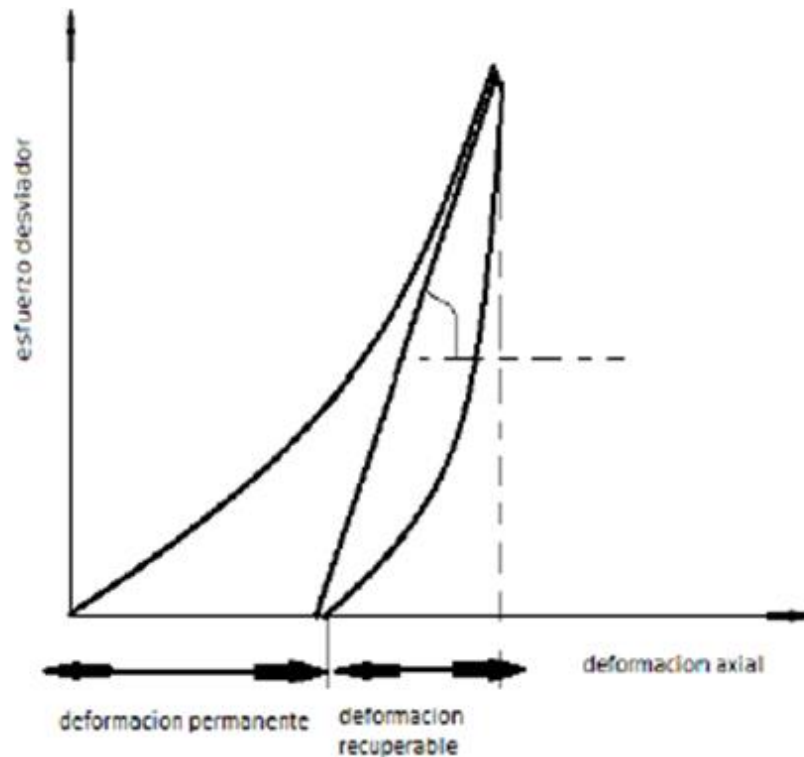


Figura 2. Deformación de material granular al ser sometido a un ciclo de carga. Adaptado de Coronado, O.; Fleureau, J.M.; Gomes-Correia, A. *Resilient behavior of non standard unbound granular material, Road Materials and Pavement Design*. Vol. 10 Iss.

En materiales granulares, al ir aumentando la cantidad de ciclos de carga aplicados, la deformación permanente va disminuyendo, hasta al punto en donde la producida debido al ciclo es recuperada casi en su totalidad

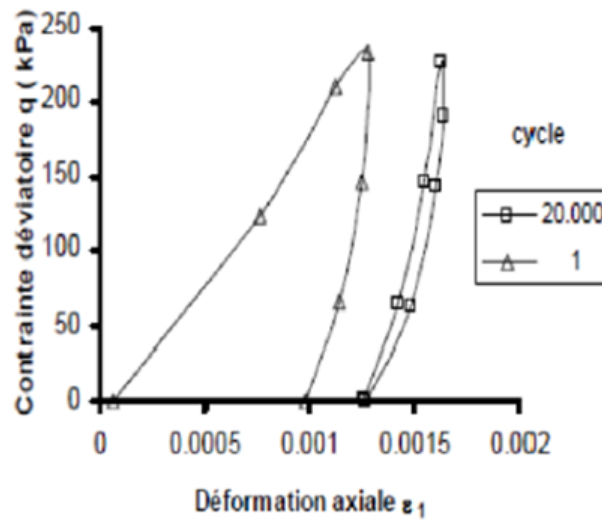


Figura 3. Deformación permanente acumulada durante un ciclo de carga. Adaptado de Coronado, O.; Fleureau, J.M.; Gomes-Correia, A. *Resilient behavior of non standard unbound granular material, Road Materials and Pavement Design*. Vol. 10 Iss.

Cuando finaliza la etapa en la cual se deja de acumular la deformación permanente, el material en términos prácticos se considera como de comportamiento elástico o que el material entra en un estado de resiliencia. Por definición el módulo resiliente es la relación que existe entre el esfuerzo aplicado y la deformación recuperable cuando el material se encuentra en estado resiliente, esta relación está definida como: (Instituto Nacional De vías - INVIAS, sf)

$$Mr = \frac{Sciclico}{\epsilon r} \quad (Ecuacion 1)$$

$$\epsilon r = \frac{\epsilon r}{L} \quad (Ecuacion 2)$$

Donde:

Mr: Modulo resiliente del material

Sciclico: Esfuerzo vertical cíclico

ϵ_r : Deformación unitaria axial resiliente (recuperada) debida a Sciclico.

ϵ_r : Deformación axial resiliente (recuperada) debido a Sciclico.

L : Longitud inicial de la muestra de ensayo

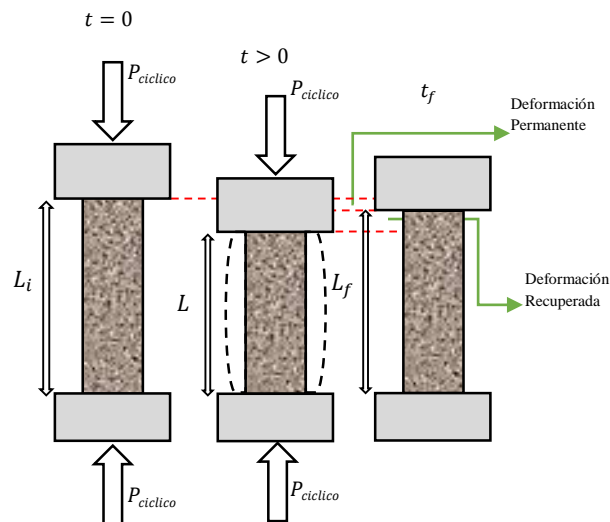


Figura 4. Probeta, Carga y Deformación.

1.3 Modelos constitutivos usados para describir la variación del módulo resiliente

En la literatura se encuentran algunos modelos matemáticos que han sido desarrollados para describir como varia el módulo resiliente tanto para suelos finos como para materiales de partículas gruesas. Estos modelos constitutivos buscan correlacionar el módulo resiliente con los esfuerzos actuantes y las propiedades fundamentales del material. A continuación, se presentan los principales modelos matemáticos encontrados en la literatura.

1.3.1 Modelo No.1 K- Θ . Es la ecuación más ampliamente utilizada para determinar el módulo resiliente en materiales granulares debido a su simplicidad ya que esta indica que el módulo resiliente varía según el nivel de esfuerzo inducido al material. El modelo es el siguiente: (Leal Noriega, 2010)

$$Mr = k1 * \theta^{k2} \quad (\text{Ecuacion 3})$$

Donde:

Mr: Modulo resiliente del material

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

k1, k2: Constantes de regresión.

1.3.2 Modelo No.2 NCHRP, (2001). El National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) en el proyecto (project 1-37A) planteó el siguiente modelo el cual es usado por el Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide El modelo es el siguiente: (Solanki, Zaman, & Ebrahimi, sf)

$$Mr = k1 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{k3}$$

(Ecuacion 4)

Donde:

Mr: Modulo resiliente del material

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

k1, k2, k3: Constantes de regresión

Pa: Presión atmosférica

Esfuerzo cortante octaédrico (τoct): un elemento el cual se corta por un plano en donde se formen ángulos iguales y cada uno esté sometido a esfuerzos principales; en donde este plano se denomina plano octaédrico y la resultante de cada esfuerzo se denomina esfuerzo octaédrico.

1.3.3 Modelo No.3 Uzan. Este modelo es muy parecido al modelo de K-Θ, con la diferencia de que no solo involucra al esfuerzo bulk (Θ) sino que también tiene en cuenta al esfuerzo desviador a la hora de calcular el valor del módulo resiliente. (Cuadrado Madrid & Meza Saavedra, 2017)

El modelo es el siguiente:

$$Mr = A * \theta^{k1} * sd^{k2} \quad (\text{Ecuacion 5})$$

Donde:

Mr: Modulo resiliente del material

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

k1, k2: Constantes de regresión

sd: Esfuerzo desviador, corresponde al Sciclico.

2. Metodología

Con el propósito de establecer valores característicos de materiales de bases granulares empleadas en la construcción de pavimentos en Bucaramanga, se recogieron muestras de agregados empleados por una empresa constructora y se prepararon probetas con 2 granulometrías.

