

ESTUDIO DE CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE Y EL ENSAYO
DE CBR PARA SUELO REPRESENTATIVO DE LA MESETA DE
BUCARAMANGA

JEFFERSON RAMÍREZ JAIMES
IVÁN DANIEL MELO NEIRA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2018

ESTUDIO DE CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE Y EL ENSAYO
DE CBR PARA SUELO REPRESENTATIVO DE LA MESETA DE
BUCARAMANGA

JEFFERSON RAMÍREZ JAIMES
IVÁN DANIEL MELO NEIRA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON
PhD EN INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2018



DEDICATORIA

Quiero agradecerle a mi familia, en especial a mis padres, Carmenza Jaimes Delgado y Jesus Manuel Ramirez Jaimes, a mi mejor amigo y hermano Breimer Manuel Ramirez Jaimes quienes me han brindado su apoyo y me han guiado en este camino con amor y comprensión

A mi director de proyecto Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, quien con su experiencia nos guio en cada una de las etapas del proyecto. Personalmente le guardo admiración

A mi compañero Iván Daniel Melo Neira por su compromiso y dedicación con esta meta que logramos alcanzar juntos.

A la Universidad industrial de Santander por la preparación obtenida.

A todas las personas que de alguna forma contribuyeron con este logro

¡Muchas gracias por todo!

Jefferson Ramirez Jaimes

DEDICATORIA

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, su guía y fortaleza en todo momento de mi vida.

A toda mi familia, en especial a mis padres, Medarda Neira Rueda y Hector Iván Melo Molina, a mi hermana Alejandra Sofia Melo Neira quienes fueron un gran apoyo, muchas gracias por su paciencia y sobre todo por su amor.

A mi director de proyecto Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, quien con su experiencia nos guio en cada una de las etapas del proyecto.

A mi compañero Jefferson Ramirez Jaimes por alcanzar estos logros juntos pese a y las dificultades surgidas.

A todas aquellas personas que estuvieron presentes en la realización de esta meta, agradecer todas sus ayudas, sus consejos y su dedicación.

¡Muchas gracias por todo!

Iván Daniel Melo Neira

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen este trabajo a:

A Dios por ser nuestra fortaleza y guía durante cada una de las etapas de nuestra vida.

A nuestros familiares por ser un apoyo incondicional.

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

A todas las personas que de una u otra forma colaboraron o ayudaron de alguna manera a hacer posible este logro en nuestras vidas

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS	18
1.1. GENERAL.....	18
1.2. ESPECÍFICOS.....	18
2. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. MÓDULO RESILIENTE.....	19
2.1.1. Modelo de Seed.	19
2.1.2. Modelo MEPDG.....	20
2.1.3. Modelo AASHTO.....	21
2.2. VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR).....	21
2.2.1. Modelos que relacionan CBR y Módulo resiliente.....	22
3. METODOLOGIA Y RECOPIACION DE LA INFORMACIÓN.....	23
3.1. MUESTREO.....	23
3.1.1. Identificación del suelo representativo de la meseta de Bucaramanga.....	24
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO	25
3.2.1. Granulometría y Plasticidad.....	25
3.2.2. DENSIDAD.....	26
4. ENSAYO DE CALIFORNIA BEARING RATION (CBR)	27
5. ENSAYO DE MODULO RESILIENTE.....	28

5.1. MONTAJE DE LA MUESTRA	28
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	30
6.1. MÓDULO RESILIENTE.....	30
6.1.1. Ecuaciones constitutivas del módulo resiliente.	30
6.2. SELECCIÓN DE VALORES DE MÓDULO RESILIENTE	31
6.3. CORRELACIÓN ENTRE MÓDULO RESILIENTE Y CBR	33
6.4. VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE RESPECTO A LA HUMEDAD:.....	34
7. CONCLUSIONES.....	35
BIBLIOGRAFIA.....	37

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría y plasticidad de muestras de suelos	25
Tabla 2. Proctor muestra 1	26
Tabla 3. Proctor muestra 2	26
Tabla 4. Valores de CBR y Módulo resiliente para definir el modelo.....	32
Tabla 5. Ecuaciones constitutivas.....	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Correlaciones M_r vs CBR	22
Figura 2. Ubicación espacial del lugar de la toma de muestras.....	23
Figura 3. Muestra de suelo 1	24
Figura 4. Muestra de suelo 2	24
Figura 5. Ensayo de CBR	27
Figura 6. Construcción de probeta.....	28
Figura 7. Montaje de la probeta	29
Figura 8. Cámara triaxial.....	29
Figura 9. M_r muestra 1.....	30
Figura 10. M_r muestra 2.....	30
Figura 11. Estructura 1	31
Figura 12. Estructura 2	32

