

Evaluación del comportamiento mecánico de materiales granulares convencionales de subbase y marginales identificados como MGM-9 y MGM-10.

Dairo Alejandro Rodríguez Ruiz, Diego Julián Anaya Gómez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Alex Eduardo Álvarez Lugo

Ingeniero Civil, PhD.

Codirector

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Ph.D. Ingeniería del Terreno Cartografía y Geofísica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería civil

Ingeniería civil

Bucaramanga

2024

**Dedicatoria**

Agradecemos a nuestros padres, por su apoyo incondicional y el esfuerzo tan grande que han realizado para ayudarnos a superar todo obstáculo surgido en este proceso, de igual manera agradecer a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Civil por brindarnos de conocimiento de alta calidad y los medios adecuados para el aprendizaje, por ultimo a los ingenieros Alex E. Álvarez y Vladimir Merchán por su enorme dedicación y apoyo al proceso de aprendizaje en el desarrollo del proyecto en sus distintas etapas.

**Dairo Alejandro Rodríguez Ruiz y Diego Julián Anaya Gómez**

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco teórico .....	14
2.1 Vías terciarias.....	14
2.2 Material granular marginal (MGM).....	14
2.3 Material tipo subbase .....	14
2.4 Ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles.....	15
2.5 Cueva de compactación .....	15
2.6 Compactación por método giratorio .....	16
2.7 Punto de bloqueo.....	16
2.8 Saturación de suelos.....	17
2.9 Módulo resiliente .....	17
2.10 Ensayo de compresión uniaxial .....	18
2.11 Ensayo de tracción indirecta .....	19
2.12 Ensayo triaxial dinámico.....	20
3. Generalidades.....	21
3.1 Proyecto general MGM.....	21
3.2 Materiales y composición .....	21
3.3 Granulometría de trabajo .....	23

3.4 Diseño de probetas .....	24
4. Metodología .....	25
4.1 Evaluación de calidad .....	25
4.1.1 Ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles (DMA) para cantera Paviandi .....	26
4.2 Ajuste y elaboración de curvas de compactación .....	26
4.2.1 Ajuste de energía de compactación y curvas de compactación de los materiales MGM-9 y SBG-C1 .....	26
4.2.2 Elaboración de curvas compactación de los materiales MGM-10 y SBG-C0.....	27
4.3 Desarrollo y ajuste de protocolos de fabricación de probetas.....	27
4.4. Elaboración de probetas de desempeño y ejecución de ensayos. ....	27
4.4.1 Ensayo de compresión uniaxial .....	28
4.4.2 Ensayo de tracción indirecta.....	29
4.4.3 Toma de imágenes 2D y 3D .....	30
4.4.4. Ensayo triaxial dinámico y determinación de módulo resiliente .....	30
5. Análisis de Resultados .....	32
5.1 Resultados de ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles para cantera Paviandi .....	32
5.2 Resultados de las curvas compactación .....	33
5.2.1 Curvas compactación.....	33
5.2.2 Valores de diseño para MGMs y materiales de control.....	34
5.3 Energía de compactación .....	35
5.4 Ensayos de carga estática.....	36
5.5 Resultados del ensayo triaxial dinámico.....	38
6. Conclusiones.....	43

7. Recomendaciones ..... 45

Referencias Bibliográficas ..... 46

Apéndices..... 50

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Listado de materiales MGMs y materiales de control .....	22
Tabla 2 Composición de finos para los materiales de estudio .....	22
Tabla 3 Resumen de resultados ensayo de la máquina de los ángeles.....	32
Tabla 4 Datos obtenidos para la curva de compactación para MGMs y materiales de control ....	33
Tabla 5 Resumen de los datos obtenidos de las curvas de compactación .....	34
Tabla 6 Porcentaje de RTI vs resistencia a la compresión inconfiada.....	38
Tabla 7 Datos experimentales de las probetas post compactación .....	38
Tabla 8 Resultados experimentales de humedad, punto de bloqueo y módulo resiliente promedio .....	40

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Curvas granulométricas para MGMs y materiales de control</i> .....	23
Figura 2 <i>Metodología</i> .....	25
Figura 3 <i>Montaje ensayo de compresión uniaxial</i> .....	28
Figura 4 <i>Montaje ensayo de tracción indirecta.</i> .....	29
Figura 5 <i>Probeta aislada en membrana de látex momentos antes del ensayo.</i> .....	31
Figura 6 <i>Equipo para ensayo triaxial dinámico.</i> .....	31
Figura 7 <i>Curva de compactación de los materiales MGM-10, MGM-9, y SBG-C1</i> .....	33
Figura 8 <i>Curva de compactación del material SBG-C0</i> .....	34
Figura 9 <i>Densidad total vs número de giros.</i> .....	35
Figura 10 <i>RTI vs Desplazamiento axial para cada material</i> .....	36
Figura 11 <i>Comparación de RTI de los materiales</i> .....	36
Figura 12 <i>Esfuerzo vs Desplazamiento axial de los materiales</i> .....	37
Figura 13 <i>Comparación de la resistencia a la compresión inconfiada de los materiales</i> .....	37
Figura 14 <i>Comparación función de módulo resiliente MGM-9 y SBG-CO</i> .....	39
Figura 15 <i>Comparación función de módulo resiliente MGM-10 y SBG-CO</i> .....	39
Figura 16 <i>Comparación función de módulo resiliente SBG-C1 y SBG-CO</i> .....	40
Figura 17 <i>Módulo residente promedio de los materiales MGMs y materiales de control</i> .....	41