Para fabricar las probetas se determinó inicialmente el valor de densidad mediante el ensayo Próctor Modificado.

Probetas cilíndricas con dimensiones de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura fueron compactadas con humedad óptima y ensayadas en el equipo Triaxial Dinámico siguiendo los lineamientos de la norma E-156 del Instituto Nacional de Vías.

2.1 Material ensayado

2.1.1 Fuente De Materiales. Los agregados se obtuvieron de depósitos aluviales del Rio Tona, ubicados en el kilómetro 4 vía Zapatoca, Llano Grande, Girón, Santander y fueron triturados por una empresa constructora radicada en Bucaramanga.



Figura 5. Cantera material



Figura 6. Extracción del material

2.1.2 Granulometría. En la siguiente figura se muestra la composición granulométrica de dos muestras de base granular ensayadas. Estos materiales cumplen los valores de porcentajes de partículas que en cada tamaño estipula la especificación Artículo 330-13 del Instituto Nacional de Vías, para bases de tamaño máximo 25 mm. (Instituto Nacional De Vías - INVIAS, sf)

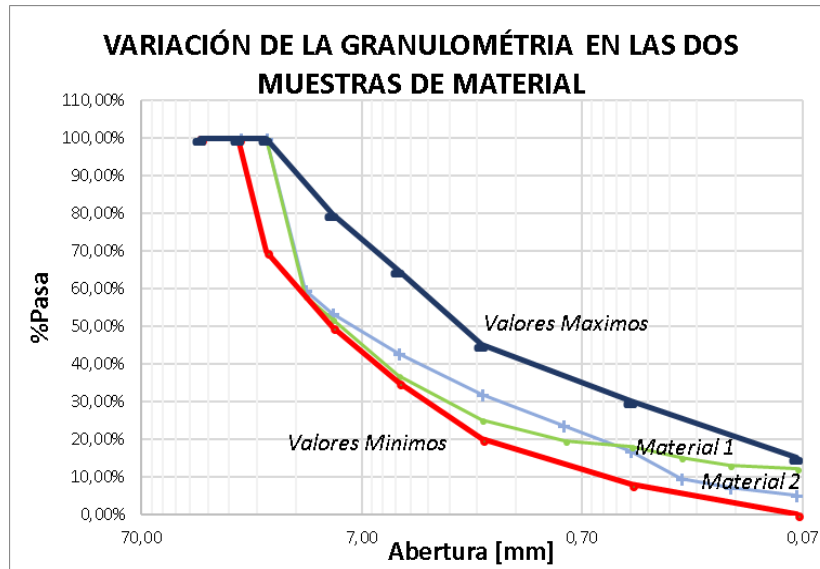


Figura 7. Granulometría de las muestras del material de base granular

2.1.3 Densidad de los Materiales. Para fabricar probetas el material fue compactado dentro de un recipiente cilíndrico de dimensiones 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, con humedad igual a la determinada como óptima en el ensayo Próctor Modificado compactando, en 3 capas, mediante la aplicación de 56 golpes con martillo de 10 lbs y altura de caída de 18 pulgadas. (Instituto Nacional De Vías - INVIAS, sf)

En la tabla 2 se indican los valores de densidad y humedad de compactación de las probetas.

Tabla 2.

Densidad Máxima seca (kN/m^3), Grado de compactación % y Humedad %

Muestra No.	Peso Específico (kN/m^3)	Grado de Compactación %	Humedad %
1	20.5	100	7.6
2	20.6	100	7.1

3. Resultados

Los ensayos se practicaron sobre las probetas con contenido de agua igual a la humedad de compactación y posteriormente se modificó su contenido de agua para finalmente someterlas a un ensayo en condición saturada.

3.1 Medidas de Módulo resiliente

Los ensayos se ejecutaron de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma INV E-156 con las secuencias de carga correspondientes a bases granulares.

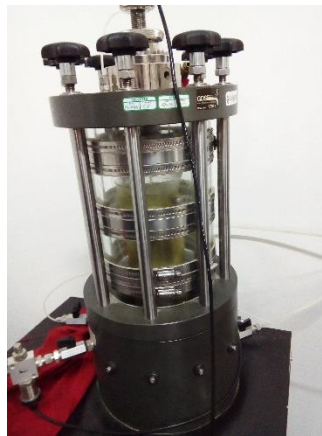


Figura 8. Montaje completo para el ensayo triaxial dinámico

En las tablas 3 y 4 se muestran los resultados de Módulo resiliente obtenidos sobre las muestras en condición de humedad óptima.

Tabla 3.

Valores de módulo resiliente para cada secuencia condición humedad óptima. Muestra 1

MATERIAL 1 (BG-25)				
Secuencias	Experimentales	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
	Mr [kPa]	Mr [kPa]	Mr [kPa]	Mr [kPa]
1	40271	46408	40256	40267
2	63015	55526	48462	44509
3	65337	61818	54056	48511
4	52859	61808	55853	55771
5	88259	76857	69239	63952
6	88989	87772	78663	71558
7	91918	96595	91914	91915
8	130800	121669	111910	105925
9	138697	140626	126569	119970
10	128120	120122	118790	124446
11	129461	128881	124886	125263
12	154836	158487	150702	149727
13	147987	148492	147648	152918
14	156581	156953	152963	154966
15	174922	190766	174914	174919

Tabla 4.

Valores de módulo resiliente para cada secuencia condición humedad óptima. Muestra 2

MATERIAL 2 (BG-27)				
Secuencias	Experimental	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
	Mr [kPa]	Mr [kPa]	Mr [kPa]	Mr [kPa]
1	39236	44809	39229	39226
2	71921	49902	45039	56958
3	43671	52006	47388	61914
4	41474	53676	46758	48880
5	83891	62370	56944	69853
6	69534	67781	64103	81891
7	62079	71474	62083	61320
8	109740	83986	81132	92910
9	92365	94816	98470	112417
10	97740	101311	98100	97743
11	81582	88027	78841	76186
12	102182	102808	106167	112640
13	87305	96171	84431	73973
14	93931	102019	95218	89589
15	123699	115102	123693	123693

En la segunda etapa se midieron valores de módulo resiliente en condición de humedad de saturación. Las tablas 5 y 6 muestran los valores medidos.

Tabla 5.

Valores de módulo resiliente para cada secuencia condición saturada. Muestra 1

MATERIAL 1 (BG-25)				
Secuencias	Experimental	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
	Mr [kPa]	Mr [kPa]	Mr [kPa]	Mr [kPa]
1	31431	35764	31332	31420
2	52143	44390	39669	43136
3	54483	50870	45961	50659
4	43242	50071	44002	43860
5	74609	64643	58687	63161
6	76584	75467	69856	75951
7	75072	83933	75068	75066
8	120604	109048	102995	108094
9	134411	132408	130448	136938
10	101980	107705	95930	91598
11	118736	119595	109970	110043
12	149863	150927	144480	145366
13	136784	139622	127995	124410
14	139980	146534	136560	134544
15	193971	191030	193977	193972

Tabla 6.

Valores de módulo resiliente para cada secuencia condición saturada. Muestra 2

MATERIAL 2 (BG-27)				
Secuencias	Experimental	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
	Mr [kPa]	Mr [kPa]	Mr [kPa]	Mr [kPa]
1	57771	55076	45560	57773
2	70153	62008	60620	68312
3	65638	66603	69536	74607
4	56708	66663	52865	71382
5	82115	76822	77274	86572
6	88141	83252	95581	95799
7	79011	87598	70131	96689
8	117102	101696	117214	118203
9	133898	112551	159122	133901
10	116042	119624	133022	139462
11	82342	105464	93585	119413
12	147817	121105	161088	143624
13	87006	114272	93557	128780
14	102023	119846	117462	138003
15	161020	134392	193776	161021

3.1.1 Modelos constitutivos del módulo resiliente. Considerando los modelos K- Θ , NHCRP- (2001) y de Uzan se calcularon las constantes de los modelos mediante regresión ajustada por el método de mínimos cuadrados y su respectivo Coeficiente de determinación (R^2). (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 03) En la tabla siguiente se muestran los modelos ajustados.

Tabla 7.

