

**DETERMINACION DE LA ECUACION CONSTITUTIVA DEL MODULO  
RESILIENTE DE BASES GRANULARES EMPLEADAS EN BUCARAMANGA**

**BORIS MADRID CUADRADO.  
EDWIN MARTIN MEZA SAAVEDRA.**

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

**2017**

**DETERMINACION DE LA ECUACION CONSTITUTIVA DEL MODULO  
RESILIENTE DE BASES GRANULARES EMPLEADAS EN BUCARAMANGA**

**BORIS MADRID CUADRADO.  
EDWIN MARTIN MEZA SAAVEDRA.**

**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 FÍSICO – MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2017**

## DEDICATORIA

*Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por haberme guiado y fortalecido en esta etapa de mi vida.*

*A mi familia, en especial a mis padres, Rogert Antonio Madrid Riveros y Daysi Magola Cuadrado y mi hermano Rogert Madrid Cuadrado quienes con sus consejos fueron un gran apoyo, muchas gracias por su paciencia y comprensión, y sobre todo por su amor.*

*A las personas que nos acompañaron y ayudaron durante la realización del proyecto de grado en el laboratorio de materiales de la Universidad Industrial De Santander: Al laboratorista Álvaro Novoa, al ingeniero Héctor Torres, al laboratorista Jairo Hernández y al laboratorista German*

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

*A mi compañero Edwin Martin Meza Saavedra por alcanzar estos logros juntos pese a los obstáculos y las dificultades surgidas en el camino.*

*A todas aquellas personas que estuvieron presentes en la realización de esta meta, de este sueño que es tan importante para mí, agradecer todas sus ayudas, sus palabras motivadoras, sus conocimientos, sus consejos y su dedicación.*

*A mi congregación en la iglesia a la que asistía ya que por medio de esta pude recibir todos aquellos buenos consejos de aliento y superación personal que me sirvieron para motivarme durante la realización del proyecto de grado*

*A las películas y series de televisión basadas en historias bíblicas y de superación personal que me enseñaron a pensar que si tenemos fe, constancia y trabajamos duro en lo que queremos lograr y creemos en Dios todas nuestras peticiones Dios las hará posible.*

*¡Muchas gracias por todo!*

**BORIS MADRID CUADRADO.**

*Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por haberme guiado y fortalecido en esta etapa de mi vida.*

*A toda mi familia, en especial a mis padres, Mary Luz Saavedra Toloza y Luis Martin Meza Gómez, a mis hermanas Yari Leinny Parra Saavedra y Mary Alejandra Hernández Saavedra, quienes con sus consejos fueron un gran apoyo, muchas gracias por su paciencia y comprensión, y sobre todo por su amor.*

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

*A mi compañero Boris Madrid Cuadrado por alcanzar estos logros juntos pese a los obstáculos y las dificultades surgidas en el camino.*

*A mi pareja sentimental Hilda Caballero Velandia por haberme apoyado durante el transcurso y desarrollo del proyecto de grado.*

*A las personas encargadas del laboratorio de materiales de la universidad industrial de Santander que nos acompañaron y ayudaron durante la realización del proyecto de grado: Agradecimiento especial al laboratorista Álvaro Novoa, al ingeniero Héctor Torres, al laboratorista Jairo Hernández y al laboratorista German*

*A todas aquellas personas que estuvieron presentes en la realización de esta meta, de este sueño que es tan importante para mí, agradecer todas sus ayudas, sus palabras motivadoras, sus conocimientos, sus consejos y su dedicación.*

*Por último, A mis compañeros, quienes a través del tiempo fuimos fortaleciendo una amistad, muchas gracias por toda su colaboración,, por compartir experiencias, alegrías, frustraciones, llantos, tristezas, celebraciones y múltiples eventualidades que ayudaron a que hoy seamos como una familia, por aportarme confianza y por crecer juntos como profesionales, muchas gracias.*

*¡Muchas gracias por todo!*

**EDWIN MARTIN MEZA SAAVEDRA.**

## **AGRADECIMIENTO**

Los autores agradecen este trabajo a:

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

A nuestros familiares por ser apoyo y confianza depositada para el cumplimiento de esta meta.

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

A todas las personas que de una u otra forma colaboraron y colocaron su granito de apoyo para que este proyecto se llevara a cabo.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION	17
1. BASES GRANULARES DE UN PAVIMENTO	19
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA BASE GRANULAR	20
1.1.1 Durabilidad y Resistencia	20
1.1.2 Rigidez	20
1.2 REQUISITOS PARA AGREGADOS DE BASE GRANULAR	20
2. FUENTE DEL MATERIAL	22
3. MARCO TEÓRICO	23
3.1 MÓDULO RESILIENTE	23
3.2 MODELOS CONSTITUTIVOS USADOS PARA DETERMINAR EL MÓDULO RESILIENTE	25
3.2.1 Modelo No.1	26
3.2.2 Modelo No.2	26
3.2.3 Modelo No.3	27
4. METODOLOGIA DE TRABAJO	28
4.1 FABRICACIÓN DE PROBETAS	28
4.1.1 Resultado análisis granulométrico material A y B	29
4.1.2 Ensayo de proctor modificado (INV-E 142-13)	31
4.2 MONTAJE Y PRUEBAS DE MÓDULO RESILIENTE	32

5. RESULTADOS	36
6. ANÁLISIS DE LOS MODELOS CONSTITUTIVOS	41
7. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS RESILIENTE	43
8. CONCLUSIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47
ANEXOS	48

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Cantera Rio Chicamocha	22
Figura 2. Deformación de material granular al ser sometido a un ciclo de carga	23
Figura 3. Deformación permanente acumulada durante un ciclo de carga	24
Figura 4. Curvas granulométricas de los materiales	31
Figura 5. Tipo de onda de carga para realizar el ensayo de módulo resiliente	34
Figura 6. Módulos resiliente de los materiales de base granular en condición de humedad optima según la ecuación del modelo No.1	44
Figura 7. Módulos resiliente de los materiales de base granular en condición saturada según la ecuación del modelo No.1	44

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Requisitos de calidad para los agregados de base granular	21
Tabla 2. Resultados del análisis granulométrico del material a	29
Tabla 3. Resultados del análisis granulométrico del material b	30
Tabla 4. Humedades óptimas y densidades secas máximas de los materiales de ensayo	32
Tabla 5. Secuencia de ensayo para el material de base granular	35
Tabla 6. Módulo resiliente para la muestra BG-27, en condición de humedad optima	36
Tabla 7. Módulo resiliente para la muestra BG-27, en condición de humedad saturada	37
Tabla 8. Módulo resiliente para la muestra BG-25, en condición de humedad optima	37
Tabla 9. Módulo resiliente para la muestra BG-25, en condición de humedad saturada	38
Tabla 10. Ecuaciones obtenidas de los modelos matemáticos para el ensayo de módulo resiliente al material de base granular BG-27 en condición de humedad optima	40
Tabla 11. Ecuaciones obtenidas de los modelos matemáticos para el ensayo de módulo resiliente al material de base granular BG-27 en condición saturada	40
Tabla 12. Ecuaciones obtenidas de los modelos matemáticos para el ensayo de módulo resiliente al material de base granular BG-25 en condición de humedad optima	40
Tabla 13. Ecuaciones obtenidas de los modelos matemáticos para el ensayo de módulo resiliente al material de base granular BG-25 en condición saturada	40

Tabla 14. Desviación estándar de las datos de las ecuaciones de los modelos matemáticos de módulo resiliente del material de base granular BG-27 en condición de humedad optima	42
Tabla 15. Desviación estándar de las datos de las ecuaciones de los modelos matemáticos de módulo resiliente del material de base granular BG-27 en condición saturada	42
Tabla 16. Desviación estándar de las datos de las ecuaciones de los modelos matemáticos de módulo resiliente del material de base granular BG-25 en condición de humedad optima	42
Tabla 17. Desviación estándar de las datos de las ecuaciones de los modelos matemáticos de módulo resiliente del material de base granular BG-25 en condición saturada	42

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Procedimiento del análisis granulométrico (INV-E 123) de los materiales	48
ANEXO B. Procedimiento del ensayo de proctor modificado (INV-E 142) para los materiales	53
Anexo C. procedimiento para el montaje de la muestra en el equipo triaxial	62
Anexo D. procedimiento para la aplicación de cargas por medio del programa GDSLAB	63
Anexo E. Procedimiento para realización de la etapa de saturación y consolidación de las muestra	65

## RESUMEN

**TITULO:** DETERMINACION DE LA ECUACION CONSTITUTIVA DEL MODULO RESILIENTE DE BASES GRANULARES EMPLEADAS EN BUCARAMANGA.\*

**AUTOR(ES):** BORIS MADRID CUADRADO  
EDWIN MARTIN MEZA SAAVEDRA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** módulo resiliente, curvas granulométricas, humedad óptima, condición saturada y equipo triaxial cíclico.

### DESCRIPCIÓN:

En Colombia el instituto nacional de vías (INVIAS) invirtió en obras que modernizan la infraestructura vial más de 17.5 billones de pesos en el cuatrienio comprendido entre los años 2010-2013, algunos de estos proyectos se desarrollaron en el departamento de Santander en busca de realizar y mejorar vías para un adecuado servicio a los conductores vehiculares optando por ejecutar el diseño y mantenimiento de carreteras que se ajusten a la demanda del parque automotor, estas vías están adaptadas a las condiciones ambientales y a las cargas de diseño que estas deberán soportar durante su tiempo de vida útil. Para garantizar esto, es necesario que el pavimento que la conforma cumpla con características de medidas y calidad de materiales, esto se ve reflejado en las especificaciones técnicas estipuladas por INVIAS para dichos materiales.

Uno de los métodos ampliamente usados para el diseño de pavimentos flexibles es el método AASHTO-93, este método se destaca sobre otros, debido a que introduce en su procedimiento variables como la serviciabilidad, confiabilidad de diseño, número de ejes equivalentes y módulo resiliente de los materiales que componen las capas del pavimento.