LISTA DE ANEXOS

(Los anexos están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS)

Anexo A. CBR

Anexo B. MÓDULO RECILIENTE

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE Y EL ENSAYO DE CBR PARA SUELO REPRESENTATIVO DE LA MESETA DE BUCARAMANGA*

AUTORES: JEFFERSON RAMÍREZ JAIMES **
IVÁN DANIEL MELO NEIRA**

PALABRAS CLAVE: MODULO RESILIENTE, ENSAYO CBR, ESTRUCTURA DE PAVIMENTOS, PROCTOR, CORRELACIÓN, GRANULOMETRÍA, PLASTICIDAD, HUMEDAD OPTIMA, DENSIDAD MÁXIMA.

DESCRIPCIÓN:

Se estudió la relación entre el Módulo Resiliente y el ensayo de California Bearing Ration (CBR) para un suelo representativo de la Meseta de Bucaramanga, debido a que el módulo resiliente no es un parámetro constante del material y es fundamental para el diseño de una estructura de pavimentos por métodos racionales debido a que este está sometido a cargas dinámicas que lo deforman y lo deterioran, pero determinarlo tiene un precio elevado porque requiere equipos de alta precisión, por lo que se presenta una alternativa de menor costo, pero también menos precisa, consiste en utilizar los resultados de estudios que lo relacionan con el ensayo de California Bearing Ration. El estudio se realizó sobre dos muestras tomadas en dos puntos de la ciudad (dentro de la Meseta de Bucaramanga) a los cuales se determinó su granulometría y plasticidad a fin de comprobar si son el tipo de suelo más abundante (cuerpo de los limos rojos), se determinó su humedad óptima y densidad máxima mediante el ensayo de Proctor según los lineamientos de INVIAS, posteriormente se realizaron los ensayos de CBR y Módulo Resiliente en condiciones de humedad óptima y saturada, se obtuvo la ecuación constitutiva de módulo resiliente, se calculó una variación de dicho parámetro de acuerdo al contenido de humedad de la muestra y finalmente siguiendo un modelo lineal se determinó una ecuación que correlaciona estos dos ensayos.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería civil, Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzon, PhD. En ingeniería civil

ABSTRACT

TITULO: ESTUDIO DE CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE Y EL ENSAYO DE CBR PARA SUELO REPRESENTATIVO DE LA MESETA DE BUCARAMANGA*

AUTORES: JEFFERSON RAMÍREZ JAIMES **
IVÁN DANIEL MELO NEIRA**

KEY WORDS: RESILIENT MODULE, CBR TEST, PAVEMENT STRUCTURE, PROCTOR, CORRELATION, GRANULARITY, PLASTICITY, OPTIMUM HUMIDITY, MAXIMUM DENSITY.

DESCRIPCIÓN:

The relationship between the Resilient Module and the California Bearing Ration (CBR) test for a soil representative of the Bucara-Manga Plateau was studied, because the resilient module is not a constant parameter of the material and is fundamental for the design of a pavement structure by rational methods because it is subject to dynamic loads that deform and deteriorate it, but determining it has a high price because it requires high precision equipment, so a lower cost alternative is presented, but also less precise, consists of using the results of studies that relate it to the California bearing ration test. The study was carried out on two samples taken at two points in the city (within the Bucaramanga Plateau) to which it was determined its granulometry and plasticity in order to check if they are the most abundant soil type (body of the red silts), its optimum humidity and density were determined. Maximum performance through the Proctor test according to the guidelines of INVIAS, afterwards the CBR and Resilient Module tests were carried out under conditions of optimum and saturated humidity, the constitutive equation of resilient module was obtained, a variation of said parameter was calculated according to the moisture content of the sample and finally following a linear model an equation was determined that correlates these two tests.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería civil, Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzon, PhD. En ingeniería civil

INTRODUCCIÓN

Un pavimento se ve sometido a cargas dinámicas ocasionadas por el tráfico, las cuales lo deforman y deterioran, dichas deformaciones pueden ser elásticas (resilientes) o plásticas (permanente). Bajo cargas móviles las deformaciones permanentes se van acumulando y con cada repetición la deformación disminuye hasta un estado en que es recuperable (elástica), de ahí el concepto de “módulo resiliente el cual indica qué tan rígido es un material bajo carga cíclica del tipo resiliente y es un parámetro de gran importancia cuando el diseño de pavimentos se realiza por métodos racionales”³

La metodología actual para diseño de pavimentos utilizada por el método aashto (american association of state highway and transportation officials) considera que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales constitutivos de la sección de una carretera es el módulo resiliente.