Valores de R^2 para cada modelo

ECUACION CONSTITUTIVA		
MATERIAL 1		
Condición de Humedad Óptima		R^2
MODELO 1	$Mr = 2379,1\theta^{0,658}$	0,97
MODELO 2	$Mr = 443,463 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,779} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,228}$	0,95
MODELO 3	$Mr = 11,417 * \theta^{0,928} * sd^{-0,194}$	0,91
Condición Saturada		R^2
MODELO 1	$Mr = 1155,1\theta^{0,763}$	0,98
MODELO 2	$Mr = 331,853 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,751} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,185}$	0,965
MODELO 3	$Mr = 1164,98 * \theta^{0,613} * sd^{-0,169}$	0,974
MATERIAL 2		
Condición de Humedad Óptima		R^2
MODELO 1	$Mr = 3216,3\theta^{0,535}$	0,97
MODELO 2	$Mr = 376,838 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,3604} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{0,430}$	0,73
MODELO 3	$Mr = 12068,2 * \theta^{-0,10007} * sd^{0,505}$	0,78
Condición Saturada		R^2
MODELO 1	$Mr = 7479,6\theta^{0,449}$	0,93
MODELO 2	$Mr = 552,892 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,141} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{0,715}$	0,79
MODELO 3	$Mr = 9922,9 * \theta^{0,359} * sd^{0,061}$	0,61

En la siguiente figura, se analiza el comportamiento del ajuste del modelo de K- Θ con relación a los valores obtenidos de la realización del ensayo triaxial cíclico.

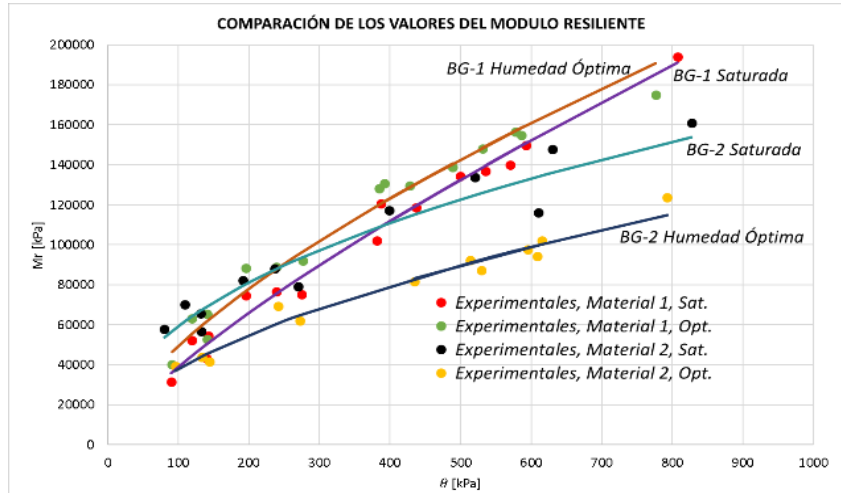


Figura 9. Comparación de los valores de Módulo Resiliente del modelo K-θ y los valores experimentales

En las figuras 10-17, se muestran los ajustes de los modelos de NCHRP- (2001) y de Uzan con respecto a los valores medidos, para determinar el comportamiento de los modelos con respecto a los valores experimentales, en condición de humedad óptima y en condición saturada.

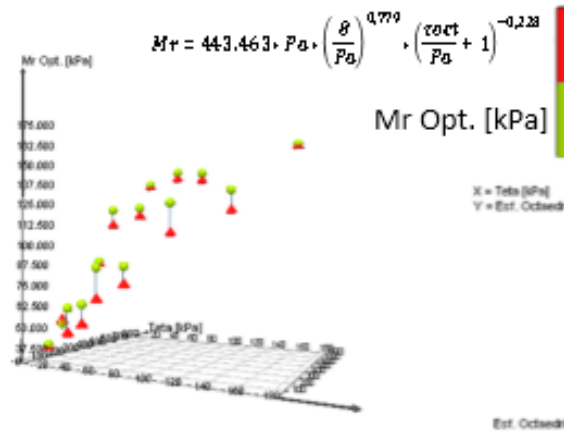


Figura 10. Valores de Modulo Resiliente y del modelo NCHRP, para el material 1. Condición de humedad óptima.

En la figura 10, se relacionan los valores de módulo resiliente para el modelo NCHRP-(2001) y los valores obtenidos del ensayo, para el material 1 en condición de humedad óptima, se observa que para esta condición hay un ajuste entre los valores del 95%.

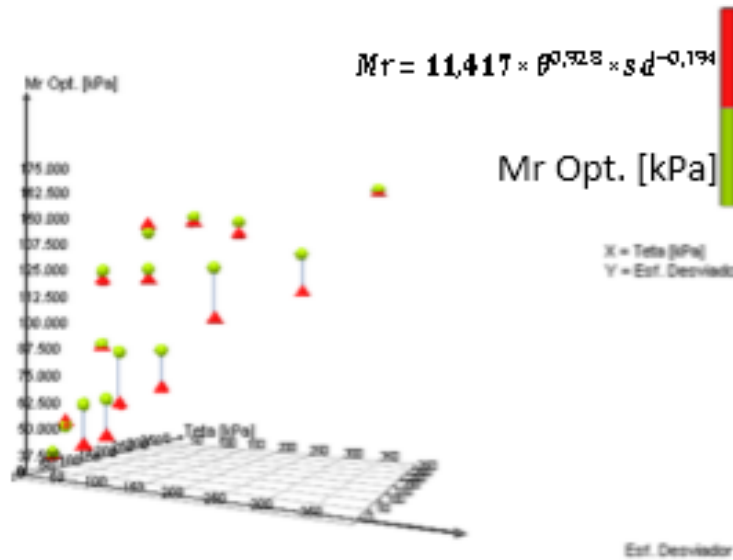


Figura 11. Valores de Modulo Resiliente y del modelo de Uzan, para el Material 1. Condición de humedad óptima.

Se observa que en la figura 11, se realizó un análisis comparativo para los valores de módulo resiliente para el modelo de Uzan y los valores obtenidos del ensayo, para el material 1 en condición de humedad óptima, se observa que para esta condición hay una afinidad entre los valores del 91%.

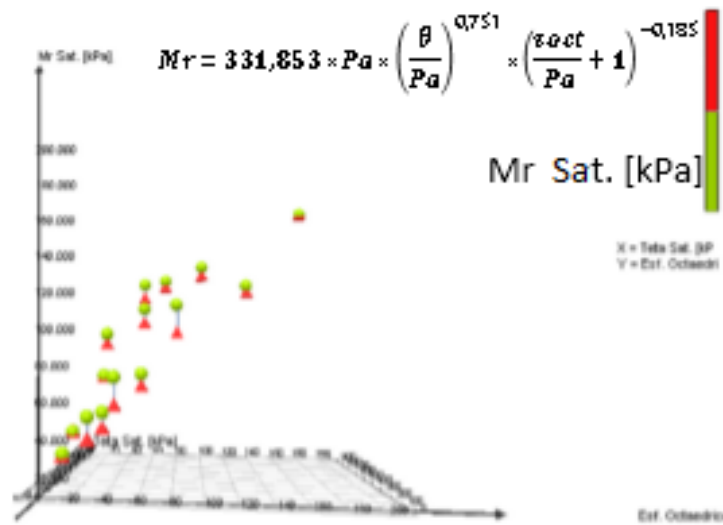


Figura 12. Valores de Modulo Resiliente y del modelo NCHRP, para el material 1. Condición Saturada

En la figura 12, en la gráfica se observa que los valores de módulo resiliente entre los valores obtenidos en el ensayo para el material 1 en condición saturada y el modelo NCHRP-(2001), tienen una proximidad del 96,5%.

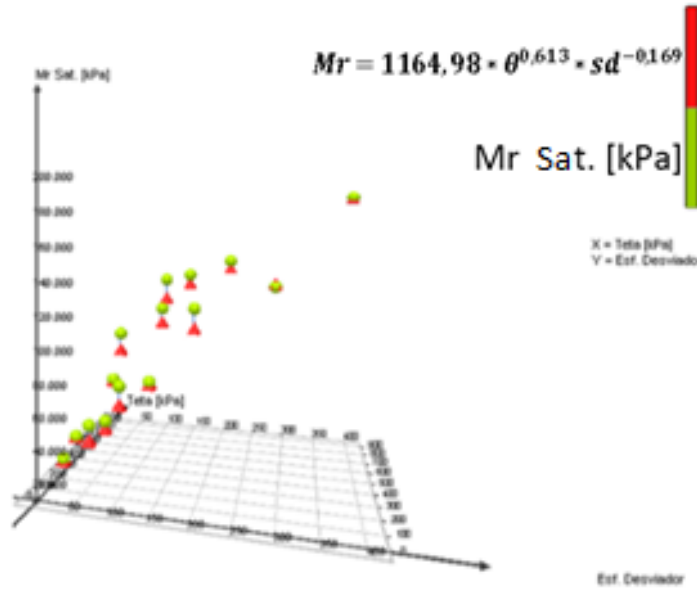


Figura 13. Valores de Modulo Resiliente y del modelo de Uzan, para el Material 1. Condición Saturada.