En este proyecto se presenta una investigación que consistió en determinar la ecuación constitutiva del módulo resiliente para materiales de base granular usados en la ciudad de Bucaramanga, para esto se emplearon las curvas granulométricas de materiales provenientes del río Chicamocha. En este procedimiento, se realizó el ensayo de módulo resiliente a probetas compactadas con humedad óptima y en condición saturada, con el fin de analizar el comportamiento del material bajo estas dos condiciones.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de ingenierías fisicomecánicas Escuela de ingeniería civil Director Eduardo Alberto Castañeda Pinzon

## ABSTRACT

**TITLE:** DETERMINATION OF THE CONSTITUTIVE EQUATION OF RESILIENT MODULE FOR GRANULAR BASES USED IN BUCARAMANGA\*.

**AUTHOR(S):** BORIS MADRID CUADRADO  
EDWIN MARTIN MEZA SAAVEDRA\*\*

**KEYWORDS:** Resilient modulus, granulometric curves, optimum moisture, saturated condition and Cyclic Triaxial equipment.

### DESCRIPTION:

In Colombia, the National Institute of roads (INVIAS) invested in works that modernize the road infrastructure with more than 17.5 billion pesos in the four-year period 2010-2013, some of these projects were developed in the department of Santander in order to perform and improve roads for an adequate service to vehicular drivers choosing to execute the design and maintenance of roads that are adjusted to the demand of the car fleet, these roads are adapted to the environmental conditions and the design loads that these must endure during their time life. In order to guarantee this, it is necessary that the pavement must to comply with characteristics of measures and quality of materials; this is reflected in the technical specifications stipulated by INVIAS for such materials.

One of the methods widely used for the design of flexible pavements is the AASHTO-93 method, this method stands out over others, because it introduces in its procedure variables such as serviceability, design reliability, number of equivalent axes and resilient modulus of the materials that make up the layers of the pavement.

In this project was shown a research with the purpose to determine the constitutive equation of resilient modulus for granular base materials used in the city of Bucaramanga, granulometric curves for this material from the Chicamocha river were used. In this procedure, the resilient modulus test was carried out on compacted specimens with optimal humidity and in a saturated condition, in order to analyze the behavior of the material under these two conditions.

---

\* Project of grade

\*\* Faculty of Engineering Physical Mechanical. School of Engineering civil Director Eduardo Alberto Castañeda Pinzon

## INTRODUCCION

En Colombia el instituto nacional de vías (INVIAS) invirtió en obras que modernizan la infraestructura vial más de 17.5 billones de pesos en el cuatrienio comprendido entre los años 2010-2013, algunos de estos proyectos se desarrollaron en el departamento de Santander en busca de realizar y mejorar vías para un adecuado servicio a los conductores vehiculares optando por ejecutar el diseño y mantenimiento de carreteras que se ajusten a la demanda del parque automotor, estas vías están adaptadas a las condiciones ambientales y a las cargas de diseño que estas deberán soportar durante su tiempo de vida útil. Para garantizar esto, es necesario que el pavimento que la conforma cumpla con características de medidas y calidad de materiales, esto se ve reflejado en las especificaciones técnicas estipuladas por INVIAS para dichos materiales.

Uno de los métodos ampliamente usados para el diseño de pavimentos flexibles es el método AASHTO-93, este método se destaca sobre otros, debido a que introduce en su procedimiento variables como la serviciabilidad, confiabilidad de diseño, número de ejes equivalentes y módulo resiliente de los materiales que componen las capas del pavimento.

En el presente trabajo de investigación se logra determinar la ecuación constitutiva del módulo resiliente para materiales de base granular usados en pavimentos flexibles, para esto resulto importante conocer la humedad óptima del material por medio del ensayo de proctor modificado con el fin de saber el nivel de compactación máximo que debe tener la muestra al aplicar el ensayo triaxial cíclico, simulando de esta forma las condiciones físicas reales del terreno. El material ensayado fue proveniente del río Chicamocha, este río en la actualidad es la fuente principal del material. La razón por la cual se buscó determinar esta

ecuación para materiales de base granular es debido al desconocimiento en la ciudad de Bucaramanga de dicha ecuación para el material usado normalmente, esto sucede porque resulta mucho más costoso realizar un ensayo triaxial cíclico que otro tipo de ensayo de laboratorio, además de que las empresas constructoras no cuentan con el equipo necesario para realizarlo, ocasionando de esta manera que sea poco experimentado, esto implica que los valores de módulo resiliente empleados actualmente para los materiales de base granular no son totalmente precisos influyendo así en el diseño de los pavimentos, este mal diseño podría estar generando a su vez la ineficiente transmisión de esfuerzos producidos por las cargas de tránsito al suelo de subrasante. Si bien se puede hallar el valor del módulo resiliente del material de base granular mediante fórmulas empíricas relacionadas con otros ensayos básicos de capacidad de soporte (CBR) esta relación resulta ser solo una aproximación del valor real del módulo resiliente, entonces se desea encontrar con mayor exactitud este valor del módulo haciendo uso del equipo triaxial cíclico, el cual se encuentra ubicado en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander.

## 1. BASES GRANULARES DE UN PAVIMENTO

Un pavimento está conformado por un conjunto de capas de materiales seleccionados los cuales tienen como objetivo recibir, soportar y disipar cargas vehiculares a través de todo su tramo. Existen dos tipos de pavimentos usados en proyectos de infraestructura vial: Los pavimentos flexibles y los pavimentos rígidos.

Los pavimentos flexibles normalmente están compuestos por una capa superficial o capa asfáltica de rodadura seguida de una capa de base granular, una capa de subbase granular y terminando en su parte inferior con material natural o material de subrasante. Esta capa superficial de asfalto 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 grandes deformaciones cuando es sometido a grandes cargas, a continuación siguen 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.

Por otra parte los pavimentos rígidos están conformados por una capa superficial de concreto hidráulico seguido de una capa formada por material granular y debajo está el material del terreno o subrasante, este tipo de pavimento debido a su gran consistencia transmite los esfuerzos de forma extensa a las capas inferiores.

Las bases granulares en los pavimentos tienen la función principal de brindar un soporte que minimice los esfuerzos producidos por las cargas vehiculares para así transmitirlos a las capas más inferiores del pavimento.

## **1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA BASE GRANULAR**

**1.1.1 Durabilidad y Resistencia:** La durabilidad de la base granular está dada por el mantenimiento de las propiedades mecánicas y físicas del material. La resistencia de la base granular la generan la diferencia de tamaños que poseen las partículas que la componen, estas al estar sometidas a cargas, reaccionan entre si produciendo un trabazón entre ellas lo cual genera un comportamiento de bloque en toda la capa de base

**1.1.2 Rigidez:** la base granular debe contar con la suficiente rigidez para que esta capa no se fracture o dañe por la acción de los esfuerzos transmitidos por la capa asfáltica

## **1.2 REQUISITOS PARA AGREGADOS DE BASE GRANULAR**

Los requisitos de calidad para materiales de base granular se encuentran estipulados en la norma del instituto nacional de vías, en ese artículo se pueden apreciar todas las características que deben cumplir los materiales de base granular con el fin de que puedan ser aptos para resistir adecuadamente los esfuerzos solicitados del tránsito. En un pavimento, debajo de la capa de rodadura viene la capa de base granular, normalmente con el fin de ahorrar costos esta capa es dividida en dos partes: Una parte superior llamada base granular y otra parte inferior llamada subbase granular, ambas partes están compuestas por material granular pero la parte superior (la inmediatamente inferior a la capa de rodadura) debe tener mayores requisitos de calidad de materiales que la parte inferior. En la siguiente tabla se pueden observar los requisitos de calidad que deben cumplir los materiales usados para base granular.

**Tabla 1. Requisitos de calidad para los agregados de base granular**

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	BASE GRANULAR		
		CLASE C	CLASE B	CLASE A
<b>Dureza (O)</b>				
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), Máximo (%)	E-218	40	40	35
- 500 revoluciones		8	8	7
- 100 revoluciones				
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	E-224	-	70	90
- Valor en seco, mínimo (kN)		-	75	75
- Relación húmedo/seco, mínimo (%)				
<b>Durabilidad (O)</b>				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	E-220	12	12	12
- Sulfato de sodio		18	18	18
- Sulfato de magnesio				
<b>Limpieza (F)</b>				
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
<b>Geometría de las Partículas (F)</b>				
Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	E-230	35	35	35
Caras fracturadas, mínimo (%)	E-227	50	70	100
- Una cara		-	50	70
- Dos caras				
Angularidad de la fracción fina, mínimo (%)	E-239	-	35	35
<b>Resistencia del material (F)</b>				
CBR (%): porcentaje asociado al grado de Compactación mínimo especificado (numeral 330.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión.	E-148	≥ 80	≥ 80	≥ 95

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Artículo 330 Bases granulares (Tabla 330-2 de ese documento)

## 2. FUENTE DEL MATERIAL

La fuente actual de materiales granulares para pavimentos es la cantera del río Chicamocha, esta fuente es el principal sitio de extracción de materiales usados en la mayoría de los proyectos de construcción y mantenimiento de infraestructura vial en el área metropolitana de Bucaramanga, de esta fuente fue que se obtuvieron los materiales de base granular necesarios para realizar los diferentes ensayos que conlleva el proyecto de grado.