Dicho parámetro no es una propiedad constante del material, sino que depende de muchos factores. Los principales son: cantidad y magnitud de aplicaciones de carga, tixotropía, método y condiciones de compactación. La prueba en la que se determina el valor del Módulo Resiliente es, usualmente, un ensayo de compresión triaxial con carga cíclica normalizado por invías (E-156-13) y correspondiente a la norma (AASHTO t 307-99).

El ensayo de módulo resiliente tiene un precio elevado porque requiere equipos de alta precisión. Una alternativa de menor costo, pero también menos precisa, consiste en utilizar los resultados de estudios que relacionan el ensayo de california bearing ration (cbr) con el módulo resiliente. Existen bases de datos que relacionan

³ RONDON, Hugo. Pavimentos: materiales, construcción y diseño. Bogotá, CO: Ecoe Ediciones, 2015, p.355

dichos ensayos, con lo cual se puede obtener valores aproximados de módulo resiliente a partir del ensayo de cbr, pero ya que el módulo resiliente no es una constante en el material, estos datos solo pueden usarse en las regiones en las cuales se realizaron estos ensayos.

En la ciudad de Bucaramanga no se conocen estudios que relacionen estos ensayos, por ello es importante crear una base de datos con suelos representativos (abundantes), sometidos a diferentes puntos de su curva de humedad en el cual se comparen los ensayos del módulo resiliente con el valor del cbr.

1. OBJETIVOS

1.1. GENERAL

- Establecer una relación entre el módulo resiliente con el ensayo de California Bearing Ration (CBR) a partir del análisis mecánico de un suelo representativo de la meseta de Bucaramanga en diferentes puntos de su curva de humedad.

1.2. ESPECÍFICOS

- Determinar la ecuación constitutiva del Módulo resiliente de muestras de suelo de la Meseta de Bucaramanga.
- Determinar la variación de la rigidez de muestras de suelo con variación en el contenido de humedad.
- Establecer modelos de predicción del módulo resiliente de suelos con base en ensayo de CBR para suelos de la meseta de Bucaramanga.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. MÓDULO RESILIENTE

El módulo resiliente que es la relación entre el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial y la deformación axial recuperable, es empleado en el método AASHTO y en métodos mecanicistas de diseño de pavimentos.

Este módulo no es una propiedad constante del material, está afectada por diferentes factores como;

Nivel de esfuerzos, Frecuencia de carga, Contenido de betún, Tipo de agregado, Contenido de vacíos, Tipo y contenido de modificadores, Tipos de prueba y Temperatura.

Para definir su variabilidad se han planteado diferentes modelos matemáticos, a continuación se presentan los más frecuentes en la literatura:

2.1.1. Modelo de Seed. El modelo del esfuerzo bulk o también conocido como modelo K- θ , fue considerado el mejor procedimiento para la determinación del módulo resiliente de suelos granulares y fue propuesto por Seed y otros (1967). Este modelo describe el comportamiento resiliente de un material sólo como función de su esfuerzo de confinamiento, sin considerar el efecto generado por el esfuerzo desviador. Su estimación se puede realizar por medio de la siguiente formulación:

$$Mr = k_1 * \theta^{k_2},$$

Donde:

Mr: Modulo resiliente

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

2.1.2. Modelo MEPDG. El national cooperative highway research program (NCHRP) en el proyecto (project 1-37A) planteo el siguiente modelo el cual es usado por el (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide).

:

$$Mr = k_1 * Pa * \left(\frac{\theta}{pa}\right)^{k_2} * \left(\frac{T_{oct}}{pa} + 1\right)^{k_3}$$

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

k_1, k_2, k_3 : Constantes de regresión

Pa: Presión atmosférica que equivale a 101,325 [kPa]

Toct:esfuerzo cortante octahédrico

$$T_{oct} = \frac{1}{3} * ((s_3 - s_3 + s_{max})^2 + (s_3 - s_3 + s_{max})^2 + (s_3 - s_3)^2)^{1/2}$$

$$T_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * s_{max}$$

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

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

2.1.3. Modelo AASHTO. La guía de diseño AASHTO recomienda el modelo del esfuerzo desviador para la estimación del módulo resiliente para los suelos de grano fino. Este modelo esta expresado por la siguiente ecuación:

$$Mr = k_3 * \theta^{k_4} * \sigma_d^{k_5}$$

Donde:

Mr: Modulo resiliente.

Θ : Esfuerzo bulk, es la suma de los esfuerzos principales

k_3, k_4, k_5 : Constantes

σ_d :esfuerzo desviador

2.2. VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)

“El Ensayo CBR (California Bearing Ratio) mide la resistencia que opone un material a la penetración de un cilindro metálico de 1.5 pulgadas de diámetro. Se emplea para evaluar la calidad del terreno como subrasante, sub base o base de pavimentos.