En la figura 13, se relacionan los de módulo resiliente para el modelo de Uzan y los valores obtenidos en el ensayo, para el material 1 en condición de humedad óptima, se observa que los resultados presentan una gran afinidad para este caso del 97,4%.

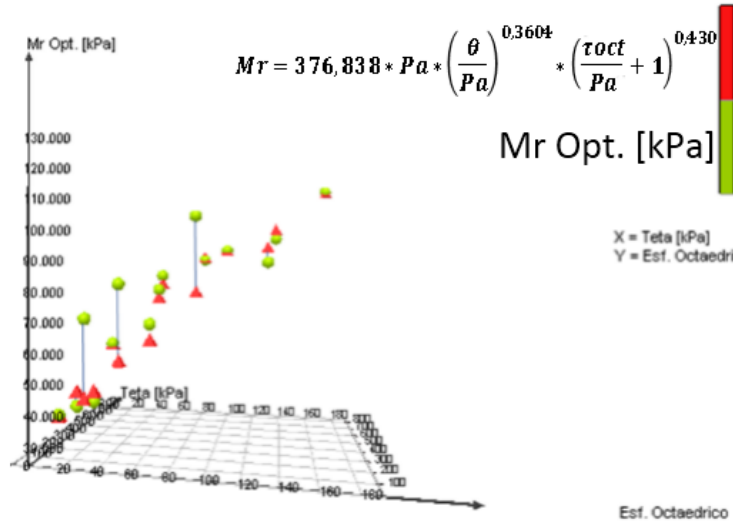


Figura 14. Valores de Modulo Resiliente y del modelo NCHRP, para el material 2. Condición de humedad óptima.

En la figura 14, se realizó la comparación de los valores de módulo resiliente para el modelo NCHRP-(2001) y los valores obtenidos en el ensayo, para el material 2 en condición de humedad óptima, se observa que para esta condición hay un ajuste entre los valores del 73%.

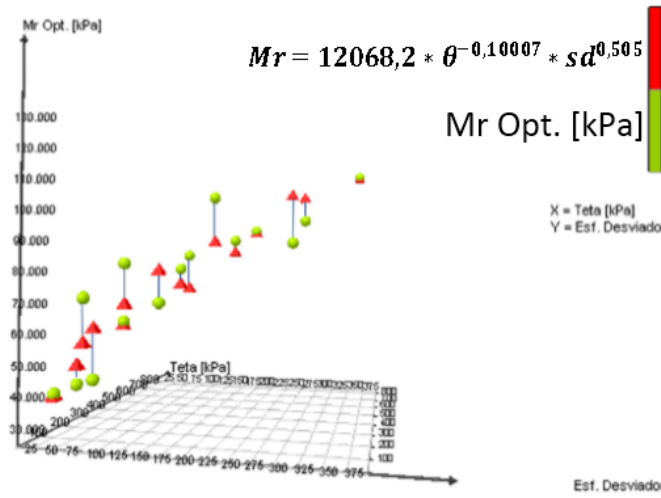


Figura 15. Valores de Modulo Resiliente y del modelo de Uzan, para el Material 2. Condición de humedad óptima.

En la figura 15, se graficaron los valores de módulo resiliente para el modelo de Uzan y los valores obtenidos, para el material 2 en condición de humedad óptima, y se observa que para esta condición hay una similitud entre los valores del 78%.

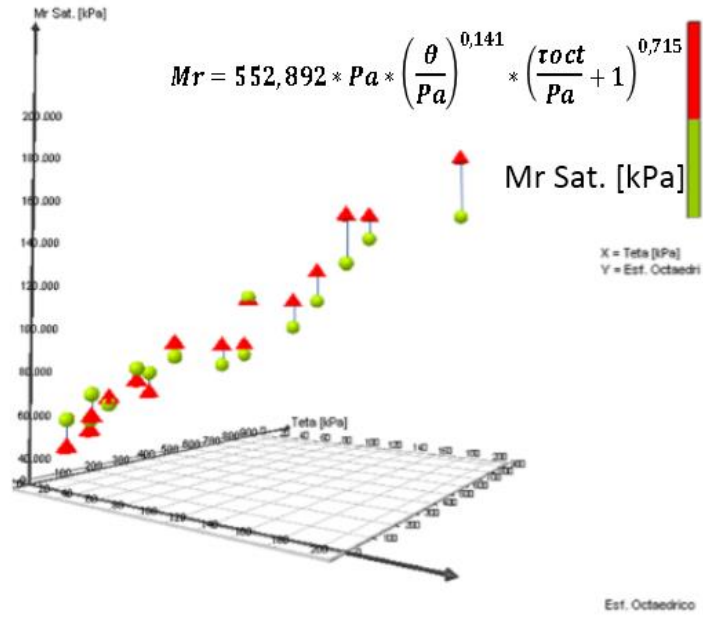


Figura 16. Valores de Modulo Resiliente y del modelo NCHRP, para el material 2. Condición Saturada

En la figura 16, se relacionan los valores de módulo resiliente del modelo NCHRP-(2001) y los valores del ensayo realizado, para el material 2 en condición saturada, se observa que para esta condición hay un ajuste entre los valores del 79%.

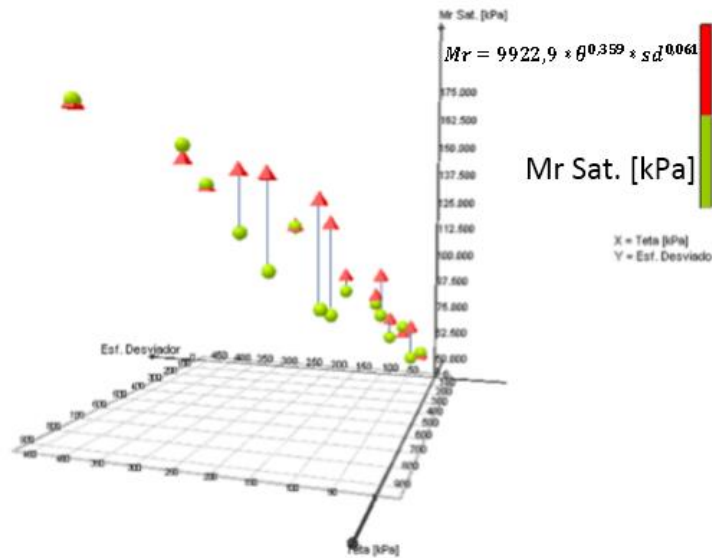


Figura 17. Valores de Modulo Resiliente y del modelo de Uzan, para el Material 2. Condición Saturada.

En la figura 17, se graficaron los valores de módulo resiliente para el modelo de Uzan y los valores obtenidos en el ensayo, para el material 2 en condición saturada, se observa que para esta condición hay una divergencia en algunos valores, y un ajuste entre ellos del 61%.

3.2 Relación de resultados con Valores usualmente empleados en diseños.

A continuación, se hace un estudio comparativo de los valores obtenidos en los ensayos, con valores que usualmente se emplean en el dimensionamiento de estructuras de pavimento.

En la tabla siguiente se indican valores de constantes del modelo constitutivo K- Θ reportados en el AASHTO Guide For Design of Pavement Structures.

Tabla 8.

Constantes del modelo según AASHTO

Constantes de regresion empleadas por el AASHTO Guide For Design of Pavement Structures			
Condicion de humedad optima			
K1 [psi]		K2 [psi]	
Min.	Max.	Min.	Max.
4000	6000	0,5	0,7
Condicion saturada			
Min.	Max.	Min.	Max.
2000	4000	0,5	0,7

Fuente: Aashto Guide For Design Of Pavement Structures 1993. Washington: American Association Of State Highway And Transportation Officials, 622h

$$Mr = k1 * \theta^{k2}$$

Las figuras 18 y 19, muestra los valores del Módulo Resiliente de las muestras ensayadas y los valores calculados a partir de las constantes reportadas en AASHTO Guide For Design of Pavement Structures empleando el modelo de K- θ .