**Figura 1. Cantera Río Chicamocha**



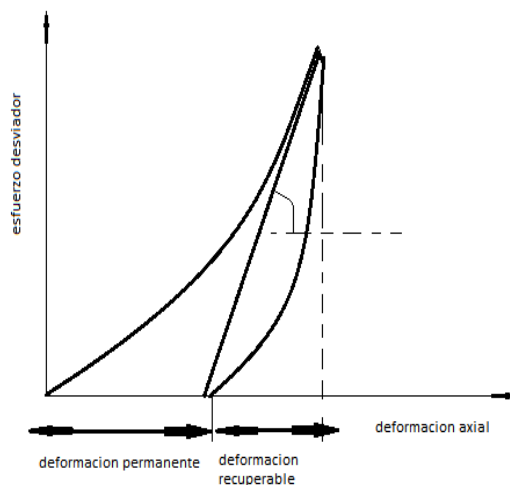
FUENTE: GOOGLE IMÁGENES, Disponible en: [https://www.google.com.co/search?sa=G&hl=es-CO&q=Proyecto&tbn=isch&tbs=simg:CAQSIQEJo\\_1BHlkpRoj8aiQELEKjU2AQaAggDDAsQslynCBpiCmAlAxlo1BW2FYsWzAXmApMekh7WFYwWtwHllow5syLPOllrtSKBK6MgriqHKxowmbTDD6fZeJdnrubVf50O38UkXm34oX-QGRN1btAsSUOsID-JMkQqIzGIBvAIMIFeIAQMCxCOrv4IGgoKCAgBEgRVcNzHDA&ved=0ahUKEwj9noDM\\_J3SAhXFQiYKHRymAykQwg4IFygA&biw=1366&bih=662#imgrc=JuSVpisfy4RS2M:](https://www.google.com.co/search?sa=G&hl=es-CO&q=Proyecto&tbn=isch&tbs=simg:CAQSIQEJo_1BHlkpRoj8aiQELEKjU2AQaAggDDAsQslynCBpiCmAlAxlo1BW2FYsWzAXmApMekh7WFYwWtwHllow5syLPOllrtSKBK6MgriqHKxowmbTDD6fZeJdnrubVf50O38UkXm34oX-QGRN1btAsSUOsID-JMkQqIzGIBvAIMIFeIAQMCxCOrv4IGgoKCAgBEgRVcNzHDA&ved=0ahUKEwj9noDM_J3SAhXFQiYKHRymAykQwg4IFygA&biw=1366&bih=662#imgrc=JuSVpisfy4RS2M:)

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 MÓDULO RESILIENTE

El constante paso de los vehículos sobre una carretera somete al pavimento que lo conforma a un gran cantidad de cargas cíclicas que hace que los distintos materiales que conforman a dicho pavimento estén sometidos a diferentes esfuerzos y sufran variadas deformaciones, esto claro está, dependiendo de la magnitud de las cargas aplicadas y del tiempo de duración de aplicación de estas cargas. Los materiales del pavimento al ser sometidos a un ciclo de carga sufren deformaciones las cuales no se recuperan en su totalidad con respecto a sus situaciones iniciales, debido a que estas deformaciones en realidad están divididas en 2 partes: una deformación permanente y una deformación recuperable.

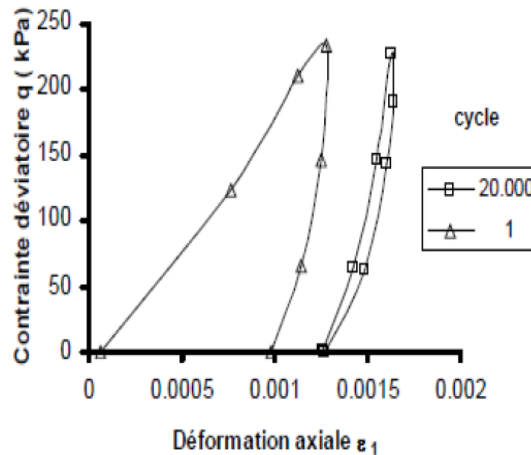
**Figura 2. Deformación de material granular al ser sometido a un ciclo de carga**



Al ir aumentando la cantidad de ciclos de carga aplicados, la deformación permanente va aumentando pero se va acumulando, aunque dicha deformación

en cada siguiente ciclo va siendo cada vez menor hasta llegar a cierto ciclo donde prácticamente toda la deformación producida debido al ciclo aplicado se recupera en su totalidad

**Figura 3. Deformación permanente acumulada durante un ciclo de carga**



**Fuente:** Fleureau, Coronado y Gomes, 2004, Deformación permanente acumulada durante un ciclo de carga [en línea] Disponible en: [https://lh3.googleusercontent.com/\\_aHD5riHp9R1C1pCrQ7PI1B7GZVKbV3PNizUKXRnzII-JdNhcsdL5EhMJWc0n6L1fvKr=s128](https://lh3.googleusercontent.com/_aHD5riHp9R1C1pCrQ7PI1B7GZVKbV3PNizUKXRnzII-JdNhcsdL5EhMJWc0n6L1fvKr=s128)

Cuando finaliza esta etapa el material describe prácticamente la misma curva de deformación y la deformación permanente se vuelve mínima, llegando a un estado donde en términos prácticos se considera que el comportamiento del material es elástico, lo que significa que al llegar a este punto el material entra en un estado de resiliencia.

Por definición el módulo resiliente es la relación que existe entre el esfuerzo desviador suministrado y la deformación axial recuperable luego de ser aplicada una serie de cargas cíclicas repetidas al material que se debe encontrar contenido en una cámara triaxial dinámica, esta relación está definida como:

$$Mr(kPa) = Sciclico / \epsilon_r \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\epsilon_r = \frac{H_{prom}}{L} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

**Mr** = Modulo resiliente del material

**Sciclico** = Esfuerzo vertical cíclico (resiliente) aplicado en cada secuencia de aplicación de carga contemplada en el ensayo de módulo resiliente

**$\epsilon_r$**  = Deformación unitaria axial resiliente (recuperada) debido a Sciclico

**Hprom** = Deformación axial resiliente (recuperada) promedio debido a Sciclico. Corresponde a la magnitud de deformación promedio obtenida justo a partir del momento de aplicación del Sciclico máximo hasta el término del periodo de reposo para los últimos cinco ciclos de carga de cada secuencia de aplicación de carga.

**L** = longitud inicial de la muestra de ensayo

### **3.2 MODELOS CONSTITUTIVOS USADOS PARA DETERMINAR EL MÓDULO RESILIENTE**

En la literatura se encuentran algunos modelos matemáticos que han sido desarrollados para la determinación del módulo resiliente tanto para materiales finos como para materiales gruesos. Estos modelos constitutivos buscan correlacionar el módulo resiliente con los esfuerzos actuantes y las propiedades fundamentales del material. Para acercarnos un poco más a la determinación del Módulo resiliente, presentaremos los principales modelos matemáticos encontrados en la literatura.

**3.2.1 Modelo No.1** Seed y otros, 1967: 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:

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

Donde:

**Mr** = Modulo resiliente del material

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

**k1, k2** = Constantes del modelo matemático

**3.2.2 Modelo No.2** 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

El modelo es el siguiente:

$$Mr = k1 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{k3} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

**Mr** = Modulo resiliente del material

**$\theta$**  = 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 que equivale a 101,325 [kPa]

$\tau_{oct}$  = Esfuerzo *cortante octahedrico*

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

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * s_{max} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

$s_3$  = 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 ( $S_{contacto}$ )

**3.2.3 Modelo No.3** Este modelo es muy parecido al modelo No.1 con la diferencia de que no solo involucra al esfuerzo bulk ( $\Theta$ ) sino que también tiene en cuenta al esfuerzo desviador a la hora de calcular el valor del módulo resiliente

El modelo es el siguiente:

$$Mr = A \theta^{k_1} s_{max}^{k_2} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

$Mr$  = Modulo resiliente del material

$\Theta$  = 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

$s_{max}$  = esfuerzo desviador, corresponde a la suma del Sciclico más el esfuerzo de contacto ( $S_{contacto}$ )

## **4. METODOLOGIA DE TRABAJO**

Este trabajo de investigación se basó en determinar la ecuación constitutiva del módulo resiliente para dos muestras de base granular con diferentes gradaciones. Para la realización del ensayo, la norma INV E-156 en el numeral 6.3 indica que si no se cuentan con muestras inalteradas del terreno, se debe tratar de simular las condiciones reales físicas que este tendría si fuese un material extraído de campo, es decir todas las muestras a ensayar deberán ser sometidas a compactación en el laboratorio. Para esto, las muestras se prepararon con contenido de humedad óptima hasta alcanzar la máxima densidad seca del ensayo de proctor modificado (norma INV-E 142)

Los materiales de base granular que fueron utilizados para este estudio se subdividieron en dos tipos de materiales los cuales inicialmente se nombraron como material A y material B, esto se hizo solamente con el fin de poderlos identificar. Los materiales fueron proporcionados por la empresa Pavimentos Andinos S.A

### **4.1 FABRICACIÓN DE PROBETAS**

Se fabricaron 2 probetas con dimensiones diámetro de 10 centímetros y longitud de 21 centímetros, una fabricada con material de base granular A y la otra fabricada con material de base granular B. Primeramente se realizó el ensayo de análisis granulométrico (norma INV-E 123) para determinar qué tipos de base granular son las muestras analizadas

En esta tanda se le realizo a la muestra de base granular A, todos los ensayos correspondientes necesarios: análisis granulométrico (INV-E 123), proctor modificado (INV-E 142) y módulo resiliente (INV-E 156).