Este método fue propuesto en 1929 por los ingenieros T. E. Stanton y O. J. Porter del departamento de carreteras de California. Desde esa fecha tanto en Europa como en América, el método CBR se ha generalizado y es una forma de clasificación de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base en la construcción de carreteras. Es un ensayo fácil de realizar, por esto se han realizado diferentes estudios que lo correlacionan con otros parámetros.

2.2.1. Modelos que relacionan CBR y Módulo resiliente. En la literatura recopilada, diversos autores presentan resultados de estudios que relacionan el Módulo Resiliente y el CBR de un suelo.

Figura 1. Correlaciones M_r vs CBR

Relación	Referencia
$M_r(ksi) = 1.42CBR$ Para suelos con CBR menores a 10 (1.2)	Heukelon y Klomp (1962)
$M_r(psi) = 5409CBR^{0.71}$ (1.3)	Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (Green y Hall, 1975)
$M_r(psi) = 3000CBR^{0.65}$ (1.4)	South African Council on Scientific and Industrial Research (CSIR)
$M_r(psi) = 2555CBR^{0.64}$ (1.9)	Powell et al. (1984) y NCHRP (2004) Transport and Road Research Laboratory (TRRL) y M-E Pavement Design Guide-Level 2 (USA)
$M_r(psi) = 3116CBR^{0.67797}$ (1.10)	Webb y Campbell (1986) Departamento de Transporte de Georgia
$M_r(psi) = 10^{(0.85\log(CBR)+2.97)}$ (1.11)	Newcomb y Birgisson (1999) Departamento de Transporte de Alabama
$\log M_r(ksi) = 1.0016 + 0.043(CBR) - 1.9557\left(\frac{\log \sigma_v}{CBR}\right) - 0.1705 \log \sigma_v$ (1.12)	Lofti (1984) y Lofti et al (1988)

Fuente: PEREZ GONZALES, Natalia, et al. Modelo para estimar el módulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación. [En línea]. Instituto mexicano del transporte. Sanfandila, Qro. 2016. (Recuperado 10 de marzo de 2017) Disponible en: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt475.pdf>

3. METODOLOGIA Y RECOPIACION DE LA INFORMACIÓN

A continuación, se describen las fases que se siguieron para la realización de esta investigación.

3.1. MUESTREO

La toma de muestras se realizó en dos puntos diferentes de la ciudad de Bucaramanga: La primera muestra se localizó en el Barrio Cabecera del Llano (calle 34 con carrera 33), el segundo muestreo se realizó en predios de la Universidad Industrial de Santander.

(I.N.V. E – 111 – 07)

Figura 2. Ubicación espacial del lugar de la toma de muestras



Fuente: PAGE, Lawrence.BRIN, Sergey.Google Maps Bucaramanga [en línea]. Estados Unidos. Alphabet Inc. 2005. (Recuperado el 5 de agosto 2017.)
Disponible en: <https://www.google.com/maps/@7.1303143,-73.1232379,15z>

Figura 3. Muestra de suelo 1



Figura 4. Muestra de suelo 2



3.1.1. Identificación del suelo representativo de la meseta de Bucaramanga.

Julivert, 1961 definió el miembro “Limos Rojos” como los suelos que se encuentran en el sector Urbanizado de Bucaramanga, aunque no de manera uniforme. Suelos del miembro Limos Rojos, se consideraron como el material de mayor presencia en las subrasantes de pavimentos de las vías de la ciudad de Bucaramanga.

Geomorfológicamente este miembro constituye lo que anteriormente se denominaba como “Meseta de Bucaramanga”, con relieve semiplano y pendientes entre 2 y 7%; el drenaje es escaso paralelo y superficial. Está constituido por arenas

arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Existen esporádicos bloques angulares grandes, de arenisca, asociados superficialmente a este miembro; estos cantos pueden estar embebidos dentro de limos rojos y se caracterizan por estar meteorizados.⁴

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO

Con el fin de clasificar el tipo de suelo de las muestras extraídas y determinar el contenido óptimo de humedad y su densidad máxima se sometieron los especímenes a los siguientes ensayos.

3.2.1. Granulometría y Plasticidad. En la tabla 1 se indican los valores de contenido de fracciones gruesas, finas y la plasticidad de las muestras de suelo, siguiendo los lineamientos de las normas I.N.V. E – 213 – 07, I.N.V. E – 125 – 07 y I.N.V. E – 126 – 07.

Tabla 1. Granulometría y plasticidad de muestras de suelos

Muestra No	Granulometría			Plasticidad	
	Gravas	Arenas	Finos	LL (%)	IP (%)
1	6,8	55,2	38	28	7
2	1,4	51,3	47,3	27	7

Las muestras de suelo se clasificaron como SM-SC (arena limo-arcillosa).