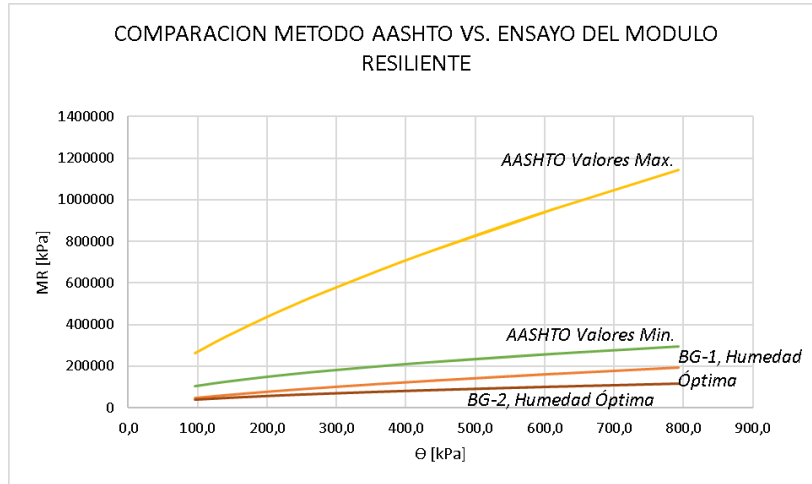


Figura 18. Comparación entre los valores de módulo resiliente reportados por AASHTO vs. Ensayo para el módulo resiliente. Condición de humedad óptima.

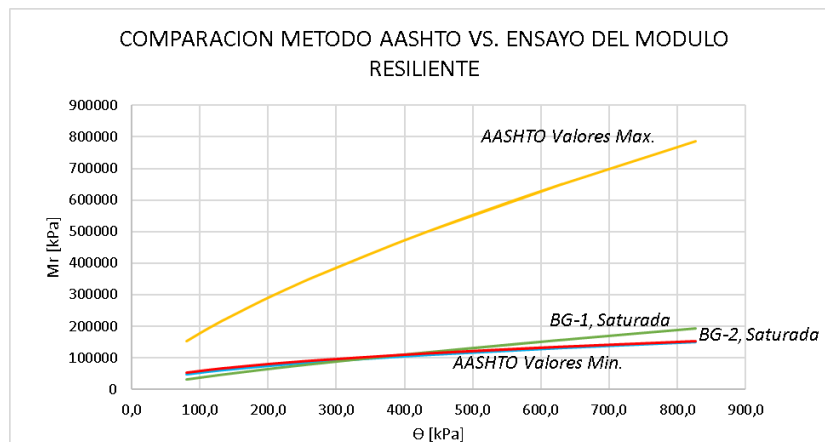


Figura 19. Comparación entre los valores de módulo resiliente reportados por AASHTO vs. Ensayo para el módulo resiliente. Condición saturada.

Comparando los valores del ensayo y de la Guía AASHTO, se observa que para la condición de humedad óptima, estos están por debajo de los mínimos, mientras que para la condición saturada se encuentran entre el rango de los reportados por la Guía AASHTO.

3.3 Valores usualmente empleados en bases granulares utilizadas en la ciudad de Bucaramanga

Estudios similares a este, en los que se han realizado ensayos con materiales de la fuente Rio Chicamocha, empleada en la ciudad de Bucaramanga, reportan valores de las constantes de los modelos.

Valores de las constantes de regresión k_1 y k_2 del modelo de $K-\Theta$ para muestras de material de base granular bajo las dos condiciones de humedad para cuatro diferentes tipos agregados.

Tabla 9.

Diferentes valores de las constantes de regresión del modelo $M_r = k_1 \Theta^{k_2}$

Condición de Humedad optima		
Fuente Aluvial	K1 [kPa]	K2 [kPa]
BG-1 Rio Tona	2379,1	0,6588
BG-2 Rio Tona	3216,3	0,5356
BG-A Rio Chicamocha	543,7	0,873
BG-B Rio Chicamocha	2394,8	0,667
Condición Saturada		
Fuente Aluvial	K1 [kPa]	K2 [kPa]
BG-1 Rio Tona	1155,1	0,7631
BG-2 Rio Tona	7479,6	0,4499
BG-A Rio Chicamocha	56525	0,167
BG-B Rio Chicamocha	9685,9	0,457

Los valores presentan una gran variación, en relación con la fuente aluvial de la cual se extraen, para ambas constantes en las dos condiciones de estudio.

En la figura siguiente se muestran los valores del Módulo Resiliente de las dos fuentes aluviales, de donde se extraen los agregados para la construcción y mantenimiento de pavimentos en la ciudad de Bucaramanga.

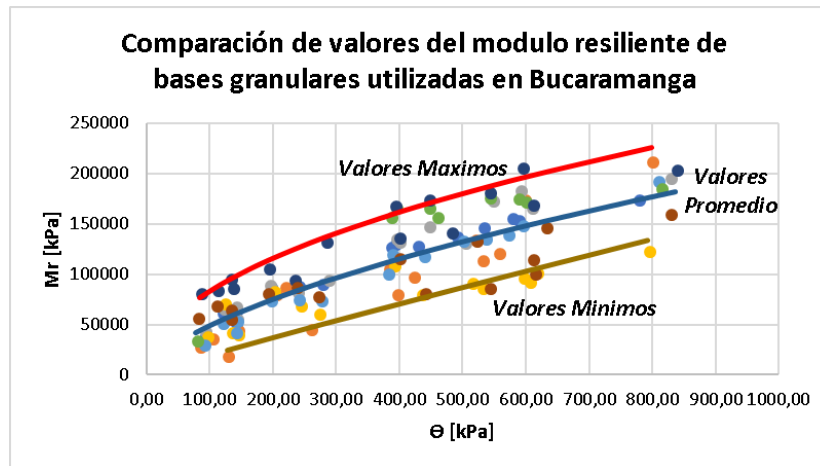


Figura 20. Valores de módulo resiliente de estudios realizados en la ciudad de Bucaramanga.

Con el propósito de establecer ecuaciones constitutivas del modelo $K-\Theta$ que los ingenieros puedan emplear como herramientas para mejorar el diseño de pavimentos en la ciudad de Bucaramanga, se establecen constantes del modelo para los valores inferiores, los valores medios y los valores más elevados medidos en ensayos.

Tabla 10.

Ecuaciones constitutivas del modelo de K-Θ. Para interpretar valores de Módulos Resiliente en la ciudad de Bucaramanga.

Valores Maximos	Valores Promedio	Valores Minimos
$Mr = k1 * \left(\frac{\theta}{Patm}\right)^{k2}$	$Mr = k1 * \left(\frac{\theta}{Patm}\right)^{k2}$	$Mr = k1 * \left(\frac{\theta}{Patm}\right)^{k2}$
$Mr = 8825,3 * \left(\frac{\theta}{101,25}\right)^{0,49}$	$Mr = 2825,9 * \left(\frac{\theta}{101,25}\right)^{0,62}$	$Mr = 252,24 * \left(\frac{\theta}{101,25}\right)^{0,94}$

4. Conclusiones

- La variación de los valores del Módulo Resiliente de la condición saturada fueron mayores entre un 10 y 50% comparados con la condición de humedad óptima, esto puede ser atribuido al proceso que siguió el material que inicialmente se ensayó en condición de humedad óptima y luego se modificó su contenido de humedad a condición saturada.

- De los modelos matemáticos constitutivos, el modelo de K-Θ, $Mr = k1 * \theta^{k2}$, es el que mejor se ajusta a la variable Modulo Resiliente para estimar su valor, con un ajuste del 97 al 98 %.

- De los valores empleados por la AASHTO Guide For Design of Pavement Structures de módulo resiliente para la condición saturada, en comparación con los obtenidos para las bases granulares utilizadas en la ciudad de Bucaramanga, se estableció que estos se encuentran en el intervalo de sus valores reportados.

- Las regresiones calculadas con respecto a los modelos constitutivos, se presenta una variación en los ajustes de la variable Modulo Resiliente, entre el 61 y 98 %.