**4.1.1 Resultado análisis granulométrico material A y B** El procedimiento para la realización del ensayo de análisis granulométrico se puede observar en el anexo A

**Tabla 2. Resultados del análisis granulométrico del material a**

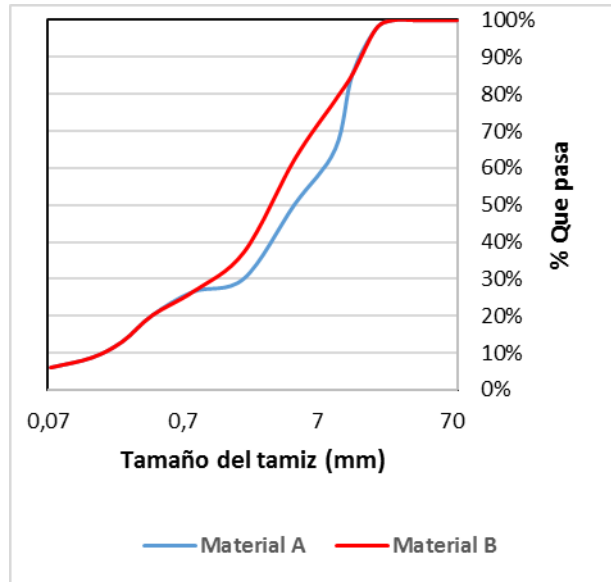
No. Tamiz	Abertura [mm]	Peso retenido Parcial [gr]	Parcial [%]	Acumulado [%]	Pasa [%]
3"	76,2	0	0,00%	0,00%	100,00%
2"	50,8	0	0,00%	0,00%	100,00%
1 1/2"	38,1	164	1,64%	1,64%	98,36%
1"	25,4	1501	15,01%	16,65%	83,35%
3/4"	19,05	1062	10,62%	27,28%	72,72%
1/2"	12,7	1663	16,63%	43,91%	56,09%
3/8"	9,52	640	6,40%	50,31%	49,69%
Nº 4	4,75	1480	14,80%	65,11%	34,89%
Nº 10	2	872	8,72%	73,83%	26,17%
Nº 20	0,84	487	4,87%	78,71%	21,29%
Nº 40	0,42	1343	13,43%	92,14%	7,86%
Nº 60	0,25	193	1,93%	94,07%	5,93%
Nº 100	0,149	68	0,68%	94,75%	5,25%
Nº 200	0,074	522	5,22%	99,97%	0,03%
Fondo	.....	3	0,03%	100%	
	$\Sigma =$	9998	100,00%		

**Tabla 3. Resultados del análisis granulométrico del material b**

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO			
		RETENIDO			Pasa (%)
		Parcial (gr)	Parcial (%)	Acumulado (%)	
3"	76,2	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
2"	50,8	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1 1/2"	38,10	72,6	0,73%	0,73%	99,27%
1"	25,40	1.456,3	14,56%	15,29%	84,71%
3/4"	19,05	914,5	9,15%	24,44%	75,56%
1/2"	12,70	1.242,3	12,42%	36,86%	63,14%
3/8"	9,52	581,0	5,81%	42,67%	57,33%
Nº 4	4,75	967,0	9,67%	52,34%	47,66%
Nº 10	2,000	1.033,5	10,34%	62,68%	37,32%
Nº 20	0,840	1.064,7	10,65%	73,33%	26,67%
Nº 40	0,420	634,7	6,35%	79,67%	20,33%
Nº 60	0,250	721,3	7,21%	86,89%	13,11%
Nº 100	0,149	428,1	4,28%	91,17%	8,83%
Nº 200	0,074	268,2	2,68%	93,85%	6,15%
Fondo	.....	614,8	6,15%	100,00%	
	Σ	9.999,0	100,00%		

Al realizar el análisis granulométrico se obtuvieron las siguientes curvas granulométricas:

**Figura 4. Curvas granulométricas de los materiales**



Se determinó que el material A es una base granular de gradación gruesa tipo BG-27 y material B es una base granular de gradación fina tipo BG-25. Luego de haber clasificado estas muestras según su gradación se continuó con la realización del ensayo de proctor modificado a ambas muestras de base granular.

Luego de haber clasificado esta muestra según su gradación se continuó con la realización del ensayo de proctor modificado.

**4.1.2 Ensayo de proctor modificado (INV-E 142-13)** El procedimiento para la realización del ensayo de proctor modificado se puede observar en el anexo B

Dado que no se contó con una muestra inalterada de campo se optó por realizar este ensayo con el objetivo de determinar la humedad óptima de los materiales que nos permitió obtener las máximas densidades secas, de esa forma se simuló las condiciones reales del terreno.

**Tabla 4. Humedades óptimas y densidades secas máximas de los materiales de ensayo**

	Humedad Optima [%]	Densidad seca máxima [g/cm <sup>3</sup> ]
BG-27	8.4	2.056
BG-25	8.2	2.206

#### **4.2 MONTAJE Y PRUEBAS DE MÓDULO RESILIENTE**

Usando el equipo triaxial cíclico que se encuentra en las instalaciones del laboratorio de suelos de la Universidad industrial de Santander, se realizó la investigación la cual consistió en 2 análisis que se le realizaron a la misma muestra de material: el primero, realizando el ensayo al material (tipo 1) con la humedad óptima de compactación tal como lo establece la norma INV-E 156, y el segundo, realizando el ensayo al mismo material pero en condición saturada.

El equipo utilizado para la realización del ensayo de módulo resiliente consto de:

Una cámara triaxial con su base y pedestales de 10 cm de diámetro, celdas de carga sumergibles, anillos de acceso, controlador de presión/volumen con teclado inteligente tipo standard (STDDPC), una caja de datos con un computador para la toma y procesado de estos, un top cap, goma plástica, piedras porosas, papel filtro, un kit de preparación de la muestra que incluye: un molde dividido en tres partes, soporte con manga de aspiración, membranas para cubrir la muestra, o-ring (aro torico), un kit de conexiones hidráulicas que incluye : tubo de nylon de 1/8", tubería de nylon de 8 mm, loctite 542, tubo de grasa de silicona, cortador de legris, tuercas de 8 mm para confección de tubos, tuercas de 1/8" para confección de tuberías, ferrel de 8 mm y anillos de refuerzo para la fabricación de tubos, ferrel de 1/8" y anillos de refuerzo para la fabricación de tubos y "T" roja más tapón de

8mm legris. El software instalado en el computador para la realización del ensayo de módulo resiliente, el cual permitió procesar y obtener los datos, y resultados del ensayo fue el programa GDSLAB

Se continuó con el montaje de las probetas en el equipo triaxial cíclico, su procedimiento se puede observar en el Anexo C

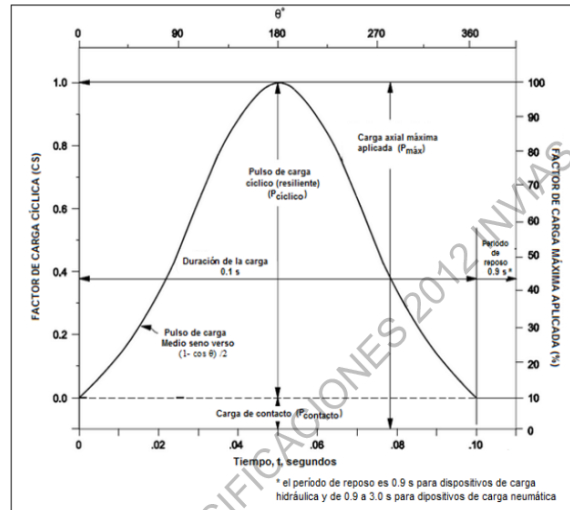
Una vez realizado el montaje de la muestra en el equipo triaxial, usando el software del equipo se procedió con la aplicación de las cargas tal como lo establece la norma INV-E 156-13, para esto fue necesario que las cargas fueran aplicadas con el tipo de onda establecido. Este tipo de onda coincide 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.

Este tipo de onda corresponde a la siguiente ecuación:

$$\text{Pulso de carga} = \frac{1 - \cos(\theta)}{2} \quad (\text{ecuación 7})$$

El tipo de onda aplicado se ve representado gráficamente en la figura 5.

**Figura 5. Tipo de onda de carga para realizar el ensayo de módulo resiliente**



**Fuente:** Instituto nacional de vías, INV-E 156

El proceso de cargas consta de una secuencia de acondicionamiento de la muestra (secuencia 0) la cual permite llevar al material de base granular a un estado de resiliencia, cuenta además con 15 secuencias.

El procedimiento descrito en el esquema representado en el anexo D indica cómo realizar la aplicación de una secuencia de carga, esto quiere decir que ese procedimiento en total se debe realizar 16 veces.

**Tabla 5. Secuencia de ensayo para el material de base granular**

Secuencia No.	Presión de cámara $S_3$		Esfuerzo axial máximo $S_{m\acute{a}x}$		Esfuerzo cíclico $S_{c\acute{i}clico}$		Esfuerzo constante $0.1 S_{m\acute{a}x}$		Número de aplicaciones de carga
	kPa	lb/pg <sup>2</sup>	kPa	lb/pg <sup>2</sup>	kPa	lb/pg <sup>2</sup>	kPa	lb/pg <sup>2</sup>	
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	.3	100
2	20.7	3	41.4	6	37.3	5.4	4.1	.6	100
3	20.7	3	62.1	9	55.9	8.1	6.2	.9	100
4	34.5	5	34.5	5	31.0	4.5	3.5	.5	100
5	34.5	5	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	34.5	5	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
7	68.9	10	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
8	68.9	10	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
9	68.9	10	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
10	103.4	15	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
12	103.4	15	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
13	137.9	20	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
14	137.9	20	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
15	137.9	20	275.8	40	248.2	36.0	27.6	4.0	100

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, INVE 156-13

Después de esta primera prueba se procedió a saturar y consolidar el material, la ejecución de estos pasos en el software se pueden observar en el anexo E.

Una vez las muestras de base granular (BG-27 y BG-25) estuvieron saturadas y consolidadas, se repitió el protocolo de aplicación de cargas tal como lo indica la tabla 5.

## 5. RESULTADOS

El programa GDSLAB permitió exportar los resultados de los ensayos al programa Microsoft Excel para facilitar su procesamiento. Con estos resultados fue posible determinar el módulo resiliente para ambas muestras de base granular. La norma INV-E 156 indica además que para poder realizar estos cálculos de módulo resiliente solo se debían tener en cuenta los últimos 5 ciclos de cada secuencia de aplicación de carga.