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Protocolo de toma de mediciones y envoltura para las probetas MGM Y SBG. ....	50
Apéndice B. Toma de imágenes 2D y 3D.....	68

### Resumen

**Título:** Evaluación del comportamiento mecánico de materiales granulados convencionales de subbase y marginales identificados como MGM-9 y MGM-10. \*

**Autor:** Dairo Alejandro Rodríguez Ruiz, Diego Julián Anaya Gómez\*\*

**Palabras Clave:** Material granular marginal (MGM), punto de bloqueo, grado de saturación, módulo resiliente, compactación giratoria.

#### Descripción:

En el presente documento se realiza un análisis comparativo del comportamiento mecánico de los materiales convencionales de subbase SBG-CO y SBG-C1, y granulados marginales MGM 9 y MGM-10. El estudio tiene como finalidad avanzar en la evaluación preliminar sobre la viabilidad de emplear los materiales marginales en la construcción de subbases granuladas para vías terciarias. Su empleo permitiría disminuir los costos de construcción y mantenimiento de estas vías, ya que estos materiales son más abundantes y tienen menor costo que los materiales convencionales. Lo anterior permitiría optimizar e incentivar la inversión en este sector vial. Inicialmente, se realizó la evaluación de calidad del material original de cantera Paviandi, mediante el ensayo de desgaste en máquina de los ángeles. Con base en estos resultados se puede afirmar que el material no cumple las especificaciones del Instituto Nacional de Vías - INVIAS en lo referente a resistencia intrínseca de partículas. Como siguiente paso se realizó el ajuste y elaboración de curvas de compactación siguiendo el criterio del punto de bloqueo, lo que permitió establecer los parámetros de humedad óptima, peso unitario seco y número de giros requeridos para la fabricación de las probetas en el compactador giratorio. Sumado a esto, se realizaron cambios en los protocolos de producción de probetas y ejecución de ensayos. Realizados los ajustes mencionados anteriormente, se procedió a la ejecución de los ensayos para determinar la resistencia a la compresión uniaxial y tracción indirecta de los materiales en los que se observó una mayor resistencia del material de control SBG-C1 respecto a las otras muestras. Por último, se realizaron los ensayos triaxiales dinámicos y se determinó el módulo resiliente para los especímenes, en los que se toma en cuenta la saturación teórica de las muestras y se efectúa una comparación con las condiciones reales de saturación, calculadas a partir de las dimensiones reales de las probetas. Se evidenció una diferencia importante en el módulo resiliente del material de control SBG-CO siendo mayor en comparación con los demás materiales, siendo estos muy similares entre ellos.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Alex Eduardo Álvarez Lugo Ph.D. Ingeniería Civil. Codirector: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes Ph.D. Ingeniería Del Terreno Cartografía Y Geofísica

### Abstract

**Title:** Evaluation of the mechanical behavior of conventional subbase and marginal granular materials identified as MGM-9 and MGM-10. \*

**Author(s):** Dairo Alejandro Rodríguez Ruiz, Diego Julián Anaya Gómez \*\*

**Key Words:** Marginal granular material (MGM), locking point, degree of saturation, resilient modulus, gyratory compaction.

### Description:

In this document, a comparative analysis of the mechanical behavior of conventional subbase materials SBG-CO and SBG-C1, as well as marginal granular materials MGM-9 and MGM-10, is carried out. The study aims to assess the potential viability of using marginal granular materials in constructing granular subbases for low-volume roads, reducing construction and maintenance costs for these roads, as these materials are more abundant and have lower costs. In addition, this will allow for optimization and encouraging investment in this road sector. Initially, the quality evaluation of the original quarry material Paviandi was performed using the Los Angeles abrasion test. Based on the results, it can be stated that the material does not meet the specifications issued by the Instituto Nacional de Vías-INVIAS regarding particle intrinsic strength. The next step involved adjusting and developing compaction curves following the locking point criterion, allowing the determination of optimal moisture content, dry unit weight, and number of gyrations required to produce specimens in the gyratory compactor. Changes were also made to the specimen production protocols and test execution. After the mentioned adjustments, tests were conducted to determine the materials' uniaxial compressive strength and indirect tensile strength, revealing higher strength for the control material SBG-C1 than the other materials. Finally, dynamic triaxial tests were conducted, and the resilient modulus for the specimens was determined, considering the theoretical saturation of the specimens, and comparing it with the actual saturation conditions calculated from the dimensions of the specimens. There was a significant difference observed in the resilient modulus of the SBG-CO control material compared to the other materials, with the latter being very similar to each other.