- Las constantes de regresión k_1 y k_2 reportadas por el AASHTO Guide For Design of Pavement Structures, se pudo identificar valores más altos, en referencia a las del modelo de K- θ , $Mr = k_1 * \theta^{k_2}$, en donde se encuentran un incremento de entre el 68 y 86 % para k_1 y del 6 al 11% para k_2 .

- Las muestras ensayadas variaron esencialmente en su granulometría con el pasa 200, para la muestra número 1 se obtuvo un porcentaje de pasa 200 de 12% y par la muestra número 2 se obtuvo un valor de 5,15%. Se obtuvieron valores de Modulo Resiliente superiores entre 57 y 70 %, en el material con mayor contenido de finos.

- Empleando la siguiente ecuación $Mr = k_1 * \left(\frac{\theta}{Patm}\right)^{k_2}$, los siguientes valores de la tabla 11, permitieron obtener los valores máximos, valores promedio y valores mínimos de módulo resiliente de las bases granulares utilizadas en Bucaramanga.

Tabla 11.

Valores Máximos, promedio y mínimos valores de Módulos Resiliente de la bases granulares utilizadas en la ciudad de Bucaramanga.

Valores Maximos	Valores Promedio	Valores Minimos
$Mr = 8825,3 * \left(\frac{\theta}{101,25}\right)^{0,49}$	$Mr = 2825,9 * \left(\frac{\theta}{101,25}\right)^{0,62}$	$Mr = 252,24 * \left(\frac{\theta}{101,25}\right)^{0,94}$

Referencias bibliográficas

- Aashto Guide For Design Of Pavement Structures 1993. Washington: American Association Of State Highway And Transportation Officials, 622h.
- Castro Nova, I.; Quintero Guerrero, T. (2010). Protocolo de ensayo para el diseño de mezclas asfálticas con variación de la granulometría. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzon. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil,
- Coronado, O.; Fleureau, J.M.; Gomes-Correia, A. Resilient behavior of non standard unbound granular material, Road Materials and Pavement Design. Vol. 10 Iss.
- Cuadrado Madrid, B.; Meza Saavedra, E. Determinación de la ecuación constitutiva del módulo resiliente de bases granulares empleadas en Bucaramanga. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil, 2017.
- Instituto Nacional De Vías - INVIAS. Análisis granulométrico de suelos por tamizado. Bogotá. 6 h. (I.N.V.E-123-13).
- Instituto Nacional De Vías - INVIAS. Base granular. Bogotá. 17h. (Artículo 330-13).
- Instituto Nacional De vías - INVIAS. Módulo resiliente de suelos de subrasante. Bogotá. 33 h. (I.N.V.E-156-13).
- Instituto Nacional De Vías - INVIAS. Relaciones de humedad – masa unitaria seca en los suelos (ensayo modificado de compactación). Bogotá. 12 h. (I.N.V.E-142-13).
- Leal Noriega, M. (2010). Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocalculo y el encontrado en ensayos de laboratorio. [Maestría]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

SlideShare. Pavimento flexible y rígido. [En línea]. Disponible en:
<<https://es.slideshare.net/nievesiita/pavimento-flexible-y-rigido>>. [Consulta: 24-02-2018].

Solanki, P.; Zaman, M. And Ebrahimi, A. Intelligent and soft computing in infrastructure systems engineering.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Coeficiente de determinación o estadística R^2 . [En línea]. Disponible en:
<http://virtual.uptc.edu.co/ova/estadistica/docs/libros/2007315/lecciones_html/capitulo_6/leccion1/Rcuadrado.html>. [Consulta: 07-03-2018].

Apéndices

Apéndice A. Metodología

En primera instancia, se analizó la clasificación del material de base granular sustraído de la cantera de una empresa radicada en la ciudad de Bucaramanga proveniente de la fuente aluvial del Rio Tona, mediante la implementación del ensayo para la determinación de los tamaños de las partículas de los suelos descrito por la norma I.N.V. E – 123; posterior a ello, se procedió al Artículo 330 del Instituto Nacional de Vías para clasificar la base en una de las dispuestas por el mismo.

Seguido, se aplicó lo descrito por la norma I.N.V. E – 142 para las relaciones de humedad - peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación) y así obtener el valor de humedad óptima del Material con el cual se desarrolló el proceso de compactado de las muestras correspondiente a ese contenido de agua.

Posterior a los dos ensayos anteriormente descritos, las muestras de base granular fueron sometidas al ensayo para la determinación del parámetro de Módulo Resiliente soportado por la norma I.N.V. E – 156, y así realizar los respectivos cálculos para analizar el comportamiento de las muestras. Todos los ensayos se desarrollaron en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander donde se encuentran los laboratorios e instrumentación y equipos necesarios.

Ensayo para la determinación de los tamaños de las partículas de los suelos I.N.V. E – 123

Para el análisis de los tamaños de las partículas del Material (Base granular) se tomó una muestra representativa que corresponde a 5000 g los cuales se sometieron al procedimiento de tamizado manual, mediante tamices de abertura cuadrada con los respectivos tamaños: (Instituto Nacional De Vías - INVIAS, sf)

Tabla 1.

Tamaño de tamices

MEDIDA	UNIDAD	N° TAMIZ
75	mm	3"
50	mm	2"
37,5	mm	1-1/2"
25	mm	1"
19	mm	3/4"
9,5	mm	3/8"
4,75	mm	No. 4
2	mm	No. 10
850	µm	No. 20
425	µm	No. 40
250	µm	No. 60
150	µm	No. 100
75	µm	No. 200



Figura 1. Procedimiento de tamizado manual

Para este estudio se varió la granulometría de las partículas para así obtener dos muestras de base granular, las cuales para una mejor comprensión se van a designar Material 1 y Material 2, en las cuales los resultados obtenidos del procedimiento del tamizado manual se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 2.

Distribución de los tamaños de partículas del Material 1

Tamiz	Abertura [mm]	Retenido [g]	% Ret. Parcial	% Ret. Acum.	% Pasa
2"	50,8	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1 1/2"	38,1	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1"	25,4	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,05	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1/2"	12,7	2100,00	42,00%	42,00%	58,00%
3/8"	9,52	300,00	6,00%	48,00%	52,00%
#4	4,75	750,00	15,00%	63,00%	37,00%
#10	2	600,00	12,00%	75,00%	25,00%
#20	0,84	276,00	5,52%	80,52%	19,48%
#40	0,42	74,00	1,48%	82,00%	18,00%
#60	0,25	145,00	2,90%	84,90%	15,10%
#100	0,149	105,00	2,10%	87,00%	13,00%
#200	0,074	50,00	1,00%	88,00%	12,00%
Pasa 200	-	600,00	12,00%	100,00%	-
	-	5000	100%	-	-

A la cual corresponde la siguiente curva granulométrica:

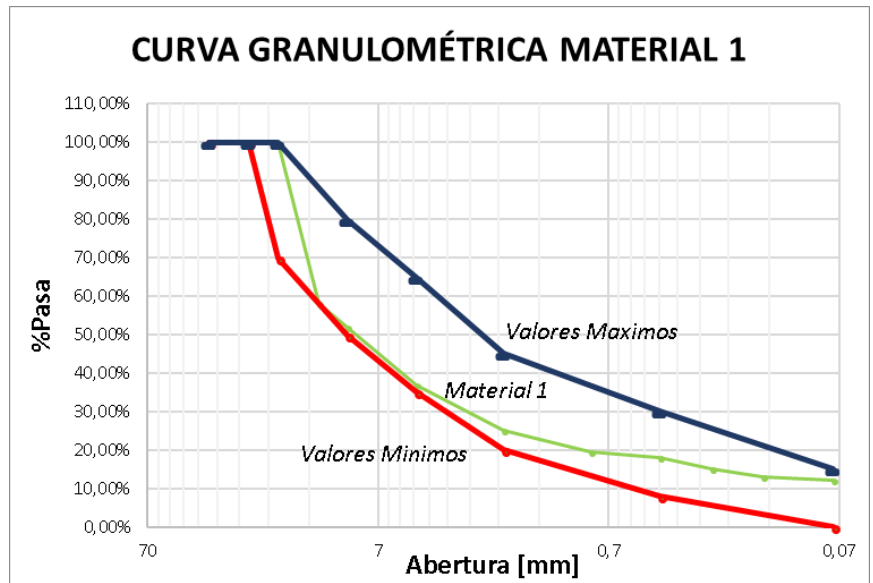


Figura 2. Curva granulométrica Material 1

Tabla 3.