En las siguientes tablas (tabla 6-7-8-9) se presentan los módulos resiliente obtenidos en cada secuencia de carga:

**Tabla 6. Módulo resiliente para la muestra BG-27, en condición de humedad óptima**

<b>Secuencia</b>	<b>Sciclico [kPa]</b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>	<b>Módulo Resiliente [kPa]</b>
1	19,22	5,78E-05	332775,86
2	38,59	0,000108	358125,15
3	56,51	0,000148	382971,14
4	31,23	9,08E-05	344114,29
5	62,18	0,000154	404126,38
6	93,43	0,000226	413920,05
7	61,90	0,000147	420861,05
8	123,79	0,000264	469636,29
9	193,80	0,00039	496564,61
10	62,97	0,000136	461630,82
11	95,37	0,000198	482736,95
12	189,70	0,000355	533874,24
13	95,50	0,000191	499327,37
14	125,65	0,00023	547241,22
15	259,23	0,000445	582360,00

**Tabla 7. Módulo resiliente para la muestra BG-27, en condición de humedad saturada**

<b>Secuencia</b>	<b>Sciclico [kPa]</b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>	<b>Módulo Resiliente [kPa]</b>
1	17,45	0,00013233	131882,78
2	37,92	0,00022165	171116,07
3	56,78	0,00027825	204087,68
4	30,41	0,00019864	153121,55
5	62,24	0,00028515	218285,99
6	94,06	0,00035301	266472,11
7	61,04	0,00024922	244927,41
8	125,39	0,00039816	314948,48
9	190,85	0,00053029	359896,97
10	60,53	0,00021078	287189,53
11	93,04	0,00030738	302702,04
12	193,58	0,00052029	372061,68
13	91,35	0,00026961	338827,21
14	125,57	0,00035563	353094,93
15	260,71	0,00060049	434169,3

**Tabla 8. Módulo resiliente para la muestra BG-25, en condición de humedad optima**

<b>Secuencia</b>	<b>Sciclico [kPa]</b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>	<b>Módulo Resiliente [kPa]</b>
1	19,26	5,91262E-05	325783,41
2	38,83	0,000104369	372049,51
3	58,33	0,000149903	389167,48
4	31,07	8,70874E-05	356849,73
5	63,96	0,00016	399783,35
6	94,93	0,000228835	414856,76
7	62,55	0,000150388	415946,26
8	127,96	0,000282233	453417,09
9	189,43	0,000388252	487911,55
10	63,96	0,000143883	444577,56
11	95,36	0,000203398	468851,55
12	189,11	0,000376019	502941,95

<b>Secuencia</b>	<b>Sciclico [kPa]</b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>	<b>Módulo Resiliente [kPa]</b>
13	94,39	0,00019767	477520,73
14	128,15	0,000259903	493074,52
15	253,20	0,000475728	532245,60

**Tabla 9. Módulo resiliente para la muestra BG-25, en condición de humedad saturada**

<b>Secuencia</b>	<b>Sciclico [kPa]</b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>	<b>Módulo Resiliente [kPa]</b>
1	18,89	8,51456E-05	221873,90
2	39,07	0,000147379	265142,64
3	57,52	0,000203107	283233,06
4	30,92	0,000129806	238238,58
5	63,12	0,000221262	285288,70
6	95,51	0,000304563	313605,43
7	61,38	0,000211068	290833,75
8	128,40	0,000378447	339305,16
9	196,48	0,000528835	371534,35
10	62,02	0,000203689	304499,44
11	96,03	0,000302816	317129,40
12	198,15	0,000531942	372514,58
13	94,070	0,000285437	329566,72
14	128,18	0,000364951	351248,95
15	249,68	0,000653947	381818,35

Adicional al cálculo del módulo resiliente para ambas muestras de base granular (BG-27 y BG-25), esta investigación consistió además en la búsqueda del mejor modelo matemático que se ajuste a los resultados obtenidos en las tablas de resultados de módulos resiliente para los dos análisis descritos anteriormente (condición de humedad óptima y condición saturada) a los materiales de base granular (BG-27 y BG-25).

Para poder obtener a partir de modelos ya estandarizados, la mejor ecuación que se ajuste a los resultados obtenidos en las tablas mencionadas anteriormente, el método que se uso fue el método de los mínimos cuadrados el cual permitió calcular las diferentes constantes existentes en cada modelo de análisis y de esta manera demostrar cuál de las ecuaciones obtenidas a partir de esos modelos, se ajusta de forma más aproximada a los valores obtenidos en las tablas de resultados de módulo resiliente. Para poder demostrar esto, fue necesario determinar los valores de módulo resiliente que surgieron de cada ecuación para cada tipo de análisis (condición de humedad optima y condición saturada) para las muestras de base granular de ensayo (BG-27 y BG-25), y luego con eso se pudo cuantificar que tanto se desviaron esos valores de módulos resiliente obtenidos de las ecuaciones halladas, por medio del cálculo de la desviación estándar de dichos datos.

El método de los mínimos cuadrados intenta minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de los puntos generados por el modelo elegido para el cálculo del módulo resiliente y los correspondientes valores de módulo resiliente obtenidos del ensayo de módulo resiliente, al lograr esto, se da como resultado que los valores de módulo resiliente generados por el modelo elegido se acerquen de la forma más aproximada a los obtenidos por el ensayo de módulo resiliente, El método lo que hace es que mediante iteraciones en los valores de las constantes contenidas en cada modelo, se obtenga el mínimo valor mencionado anteriormente, fijando así los valores de las constantes contenidas en dichos modelos.

Una vez se aplicó el método de los mínimos cuadrados se obtuvieron las ecuaciones de los modelos matemáticos establecidos, que se ajustaron a los resultados de los ensayos de módulo resiliente para los materiales de base granular (BG-27 y BG-25) estas ecuaciones obtenidas fueron:

**Tabla 10. Ecuaciones obtenidas de los modelos matemáticos para el ensayo de módulo resiliente al material de base granular BG-27 en condición de humedad óptima**

BG-27 (Condicion de humedad optima)	
Ecuación 1 Modelo No.1	$mr = 108922 * \theta^{0.2498}$
Ecuación 2 Modelo No.2	$mr = 3316,34 * pa \left(\frac{\theta}{pa}\right)^{0.205} * \left(\frac{\tau_{oct}}{pa} + 1\right)^{0.18}$
Ecuación 3 Modelo No.3	$mr = 105127,696 * \theta^{0.2514} * \sigma d^{0.00579}$

**Tabla 11. Ecuaciones obtenidas de los modelos matemáticos para el ensayo de módulo resiliente al material de base granular BG-27 en condición saturada**

BG-27 (Condicion saturada)	
Ecuación 1 Modelo No.1	$mr = 16081 * \theta^{0.4978}$
Ecuación 2 Modelo No.2	$mr = 1559,189 * pa \left(\frac{\theta}{pa}\right)^{0.3555} * \left(\frac{\tau_{oct}}{pa} + 1\right)^{0.4155}$
Ecuación 3 Modelo No.3	$mr = 20800,225 * \theta^{0.2936} * \sigma d^{0.19917}$

**Tabla 12. Ecuaciones obtenidas de los modelos matemáticos para el ensayo de módulo resiliente al material de base granular BG-25 en condición de humedad óptima**

BG-25 (Condicion de humedad optima)	
Ecuación 1 Modelo No.1	$mr = 138400 * \theta^{0.2026}$
Ecuación 2 Modelo No.2	$mr = 3404,16 * pa \left(\frac{\theta}{pa}\right)^{0.1514} * \left(\frac{\tau_{oct}}{pa} + 1\right)^{0.1867}$
Ecuación 3 Modelo No.3	$mr = 145504,05 * \theta^{0.1298} * \sigma d^{0.0797}$

**Tabla 13. Ecuaciones obtenidas de los modelos matemáticos para el ensayo de módulo resiliente al material de base granular BG-25 en condición saturada**

BG-25 (Condicion saturada)	
Ecuación 1 Modelo No.1	$mr = 99347 * \theta^{0.1997}$
Ecuación 2 Modelo No.2	$mr = 2341,28 * pa \left(\frac{\theta}{pa}\right)^{0.0835} * \left(\frac{\tau_{oct}}{pa} + 1\right)^{0.4374}$
Ecuación 3 Modelo No.3	$mr = 107700,34 * \theta^{0.0395} * \sigma d^{0.1834}$

## 6. ANÁLISIS DE LOS MODELOS CONSTITUTIVOS

La ecuación escogida que represento al mejor modelo fue la que menor valor de desviación estándar obtuvo, ya que esto nos permitió observar que tan confiables fueron los coeficientes estimados de los modelos analizados.

La desviación estándar de las ecuaciones obtenidas de los modelos matemáticos establecidos, es un coeficiente que indica el grado de dispersión entre las variaciones de los valores obtenidos de dichas ecuaciones respecto a los valores de módulo resiliente obtenidos de los resultados del ensayo de módulo resiliente, este coeficiente nos permite saber cuánto tienden a alejarse dichos valores de módulo resiliente calculados con las ecuaciones obtenidas de los modelos matemáticos establecidos, de los valores de módulo resiliente obtenidos del ensayo de módulo resiliente. Teniendo esto pudimos apreciar que modelo represento el mejor ajuste y brindo mayor confiabilidad, ya que a medida que este coeficiente fue menor, mayor confiabilidad represento la ecuación de módulo resiliente con su(s) constante(s) calculada(s).

La desviación estándar se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} (Mr_i \text{ ecuacion} - Mr_i \text{ ensayo})^2}{n}} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

n = número de secuencias del ensayo de módulo resiliente, es decir n es igual a 15

Los resultados de desviación estándar obtenidos para los modelos matemáticos analizados fueron:

**Tabla 14. Desviación estándar de las datos de las ecuaciones de los modelos matemáticos de módulo resiliente del material de base granular BG-27 en condición de humedad optima**

BG-27 (condicion de humedad optima)			
Modelo matematico	No. 1	No. 2	No. 3
Desviacion estandar (kPa)	16024,16199	11856,3812	15321,9061
mejor modelo escogido	No. 2		

**Tabla 15. Desviación estándar de las datos de las ecuaciones de los modelos matemáticos de módulo resiliente del material de base granular BG-27 en condición saturada**

BG-27(condicion saturada)			
Modelo matematico	No. 1	No. 2	No. 3
Desviacion estandar (kPa)	22196,85501	14571,2129	9890,018417
mejor modelo escogido	No.3		

**Tabla 16. Desviación estándar de las datos de las ecuaciones de los modelos matemáticos de módulo resiliente del material de base granular BG-25 en condición de humedad optima**

BG-25 (condicion de humedad optima)			
Modelo matematico	No. 1	No. 2	No. 3
Desviacion estandar (kPa)	13209,29787	8390,39094	6222,65322
mejor modelo escogido	No. 3		

**Tabla 17. Desviación estándar de las datos de las ecuaciones de los modelos matemáticos de módulo resiliente del material de base granular BG-25 en condición saturada**

BG-25(condicion saturada)			
Modelo matematico	No. 1	No. 2	No. 3
Desviacion estandar (kPa)	22159,43977	11629,11615	5891,502466
mejor modelo escogido	No.3		

Para la muestra BG-25 y la muestra BG-27 en condición saturada, los mínimos valores de desviación estándar se obtuvieron de la ecuación del modelo matemático No.3. Mientras que para la muestra BG-27 en condición de humedad óptima se obtuvieron del modelo matemático No.2.