⁴ DEL TORO, Wilfredo, Estudio geotécnico centro de convenciones neomundo Bucaramanga, Septiembre 2013 p. 25

3.2.2. DENSIDAD. Con base en el ensayo de Proctor (I.N.V. E – 141 – 07), se determinó el contenido de humedad óptima y la densidad máxima de las muestras de suelo.

Tabla 2. Proctor muestra 1

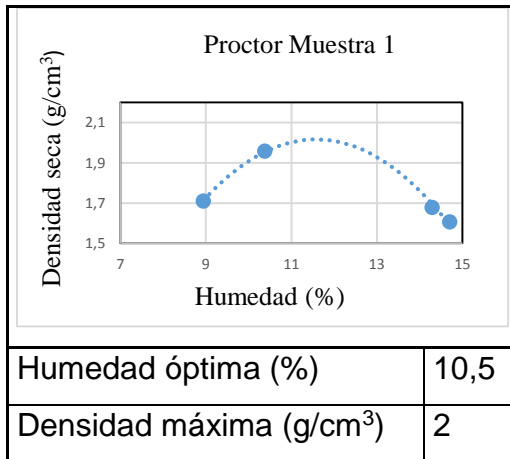
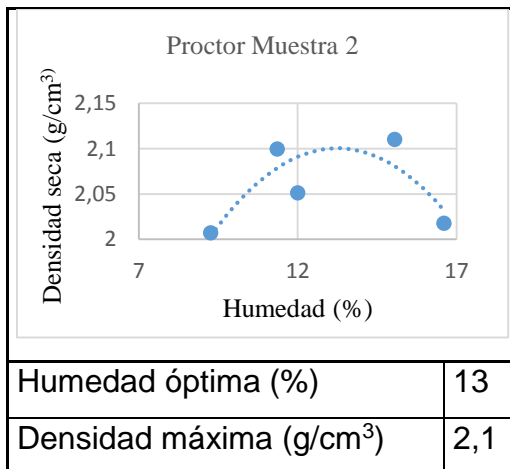


Tabla 3. Proctor muestra 2



4. ENSAYO DE CALIFORNIA BEARING RATION (CBR)

El ensayo de CBR se realizó siguiendo los lineamientos de la normativa (I.N.V. E – 148 – 07).

Figura 5. Ensayo de CBR



Sobre muestras compactadas a la densidad máxima de Proctor modificado se obtuvieron resultados de CBR de 5% en la muestra 1 y 6% en la muestra 2. Los cálculos de CBR para las muestras 1 y 2 se encuentran en el anexo A.

5. ENSAYO DE MODULO RESILIENTE

Se realizó el ensayo de módulo resiliente descrito en la norma INV-E 156, bajo dos condiciones de humedad. Sobre la misma probeta, en una primera prueba, se determinó el Módulo resiliente en condición de humedad óptima y después de saturar el material se practicó una segunda prueba.

5.1. MONTAJE DE LA MUESTRA

Se compactaron probetas de 10 cm de diámetro y 20cm de altura con la humedad óptima obtenida en el ensayo de proctor modificado. La energía de compactación fue de 3 capas con 25 golpes por capa, con martillo de 10 lbs y altura de caída de 18”.

Figura 6. Construcción de probeta



Figura 7. Montaje de la probeta

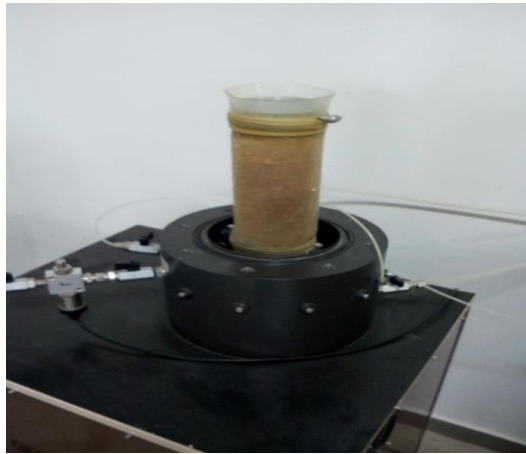
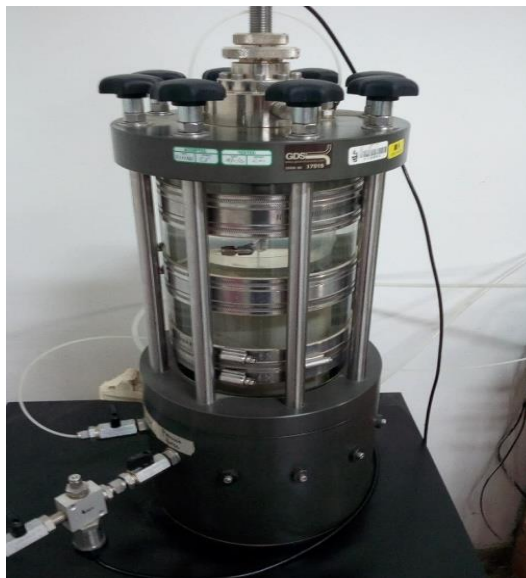