Distribución de los tamaños de partículas del Material 2

Tamiz	Abertura [mm]	Retenido [g]	% Ret. Parcial	% Ret. Acum.	% Pasa
2"	50,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1 1/2"	37,50	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1"	25,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1/2"	12,70	2019,25	40,39%	40,39%	59,62%
3/8"	9,50	305,25	6,10%	46,49%	53,51%
#4	4,75	536,50	10,73%	57,22%	42,78%
#10	2,00	551,75	11,04%	68,26%	31,75%
#20	0,850	409,25	8,19%	76,44%	23,56%
#40	0,425	331,50	6,63%	83,07%	16,93%
#60	0,250	370,50	7,41%	90,48%	9,52%
#100	0,150	124,00	2,48%	92,96%	7,04%
#200	0,075	94,50	1,89%	94,85%	5,15%
Pasa 200	-	257,50	5,15%	100,00%	
	-	5000	100%		

A la cual corresponde la siguiente curva granulométrica:

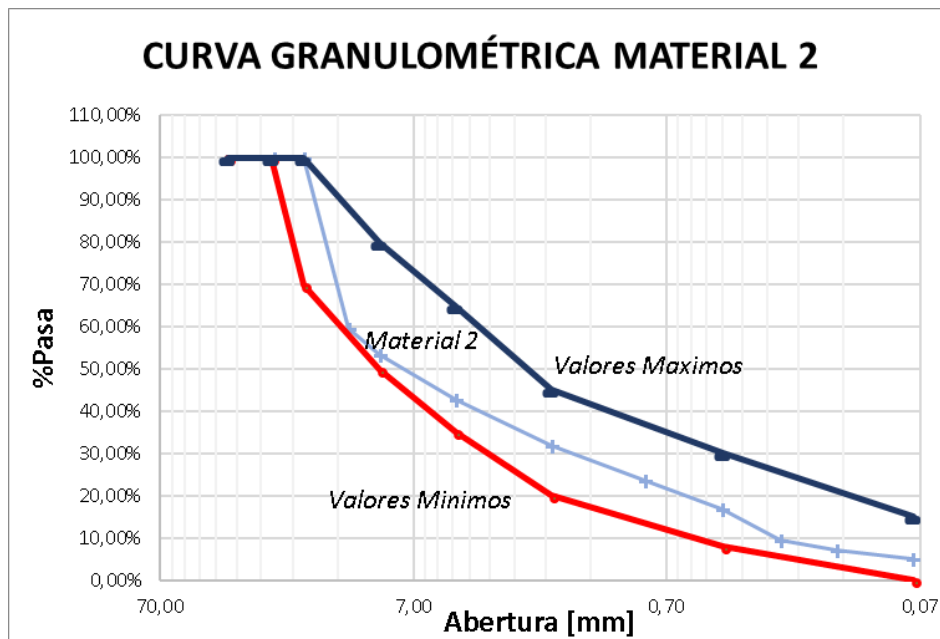


Figura 3 Curva granulométrica Material 2

A continuación, se representa el comportamiento de la variación de los tamaños de las partículas de las dos muestras de Material:

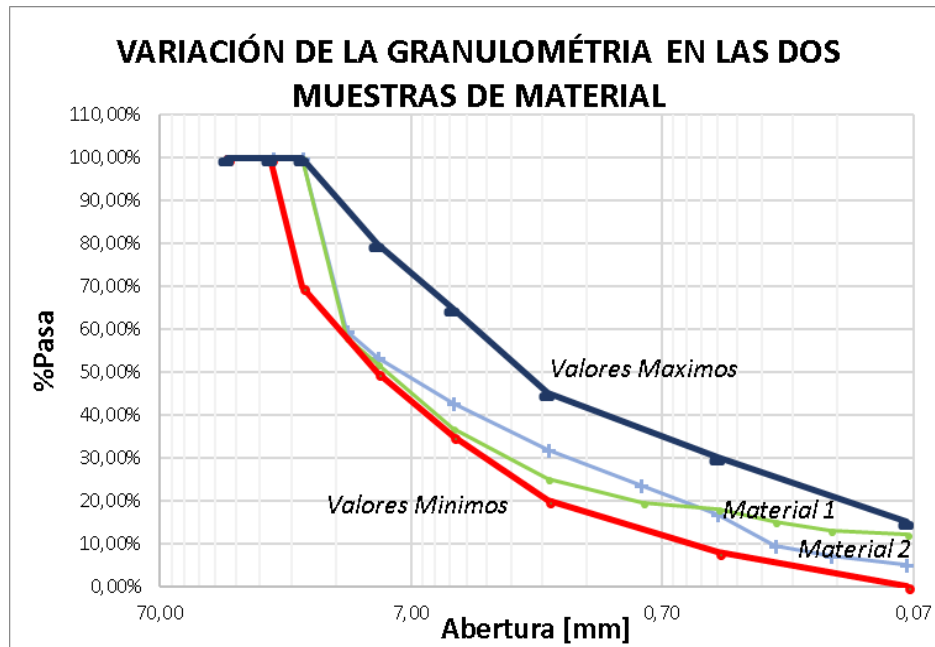


Figura 4. Grafica de la variación de la granulometría de las dos muestras de Material

Según los resultados obtenidos del ensayo para la determinación de los tamaños de las partículas de los suelos y con referencia en el Artículo 330 del Instituto Nacional de Vías se puede clasificar el Material 1 como BG – 25 y el Material 2 como BG – 27.

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)							
	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	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	70-100	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%	

Figura 5. Franjas granulométricas del material de Base Granular. Adaptada de Instituto Nacional De Vías. Base granular. Bogotá: INVIAS, 17h. (Artículo 330-13

Ensayo para las relaciones de humedad - peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación) I.N.V. E – 142

El ensayo se emplea para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos también llamada curva de compactación; en este estudio se compacto en un molde de 152.4 mm (6") de diámetro, con un martillo de 44.48 N (10 lbf) que cae libremente desde una altura de 457.2 mm (18"), produciendo una energía de compactación aproximada de 2700 kN–m/m³ (56 000 lbf–pie/pie³). (Instituto Nacional De Vías - INVIAS, sf)

La norma presenta las siguientes alternativas para la ejecución del ensayo:

Tabla 4.

Método para realizar el ensayo modificado de compactación.

MÉTODO	A	B	C
DIÁMETRO DEL MOLDE	101.6 mm (4")	101.6 mm (4")	152.4 mm (6")
MATERIAL	Pasa tamiz de 4.75 mm (No. 4)	Pasa tamiz de 9.5 mm (3/8")	Pasa tamiz de 19.0 mm (3/4")
CAPAS	5	5	5
GOLPES/CAPA	25	25	56
USO	Si 25 % o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4). Sin embargo, si en este tamiz queda retenida entre 5 y 25 % de la masa, se puede usar el Método A, pero se requerirá la corrección por sobretamaños (Ver numeral 1.4) y, en este caso, el uso del Método A no reportará ninguna ventaja	Si 25 % o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 9.5 mm (3/8"). Sin embargo, si en este tamiz queda retenida entre 5 y 25 % de la masa, se puede usar el Método B, pero se requerirá la corrección por sobretamaños (Ver numeral 1.4). En este caso, la única ventaja de usar el Método B en lugar del Método C, es que se necesita menos cantidad de muestra y el molde pequeño es más fácil de usar	Si 30 % o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 19.0 mm (3/4") (Ver numeral 1.4)
OTRO USO	Si este requisito de granulometría no se puede cumplir, se deben usar los Métodos B o C	Si este requisito de granulometría no se puede cumplir, se debe usar el Método C	

Fuente: Instituto Nacional De Vías. Relaciones de humedad – masa unitaria seca en los suelos (ensayo modificado de compactación). Bogotá: INVIAS, 12 h. (I.N.V.E-142-13)



Figura 6. Materiales Utilizados para ensayo de Próctor Modificado

Con la información suministrada se procede a elegir el método para el ensayo, para este caso se realiza por la alternativa del método C, el cual para cada molde compactado se deben realizar 5 capas y a cada se aplica un total de 56 golpes bien distribuidos en el área transversal del material en un molde de 152.4 mm (6") de diámetro y el resultado de la realización del ensayo, son las curvas de compactación para las dos muestras de Material en estudio:

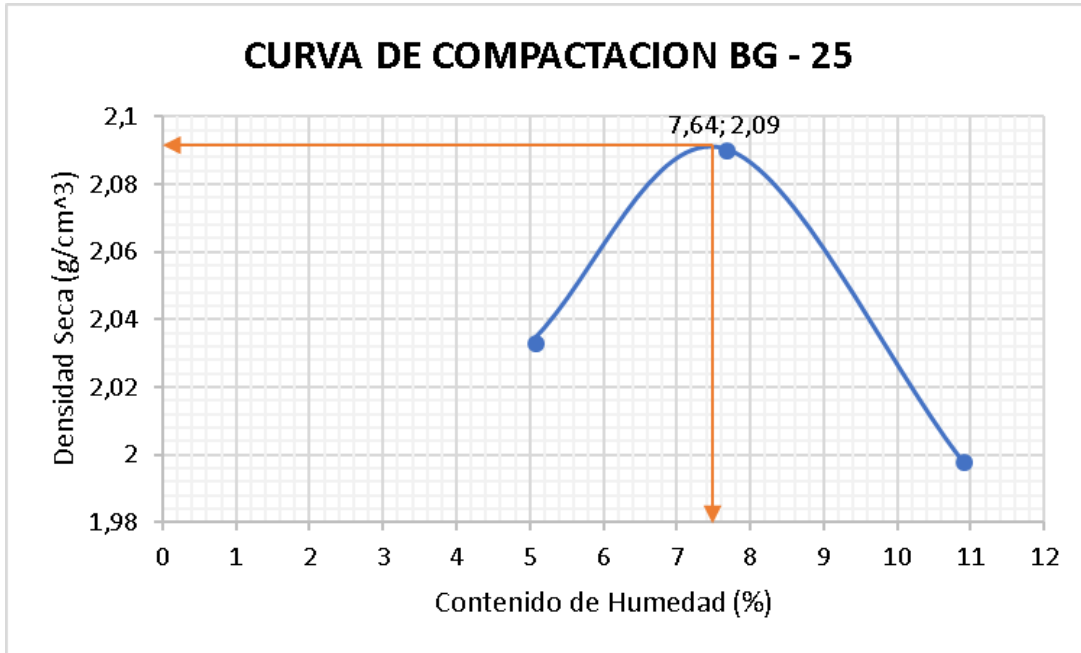


Figura 7. Curva de compactación Material 1 (BG - 25)

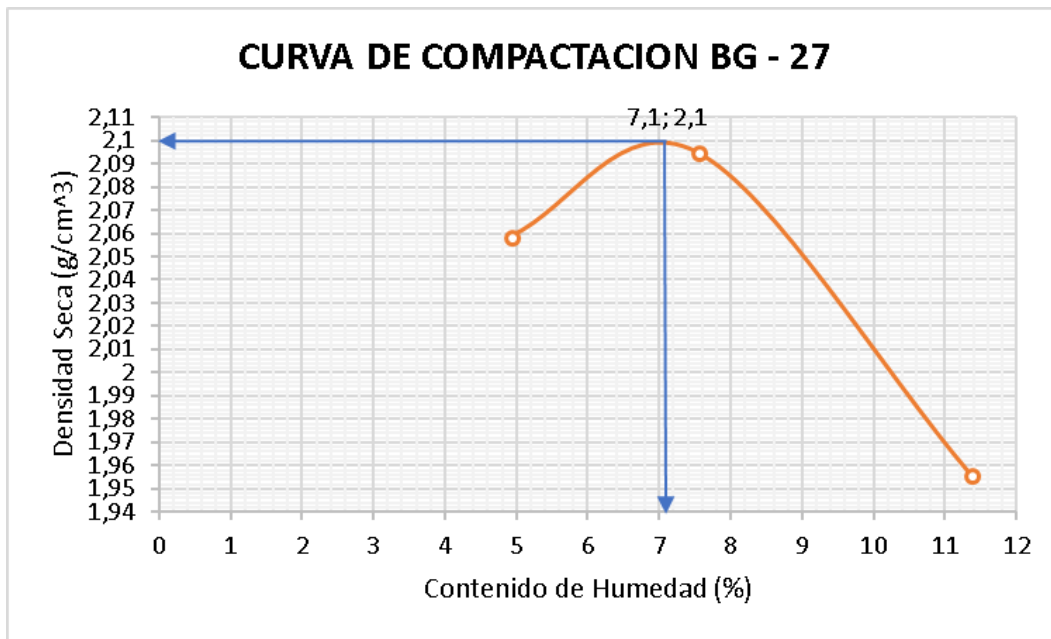


Figura 8. Curva de compactación Material 2 (BG - 27)

Las gráficas de las curvas de compactación del Material 1 y Material 2, permiten determinar los valores de densidad máxima seca y humedad óptima, para el Material 1 (BG – 25) 2.09 y 7.64 respectivamente y para la muestra de Material 2 (BG – 27) 2.1 y 7.1 respectivamente.



Figura 9. Proceso de compactación

Módulo resiliente de suelos y agregados INV E – 156

Este método describe procedimientos para la determinación del módulo de resiliencia de suelos de subrasante y de materiales granulares de base y de subbase. 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. (Instituto Nacional De vías - INVIAS, sf)

En este estudio de investigación, se evaluó el comportamiento de muestras de base granular empleadas en la construcción de pavimentos flexibles en la ciudad de Bucaramanga, para las cuales se elaboraron probetas con dimensiones de 100 mm de diámetro y 200 mm de longitud, compactadas con contenido de agua correspondiente al de la humedad óptima, para luego realizar el montaje de cada una en la maquina triaxial mediante método dinámico para la simulación de las cargas móviles del tránsito y simular todas las condiciones de esfuerzo.



Figura 10. Probeta muestra de Material 1 (BG - 25)



Figura 11. Probeta muestra de Material 2 (BG - 27)

En mención de lo anterior, se desarrollaron dos probetas, una con la muestra de Material 1 (BG – 25) y la otra con la muestra de Material 2 (BG – 27), a las cuales se le halló la cantidad de humedad natural y con esta, su respectiva humedad óptima de trabajo para realizar el proceso de compactado involucrando el número de capas y número de golpes por capa, descrito por la norma INV E-142.



Figura 12. Determinación de la humedad natural de las muestras de Material

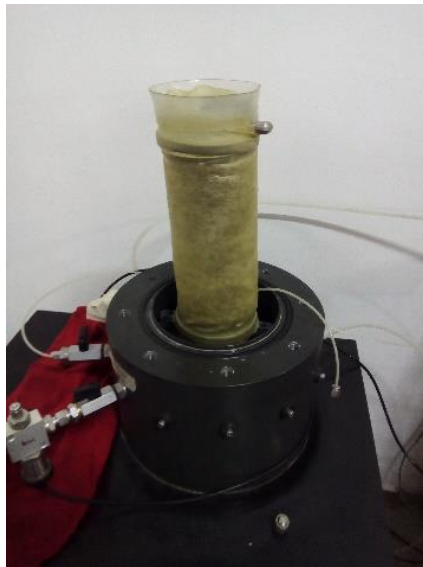


Figura 13. Montaje de las probetas en la maquina triaxial

En la maquina triaxial se implementó primeramente el número de ciclos, presión de cámara y numero de aplicaciones de carga para el acondicionamiento de la muestra de Material, terminado este proceso se procede a aplicar las secuencias de carga, presión de cámara, numero de ciclos y

cantidades de carga, a lo cual se sometieron las muestras de Material establecidos por la norma INV E-156. (Instituto Nacional De vías - INVIAS, sf)

Tabla 5.

Secuencia de ensayo para materiales de base granular

Secuencia No.	P ciclico	P contacto	Presion de camara S3	No de aplicaciones de carga
0	0,73121	0,0809	103,4	500 - 1000
1	0,14608	0,01649	20,7	100
2	0,29295	0,0322	20,7	100
3	0,43904	0,04869	20,7	100
4	0,24347	0,02749	34,5	100
5	0,48695	0,05419	34,5	100
6	0,73121	0,0809	34,5	100
7	0,48695	0,05419	68,9	100
8	0,97468	0,10838	68,9	100
9	1,46163	0,16258	68,9	100
10	0,48695	0,05419	103,4	100
11	0,73121	0,0809	103,4	100
12	1,46163	0,16258	103,4	100
13	0,73121	0,0809	137,9	100
14	0,97468	0,10838	137,9	100
15	1,94936	0,21677	137,9	100

Fuente: INV E-156