## 7. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS RESILIENTE

Analizando el modelo matemático No.1, se realizó una comparación entre los dos materiales de base granular usados en Bucaramanga y los materiales utilizados en el AASHTO road test. En la figura 6 y 7 se presentan los valores de módulo resiliente de los 3 materiales.

Las ecuaciones usadas para calcular el módulo resiliente para los materiales BG-27 y BG-25 se encuentran en las tablas 10, 11, 12, y 13 y las ecuaciones del material usado en el AASHTO road test son las siguientes:

### Condición de humedad optima

$$Mr_{AASHTO \min}[\text{psi}] = 6000 * (\theta^{0.5}) \quad \text{(Ecuación 9)}$$

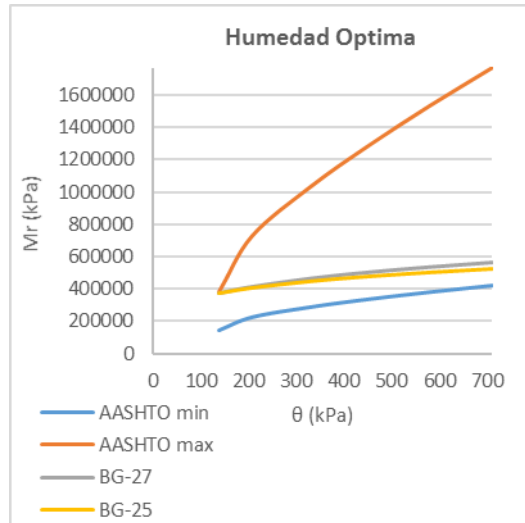
$$Mr_{AASHTO \max}[\text{psi}] = 10000 * (\theta^{0.7}) \quad \text{(Ecuación 10)}$$

### Condición Saturada

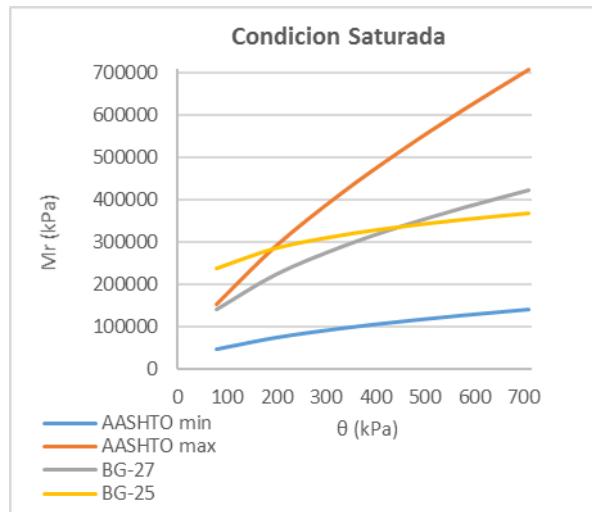
$$Mr_{AASHTO \min}[\text{psi}] = 2000 * (\theta^{0.5}) \quad \text{(Ecuación 11)}$$

$$Mr_{AASHTO \max}[\text{psi}] = 4000 * (\theta^{0.7}) \quad \text{(Ecuación 12)}$$

**Figura 6. Módulos resiliente de los materiales de base granular en condición de humedad optima según la ecuación del modelo No.1**



**Figura 7. Módulos resiliente de los materiales de base granular en condición saturada según la ecuación del modelo No.1**



Usualmente los valores de módulo resiliente de base granular asumidos para diseño de la guía AASHTO considerando el rango de esfuerzos bulk entre 138 y 207 kPa, están entre 193000 y 207000 kPa. Según la figura 6, para el material BG-27 en condición de humedad optima, los valores de módulo resiliente

correspondientes para un esfuerzo bulk de 138 y 207 kPa son 372955,8322 y 412710kPa y para BG-25 son 375556,7 y 407710,3 kPa respectivamente, en cambio los valores de módulos resiliente para estos mismos materiales en condición saturada correspondientes a los mismos esfuerzos bulk según la figura 7, son 186872,2 y 228666,7 kPa para BG-27 y 265759,4 y 288173,5 kPa para BG-25 respectivamente.

## **8. CONCLUSIONES**

- 1.** La humedad afecta en gran medida el valor de módulo resiliente de los materiales de base granular usados en los pavimentos de la ciudad de Bucaramanga.
- 2.** Los materiales de base granular usados en la construcción de pavimentos en la ciudad de Bucaramanga se encuentran dentro del rango de valores de módulo resiliente que tuvieron los materiales usados en el AASHTO road test.
- 3.** los materiales de base granular utilizados en Bucaramanga se están subestimando con respecto a los valores asumidos de módulo resiliente para diseño considerados por la guía AASHTO

## BIBLIOGRAFÍA

COLOMBIA, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, ROAD RESEARCH LABORATORY. Guía para el diseño estructural de pavimentos flexibles en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1971

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos, Universidad Católica de Colombia. Tercera Edición. Tomo I, Bogotá, 2006.

SCRIBD Ensayo triaxial cíclico ya realizado para suelos granulares [en línea] disponible en: <http://es.scribd.com/doc/64402979/Ensayo-Triaxial-Ciclico-Para-Suelos-Granulares-y-Finos-Granulares#scribd>

SISMICA Instrumentación y automatización del equipo triaxial cíclico MTS[en línea] disponible en: [http://www.sismica.com.mx/ACERVO-ART/Instrumentacion\\_equipo\\_triaxial\\_c.pdf](http://www.sismica.com.mx/ACERVO-ART/Instrumentacion_equipo_triaxial_c.pdf)

UCV Equipamiento y procedimiento del ensayo triaxial cíclico [en línea] disponible en:  
[http://icc.ucv.cl/geotecnia/03\\_docencia/02\\_laboratorio/manual\\_laboratorio/triaxial.pdf](http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/triaxial.pdf)

## ANEXOS

### ANEXO A. Procedimiento del análisis granulométrico (INV-E 123) de los materiales

Se procedió a tamizar una cantidad de 10 kilogramos de cada material (Material A y B) por todos los tamices disponibles en el laboratorio con el objetivo de observar las proporciones

Retenidas en cada tamiz y determinar los porcentajes de material que pasa por cada uno de ellos. Para esto resultado necesario tener disponible el equipo de herramientas que correspondió a:

Un juego de tamices colocados uno sobre otro en posición ascendente, y ordenados de la siguiente manera como lo indica el numeral 2.2 del INV-E 123

75 mm (3")	2.00 mm (No. 10)
50 mm (2")	850 µm (No. 20)
37.5 mm (1-½")	425 µm (No. 40)
25 mm (1")	250 µm (No. 60)
19.0 mm (¾")	106 µm (No. 140)
9.5 mm (3/8")	75 µm (No. 200)
4.75 mm (No. 4)	

**FIGURA 8. JUEGO DE TAMICES USADOS**



Dos basculas, una con sensibilidad de 0.01 gramos para el material que pasa el tamiz No.10 y otra con sensibilidad del 0.1 % de la masa de la muestra para pesar los materiales retenidos en el tamiz No.10

**FIGURA 9. BASCULAS USADAS**



Una muestra de 10 kg de cada material

**FIGURA 10. MUESTRA DE MATERIAL A**



Para tener un tamizado adecuado se tuvo que adicionar poco a poco una cantidad no muy grande de material granular sobre el tamiz más grande para luego sacudir todo el conjunto de tamices en todas las direcciones evitando a su vez que este material caiga o se derrame por fuera de los tamices dispuestos, luego de vaciar todo el material de muestra sobre los tamices se pesó cada material retenido sobre cada tamiz y se determinó el porcentaje de material retenido y el porcentaje de material que paso por cada tamiz, de esta forma se estableció el tamizado de la muestra de 10 kilogramos para ambos materiales

**FIGURA 11. TAMIZADO DEL MATERIAL**



Una vez se obtuvo la información anterior se prosiguió clasificando las muestras de los materiales según su gradación como lo establece el Artículo 330-13 del instituto nacional de vías en la Tabla 330-3.

**Tabla 18. Clasificación de las bases granulares según su gradacion**

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 ½"	1"	¾"	⅜"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
% PASA								
<b>BASES GRANULARES DE GRACACIÓN GRUESA</b>								
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
<b>BASES GRANULARES DE GRADACIÓN FINA</b>								
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 %

Fuente: Instituto Nacional de vías Artículo 330 Bases granulares.

## ANEXO B. Procedimiento del ensayo de proctor modificado (INV-E 142) para los materiales

Según la tabla 142-1 del INV-E 142-13 (ver tabla 19), se pudo escoger el método de compactación correspondiente para realizar el ensayo de proctor modificado según la gradación que tuvo la muestra BG-27.

**Tabla 19. Metodo de compactacion.**

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
MÉTODO	A	B	C
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: Tabla 142-1 de la norma INV-E 142-13)

Usando la anterior tabla se escogió el método de compactación adecuado y a su vez, se determinó el diámetro que debía tener el molde en donde se realizó la compactación del material, el tamaño del tamiz límite del material de ensayo usado, el número de capas de material colocado en el molde y el número de golpes por capa a las cuales fueron sometidas las muestras BG-27 y BG-25 para ser compactadas.

El equipo usado en el laboratorio para realizar el ensayo fue el siguiente:

Un molde de diámetro de 15,24 cm, con altura de 11.64 cm, Un martillo estándar con un peso de 44.48 N, 5 taras para cada muestra y así introducir en ellas las mezclas de material y agua, 2 tazas por cada sub-muestra de cada material para realizar el análisis de la humedad y un horno termo-estáticamente controlado.