Figura 8. Cámara triaxial



Como establece la norma INV-E 156 del INVIAS, se aplican las cargas con una onda en forma de medio seno verso, el cual consta con un tiempo de aplicación de carga de 0,1 segundos y un periodo de reposo de 0,9 segundos entre cada pulso de aplicación de carga, Usando el software GDSLAB.⁵

⁵ DUARTE, Erika., & PAEZ, Brayan. Guía práctica para el ensayo triaxial estático consolidado no drenado (cu) con gds triaxial automated system y gds slab v2.5. (Tesis de pregrado). universidad industrial de Santander, laboratorio de materiales

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. MODULO RESILIENTE

Usando los datos obtenidos en el ensayo triaxial cíclico para las dos muestras de suelo, se calculó el módulo resiliente con base en los modelos constitutivos referenciados anteriormente.

6.1.1. Ecuaciones constitutivas del módulo resiliente. Ajustando ecuaciones por el método de mínimos cuadrados, se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 9. Mr muestra 1

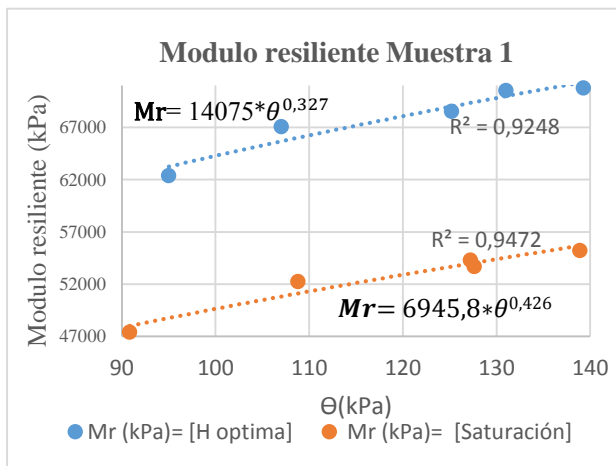
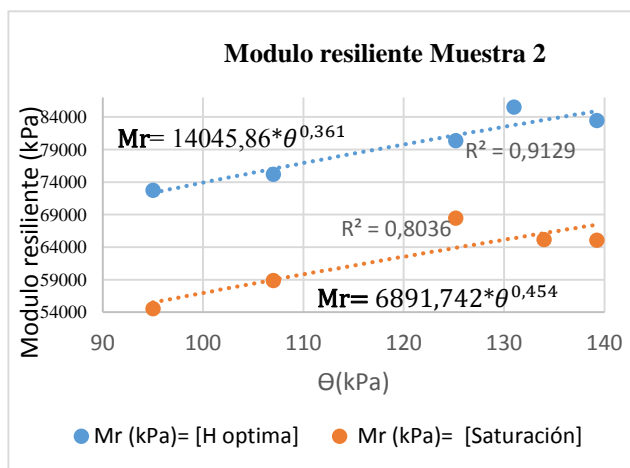


Figura 10. Mr muestra 2



6.2. SELECCIÓN DE VALORES DE MÓDULO RESILIENTE

Para establecer el valor del módulo resiliente de una subrasante, se consideró una estructura de pavimento compuesta por materiales tradicionalmente empleados en su construcción y con espesores de capas usuales:

Empleando software de “Análisis de estructuras de capas elásticas”, se asumieron valores de rigidez de las capas del pavimento y mediante iteraciones sucesivas, se calcularon esfuerzos en la subrasante (20 cm por debajo del nivel inferior de capas granulares). Las iteraciones se hicieron hasta verificar que el valor del módulo resiliente calculado con el modelo de Seed, corresponda con el valor inicialmente asumido.