**FIGURA 12. EQUIPO UTILIZADO PARA REALIZAR EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO**



Se seleccionó una cantidad de 16 Kg de cada muestra de base granular (BG-27 y BG-25) para la realización del ensayo (cantidad mínima según numeral 6.1 del INV-E 142) solamente con material pasa tamiz No. 3/4, Se prepararon 5 sub-muestras con cada material de ensayo, cada submuestra con un peso de 2.5 Kg. Inicialmente se puso una sub-muestra en una tara y se le añadió una cantidad de agua correspondiente al 1.6% de la masa de la sub-muestra (esto se hizo por recomendación del laboratorista) esta combinación del material y agua se mezcló de forma manual con el fin de obtener una muestra homogénea. Esto se hizo para ambos materiales.

**Figura 13. Mezclado del material A con agua**



A continuación se tomó el molde del ensayo y se registró su peso en kilogramos, luego se colocó el molde en el suelo, se le añadió una capa de la mezcla homogénea y se compactó con el martillo aplicándole 56 golpes, posteriormente se le añadió otra capa de mezcla repitiéndose el proceso de compactado, en total en el molde se añadieron 5 capas de la mezcla y se registró el peso del material

de las 5 capas compactadas más el peso del molde. Esto se realizó para ambos materiales (BG-27 y BG-25)

#### **FIGURA 14. PROCESO DE COMPACTACIÓN DE LA MUESTRA**



Seguidamente se registró y se anotó el peso de dos tazas que se usaron para el análisis de humedad, después se extrajo el material compactado en el molde y se tomaron 2 pequeñas muestras de él y se introdujo una en cada taza, se apuntó el peso de cada taza con su material, después estas tazas se incorporaron dentro del horno a una temperatura 100 grados centígrados durante 45 minutos (este tiempo de secado se eligió de acuerdo a la experiencia del laboratorista como lo indica el numeral 2.1.2 del INV-E 122), pasados los 45 minutos se extrajeron las tazas del horno y se registraron los pesos de cada taza luego del secado.

El procedimiento anterior fue aplicado de la misma forma a las otras 4 sub-muestras de base granular BG-40, pero a la siguiente sub-muestra (segunda sub-muestra) se le añadió la misma cantidad de agua que a la sub-muestra anterior (primera sub-muestra) más una cantidad de agua equivalente al 2% del peso de la sub-muestra y así sucesivamente con las otras sub-muestras. Con toda esta información obtenida fue posible obtener la humedad óptima de este material. Este proceso se realizó de la misma forma para ambas muestras de material (BG-27 y BG-25)

**FIGURA 15. TARAS CON MATERIAL**



- **Cálculos para el ensayo de proctor modificado**

Se calculó el porcentaje de humedad de la primera sub-muestra, conociendo los pesos de las muestras antes de ser ingresadas al horno y luego de ser secadas al horno se pudo determinar el porcentaje de humedad que presentó la primer sub-muestra en base al INV-E 122 numeral 10.1, se usó el mismo procedimiento para calcular los demás porcentajes de humedad.

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

**(ECUACION 13)**

Donde:

W = contenido de agua de la sub-muestra en porcentaje

W1 = masa de la taza con la muestra húmeda, en gramos

W2 = masa de la taza con la muestra seca, en gramos

Wc = masa de la taza, en gramos

Ww = masa del agua, en gramos

Ws = masa de las partículas sólidas, en gramos.

En las siguientes tablas se representan los porcentajes de humedad para las cinco sub-muestras de los materiales:

**Tabla 20. Porcentajes de humedades de las sub-muestras BG-27**

Sub-muestra N°	1		2		3		4		5	
Peso de la taza (gramos)	16,00	15,60	15,70	14,60	16,00	16,00	15,90	15,70	8	8,30
Peso de la taza + muestra húmeda (gramos)	48,80	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50	50
Peso de la taza + muestra seca (gramos)	48,00	49,20	48,50	48,50	48,10	48,10	47,30	47,40	45,8	45,7
Peso del agua (gramos)	0,80	0,80	1,50	1,50	1,90	1,90	2,70	2,60	4,20	4,30
Peso de la muestra seca (gramos)	32,0	33,6	32,8	33,9	32,1	32,1	31,4	31,7	37,8	37,4
Contenido de humedad (gramos)	2,50	2,38	4,57	4,42	5,92	5,92	8,60	8,20	11,11	11,50
% promedio	2,44		4,50		5,92		8,40		11,30421866	

**Tabla 21. Porcentajes de humedades de las sub-muestras BG-25**

Sub-muestra N°	1		2		3		4		5	
Peso de la taza (gramos)	16,00	15,60	15,70	14,60	16,00	16,00	15,90	15,70	8	8,30
Peso de la taza + muestra húmeda (gramos)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50	50
Peso de la taza + muestra seca (gramos)	49,31	49,20	48,46	48,50	47,97	48,10	47,42	47,40	46,092	45,7
Peso del agua (gramos)	0,69	0,80	1,54	1,50	2,03	1,90	2,58	2,60	3,91	4,30
Peso de la muestra seca (gramos)	33,3	33,6	32,8	33,9	32,0	32,1	31,5	31,7	38,1	37,4
Contenido de humedad (gramos)	2,07	2,38	4,69	4,42	6,36	5,92	8,20	8,20	10,26	11,50
% promedio	2,23		4,56		6,14		8,20		10,87900806	

Posteriormente, conocidas las humedades de las sub-muestras, se determinó las densidades secas de las sub-muestras como lo indica el INV-E 142 en el numeral 8.2.3.

$$\rho_d = \frac{\rho_H}{1 + \frac{w}{100}} \quad (\text{ECUACION 14})$$

Donde:

$\rho_d$  = Densidad seca de cada sub-muestra ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_H$  = Densidad húmeda de cada sub-muestra ( $\text{g/cm}^3$ )

w = Contenido de agua de la sub-muestra en porcentaje

El cálculo de la densidad húmeda de cada sub-muestra se hizo como lo indica el INV-E 142 en el numeral 8.2.2.

$$\rho_H = K \times \frac{M_T - M_{MD}}{V} \quad \text{(ECUACION 15)}$$

Donde:

$\rho_H$  = Densidad húmeda de cada sub-muestra ( $\text{g/cm}^3$ )

K = Constante de conversión que depende de las unidades manejadas

$M_T$  = Masa del material húmedo dentro del molde de compactación (gramos)

$M_{MD}$  = Masa del molde de compactación (gramos)

V = Volumen del molde de compactación ( $\text{cm}^3$ )

En las siguientes tablas se representan las densidades secas obtenidas para las cinco sub-muestras de los materiales:

Tabla 22. Densidades secas de las sub-muestras BG-27

Sub-muestra N°	1	2	3	4	5
Contenido de humedad de la sub-muestra %	2,44047619	4,49897475	5,919003	8,4003094	11,304219
Peso material compactado + peso molde (gramos)	6050	6120	6133	6260	6240
Peso del molde (gramos)	4157	4157	4157	4157	4157
Peso del material compactado (gramos)	1893	1963	1976	2103	2083
Densidad húmeda ( $\text{g/cm}^3$ )	2,005946384	2,08012295	2,093899	2,2284761	2,2072828
Densidad seca ( $\text{grs/cm}^3$ )	1,958158004	1,99056781	1,976887	2,0557839	1,9831079

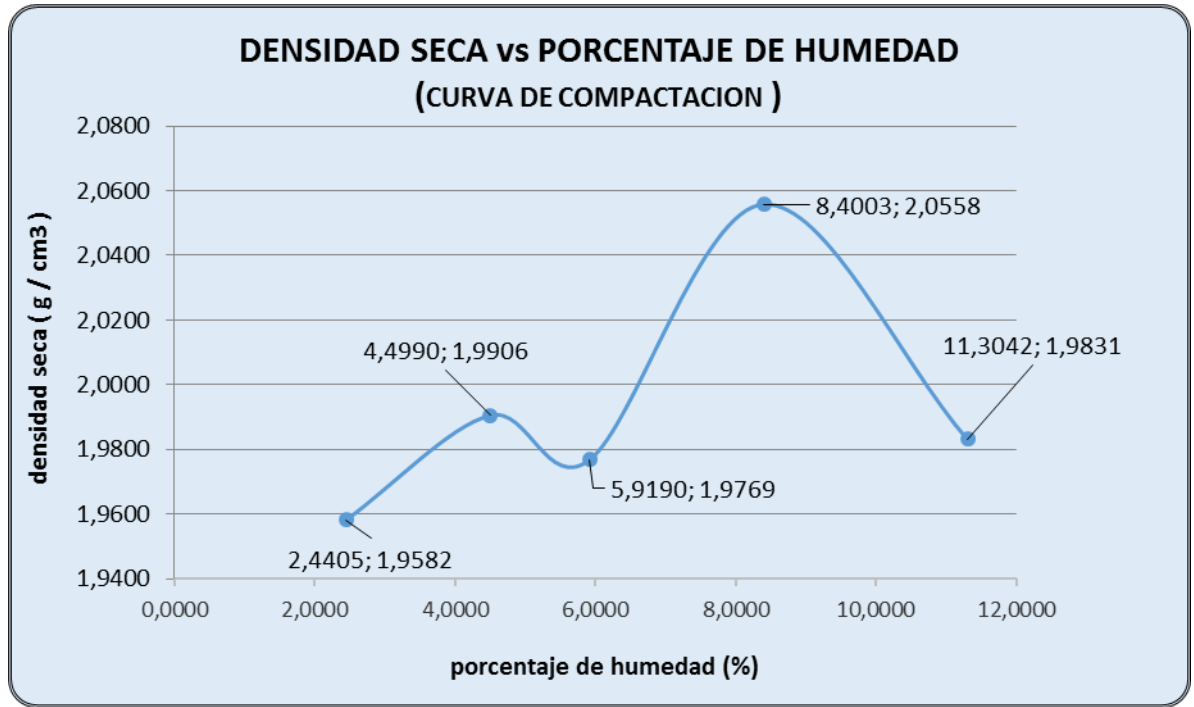
**Tabla 23. Densidades secas de las sub-muestras BG-25**

Sub-muestra N°	1	2	3	4	5
CONTENIDO DE HUMEDAD %	2,25	4,558	6,1415	8,199	10,87
PESO DEL SUELO+MOLDE (grs)	5990,554923	6041,611895	6090,68763	6408,454289	6231,7609
PESO DEL MOLDE (grs)	4157	4157	4157	4157	4157
PESO DEL SUELO (grs)	1833,554923	1884,611895	1933,68763	2251,454289	2074,7609
DENSIDAD HÚMEDA (grs/cm <sup>3</sup> )	1,9429545	1,9970578	2,04906166	2,38578795	2,1985521
DENSIDAD SECA (grs/cm <sup>3</sup> )	1,9002	1,91	1,9305	2,205	1,983

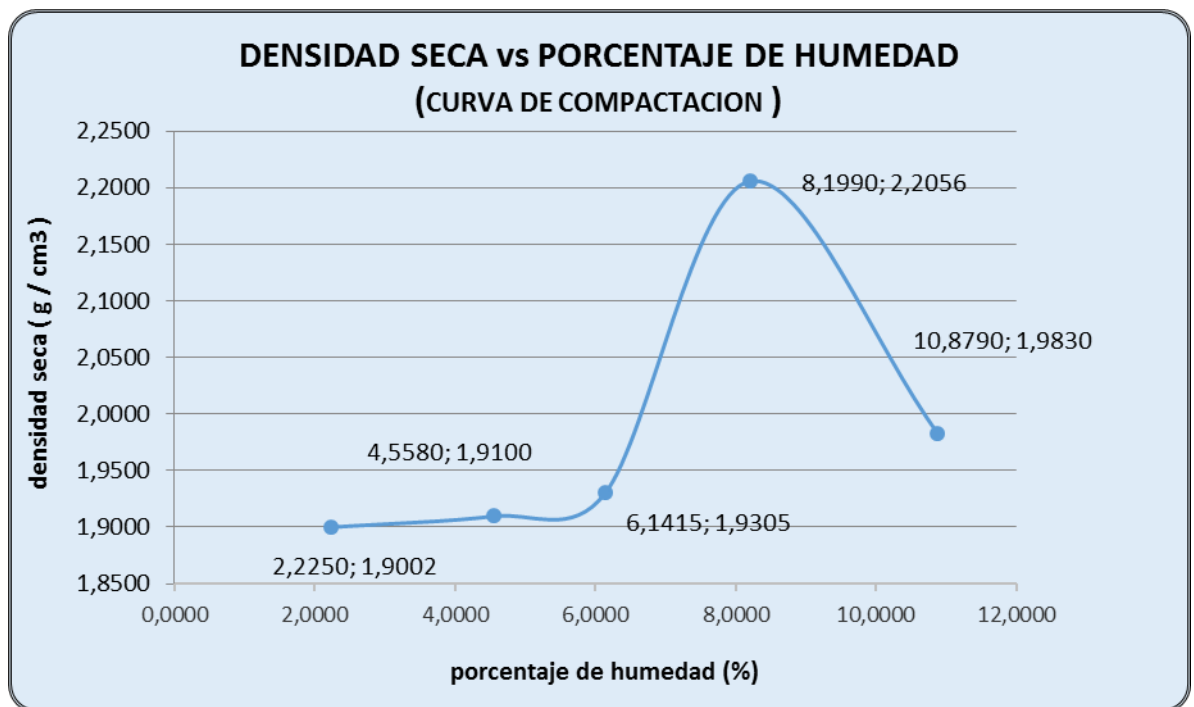
Para obtener la humedad óptima de compactación de los materiales BG-27 y BG-25, fue necesario realizar una gráfica llamada curva de compactación, en el que el eje de la abscisa vertical va proyectados los valores de densidades secas de cada material y en el eje de la abscisa horizontal van proyectados los valores de porcentajes de humedad de cada material. Estos puntos sobre la gráfica reflejan las densidades que tienen las sub-muestras frente a diferentes porcentajes de humedades, entonces la humedad optima se obtendrá visualmente en la gráfica observando el punto que refleje la máxima densidad seca, esto depende del comportamiento de la curva de compactación.

A continuación se presentan las curvas de compactación usando la información obtenida de las tablas 20-21 (Porcentajes de humedades de las sub-muestras de cada material) y las tablas 22-23 (Densidades secas de las sub-muestras de cada material)

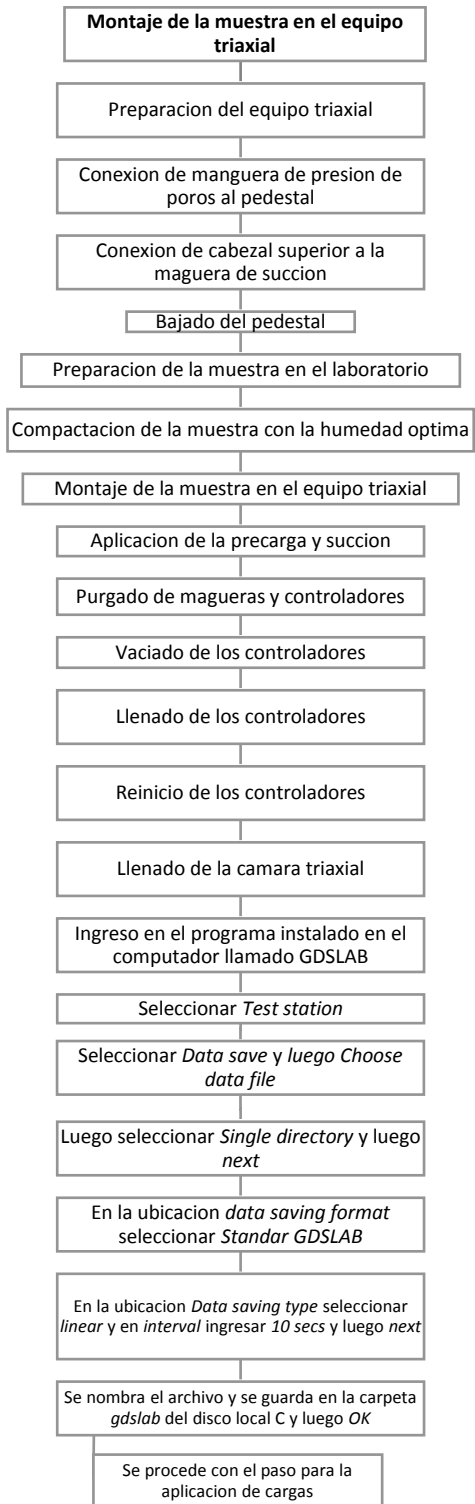
**FIGURA 16. CURVA DE COMPACTACION MATERIAL BG-27**



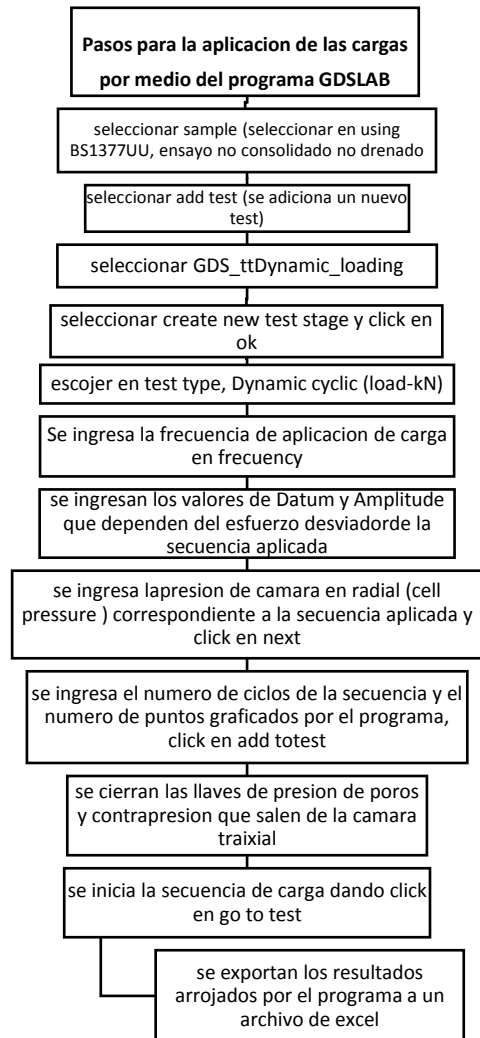
**FIGURA 17. CURVA DE COMPACTACION MATERIAL BG-25**



## Anexo C. procedimiento para el montaje de la muestra en el equipo triaxial



## Anexo D. procedimiento para la aplicación de cargas por medio del programa GDSLAB



- Cargas que se ingresan en el programa GDSLAB para la realización del ensayo de módulo resiliente

Secuencia	Esfuerzo cíclico [kPa]	Esfuerzo cte.[kPa]	Amplitud	Datum
0	93,1	10,3	0,380	0,464
1	18,6	2,1	0,0753	0,093
2	37,3	4,1	0,152	0,185
3	55,9	6,2	0,228	0,279
4	31	3,5	0,126	0,1557
5	62	6,9	0,253	0,309
6	93,1	10,3	0,380	0,464
7	62	6,9	0,253	0,309
8	124,1	13,8	0,507	0,619
9	186,1	20,7	0,760	0,929
10	62	6,9	0,253	0,309
11	93,1	10,3	0,380	0,464
12	186,1	20,7	0,760	0,929
13	93,1	10,3	0,380	0,464
14	124,1	13,8	0,507	0,619
15	248,2	27,6	1,014	1,239

Se muestran los valores de Datum y amplitude que se ingresaron en el software GDSLAB, además de las fórmulas que se usaron para su cálculo.

$$Amplitud [kN] = \left( \frac{Esfuerzo\ cíclico}{2} \right) * area \quad \text{(ECUACION 16)}$$

$$Datum [kN] = (Esfuerzo\ cte * area) + amplitud \quad \text{(ECUACION 17)}$$

## Anexo E. Procedimiento para realización de la etapa de saturación y consolidación de la muestra