Figura 11. Estructura 1

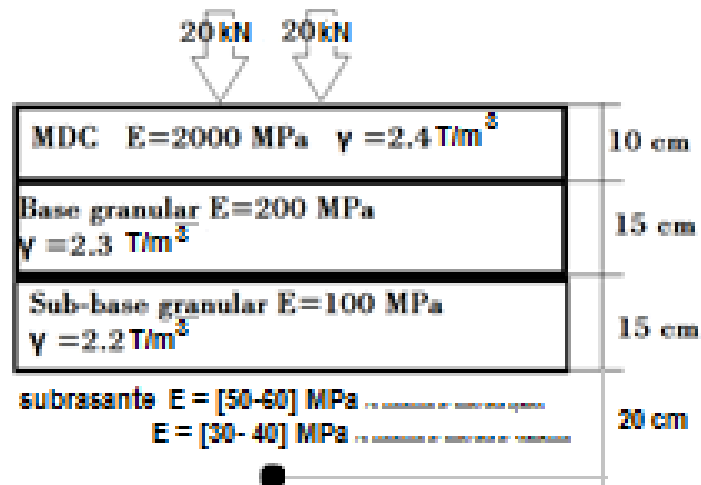
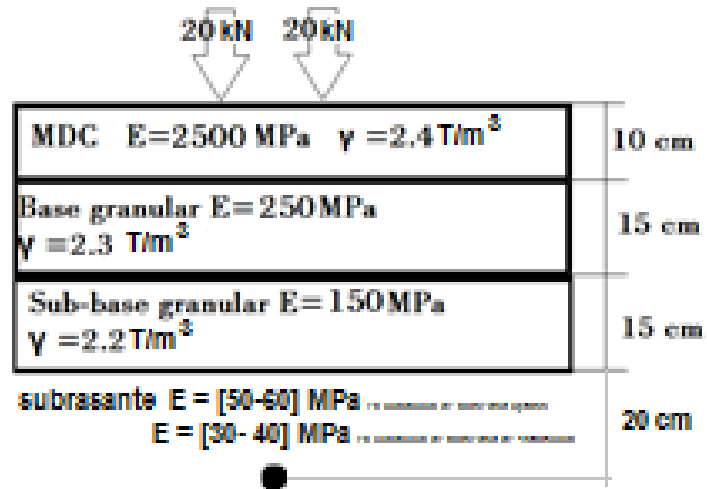


Figura 12. Estructura 2



En la tabla 4 se muestran los valores de módulo resiliente obtenidos en las estructuras supuestas.

Tabla 4. Valores de CBR y Módulo resiliente para definir el modelo.

Muestra (condición)	CBR (%)	Estructura1	Estrutura2	Mr(Mpa) asumido
		Mr(Mpa)	Mr(Mpa)	
Muestra1 (Wsat)	5	34,9	33,9	34,4
Muestra2 (Wsat)	6	38,5	37,5	38,0

6.3. CORRELACIÓN ENTRE MODULO RESILIENTE Y CBR

La correlación se realizó empleando un modelo lineal:

$$MR(MPa) = K(MPa) * CBR(\%)$$

Donde:

MR: módulo resiliente del suelo representativo de la mesta de Bucaramanga

K: constante de proporcionalidad

CBR: relación de soporte de california

Y se obtuvieron los siguientes resultados:

Muestra 1:

$$MR(MPa) = 6.9 * CBR$$

Muestra 2:

$$MR(MPa) = 6.3 * CBR$$

se proponen el siguiente modelo de predicción de módulo resiliente mediante el ensayo de CBR promediando los valores de K:

$$MR(MPa) = 6.5 * CBR$$

6.4. VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE RESPECTO A LA HUMEDAD:

Con base en las pruebas realizadas se puede determinar la variación del módulo resiliente en condición de humedad óptima con respecto a la condición de humedad de saturación- Los valores obtenidos muestran un valor de Módulo resiliente en condición de humedad de saturación que son entre el 66 % y el 73% del Módulo resiliente en condición de humedad óptima

$$\% \delta MR = \frac{MR_{hs}}{MR_{ho}} * 100$$

Donde:

MR_{ho} : Módulo resiliente humedad optima

MR_{hs} : Módulo resiliente humedad de saturación

Muestra 1:

$$66 \% = \frac{34.4}{52} * 100$$

Muestra 2:

$$73 \% = \frac{38}{56.3} * 100$$

Los datos y cálculos usados en modulo los ensayos de módulo resiliente se encuentran en el anexo B.

7. CONCLUSIONES

- Se establecieron modelos constitutivos para el Módulo Resiliente de dos muestras de suelo de la Meseta de Bucaramanga.

Tabla 5. Ecuaciones constitutivas

Muestra	Modelo	Ecuación(kPa)
1	Seed $Mr=k_1*\theta^{k_2}$	$Mr= 6945,8*\theta^{0,426}$
2		$Mr= 6891,7*\theta^{0,454}$
1	MEPDG $Mr=k_1*Pa*(\theta P)^k$ $2*(\tau oct Pa+1)^{k_3}$	$Mr=392,3*Pa*(\theta Pa)^{0,31}*(\tau oct Pa+1)^{0,816}$
2		$Mr=319,5*Pa*(\theta Pa)^{0,02}*(\tau oct Pa+1)^{0,989}$
1	AASHTO $Mr =A \theta^{k_1}\sigma d^{k_2}$	$Mr = 6945,8* \theta^{0,42} \sigma d^{0,01}$
2		$Mr=6932,1* \theta^{0,45} \sigma d^{0,011}$

- Las muestras ensayadas presentaron reducción cercana al 30 % de la rigidez en estado saturado con respecto a su rigidez en condición de humedad óptima.
- Se estableció un modelo de predicción de módulo resiliente con base en el CBR, para suelos de la meseta de Bucaramanga.

$$MR(MPa) = 6.5 * CBR$$

- Los resultados obtenidos de Módulo resiliente al aplicar el modelo, se encuentran

entre el dominio de los valores obtenidos en estudios similares.

- El número de muestras ensayadas no permiten una elevada confiabilidad en el modelo, por lo que se recomienda que con otros estudios se conforme una base de datos, suficientemente amplia, que permita asignar valores de confiabilidad al modelo.

BIBLIOGRAFIA

CHANG, Luis. California Bearing Ratio: Origen. [En línea]. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. 2002. (Recuperado el 13 de marzo de 2017). Disponible en:

http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/labgeo32_p.pdf

DEL TORO, Wilfredo, Estudio geotécnico centro de convenciones neomundo Bucaramanga, Septiembre 2013. p. 25.

DUARTE, Erika., & PAEZ, Brayan.. Guía práctica para el ensayo triaxial estático consolidado no drenado (cu) con gds triaxial automated system y gds lab v2.5. (Tesis de pregrado). universidad industrial de Santander, laboratorio de materiales 2016

FERNÁNDEZ PAUCAR, Carlos., & SUÁREZ GALARZA, Maria. Correlación y fundamentos de utilización del módulo de reacción en el diseño de pavimentos rígidos, en función de los ensayos de CBR, DCP y ensayo dinámico de carga, con aplicación práctica en la vía Salado-Lentag en el tramo de las abscisas 50+000 A LA 55+000. [En línea]. Repositorio.espe.edu.ec. 2012. (Recuperado el 18 de abril de 2017) Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/5690>

COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos Bogotá, D.C., 2007. I.N.V. E – 213 – 07. p. 1-9.

COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación del límite líquido de los suelos. Bogotá, D.C., 2007. I.N.V. E – 125 – 07 .p. 1-13.

COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS .Ensayo de penetración normal (spt) y muestreo de suelos con tubo partido. Bogotá, D.C., 2007. I.N.V. E – 111 – 07. p. 1-11.

COLOMBIA.INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Ensayo normal de compactación .Bogotá, D.C., 2007 .I.N.V. E – 141 – 07 .p.1-12.

COLOMBIA.INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Límite plástico e índice de plasticidad de suelos .Bogotá, D.C., 2007.I.N.V. E – 126 – 07. p. 1-7.

COLOMBIA.INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Módulo resiliente de suelos de subrasante Bogotá, D.C., 2007.I.N.V. E – 156 – 07.p.1-33.

COLOMBIA.INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Relación de soporte del suelo en el laboratorio. Bogotá, D.C., 2007 .I.N.V. E – 148 – 07 .p. 1-15.

LEAL, Mario. RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE HALLADO POR RETROCALCULO Y EL ENCONTRADO EN ENSAYOS DE LABORATORIO. [En línea]. Bdigital.unal.edu.co.2011. (Recuperado el 13 de marzo de 2017).Disponible en:<http://www.bdigital.unal.edu.co/3774/1/296497.2011.pdf>

MORENO RUBIO, Javier. Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas: el módulo resiliente [En línea]. Ingeniería de camins, Canals i portsde: Universidad Politécnica de Cataluña. 2005-06.(Recuperado el 13 de marzo de 2017). Disponible en:<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3252>

PAGE, Lawrence.BRIN, Sergey.Google Maps Bucaramanga [en línea].Estados unidos. Alphabet Inc.2005. (Recuperado el 5 de agosto 2017.) Disponible en:<https://www.google.com/maps/@7.1303143,-73.1232379,15z>

PEREZ GONZALES,Natalia,*et al.* Modelo para estimar el módulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación. [En línea]. Intituto mexicano del transporte. Sanfandila, Qro. 2016. (Recuperado 10 de marzo de 2017)

Disponible en: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt475.pdf>

RAHN, Pete .Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. [En línea]. American Association of State Highway and Transportation Officials.2008. . (Recuperado el 13 de marzo de 2017).Disponible en:

<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428712666/AASHTO08.pdf>

RONDON, Hugo. Pavimentos: materiales, construcción y diseño. Bogotá, CO: Ecoe Ediciones, 2015, p.355.