---

\*Degree Work

\*\* Faculty of Physic-Mechanics Engineering. School of Civil Engineering. Director: Alex Eduardo Álvarez Lugo. Ph.D. Civil Engineering. Co-director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Ph.D. Engineering of Terrain Cartography and Geophysics.

## Introducción

En Colombia el sistema vial es la forma de transporte más demandada y usada en todo el territorio, lo que genera una necesidad de creación, conservación, y mantenimiento de las carreteras a nivel nacional. La red vial colombiana corresponde en su totalidad a 205.109 kilómetros de carretera, de los cuales 9% (17.993 km) corresponde a la red primaria, 22% (44.833 km) a la red vial secundaria, y 69% (142.284 km) a la red terciaria [1]. En otras palabras, la red vial está compuesta en su mayoría por la red terciaria, de la cual el 70,8% (100.748 km) es administrado por los municipios, el 9,8% (13.959 km) se encuentran bajo administración departamental, y el 19% (27.577 km) es administrado por la Nación a través del Instituto Nacional de Vías-INVÍAS (Ministerio de transporte, 2023).

Las vías terciarias juegan un papel importante para el país, ya que conectan los municipios con sus veredas y viceversa. Las vías terciarias son vías de bajo flujo de tránsito en comparación a la red primaria y secundaria; sin embargo, estas tienen mucha influencia en la economía de los municipios conectados y las comunidades rurales o campesinos, ya que mediante estas vías se permite el transporte de alimentos, personas, y mercancías que impulsan el desarrollo de los municipios, lo que a vez tiene influencia en el desarrollo y la equidad del país.

A pesar de ello, el estado de las vías terciarias es deficiente. Según el Departamento Nacional de Planeación, el 33.5% de las vías terciarias se encuentra en buen estado, el 38.4% en estado regular, y el 28.1% en mal estado; solo el 6% se encuentra pavimentado según informe desarrollado para el año 2017. Para las vías terciarias en tierra se evidencia que el 45.4% está en mal estado, el 18,5% en buen estado, y el 36,1% se encuentra en estado regular. Con afirmado se tiene un 15.5% en buen estado, 34.5% en mal estado, y 50% en regular estado (Vega Acosta, 2021) y (Acosta Ariza y Alarcón Romero, 2017)

Sumado a ello, la inversión para las vías terciarias es muy baja en comparación a la extensión que tienen en el territorio, pero ha ido en aumento, por lo cual es importante la búsqueda de alternativas, por ello materiales de pavimentación de costos bajos permitirían aumentar el alcance de la inversión actual, ya que los materiales convencionales suelen ser costosos y se tiene poco acceso a ellos en algunas zonas, lo cual eleva los costos de transporte de los materiales.

Es debido a las problemáticas mencionadas anteriormente que se buscan soluciones a esta situación en el estudio de materiales granulares marginales (MGM), los cuales son materiales no convencionales que no cumplen por completo las especificaciones técnicas exigidas para materiales de pavimentación (e.g., especificaciones INVIAS) (INVIAS, 2013). No obstante, los MGM podrían ser utilizados para algunas aplicaciones en vías de bajo tránsito vehicular como lo son las vías terciarias y tener resultados satisfactorios ya que son materiales de menor costo y más asequibles que los convencionales (Liebenberg & Visser, 2003).

Este trabajo de grado de investigación está enfocado en evaluar, mediante ensayos realizados en laboratorio, el comportamiento mecánico de materiales granulares convencionales y MGMs. El trabajo de grado hace parte de un proyecto de investigación marco, el cual se enfoca en evaluar de forma experimental el comportamiento mecánico e hidráulico para ciertas tipologías de MGMs donde se varía el porcentaje de finos e índices de plasticidad y se busca evaluar su comportamiento en comparación con materiales convencionales (materiales de control), para su uso potencial como material de subbase granular en vías terciarias.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento mecánico de materiales granulares tanto marginales como convencionales para uso en subbases, siendo estos compactados adecuadamente para el análisis de su resistencia teniendo en cuenta que poseen un contenido de finos del 19% y 24% e índices de plasticidad de un 11% y 15% para los materiales MGM-10 y MGM-9 respectivamente, junto a una debida caracterización en el caso de los materiales convencionales de subbase.

### 1.2 Objetivos Específicos

Evaluar la resistencia a la tracción indirecta (ITS) de los materiales marginales y compararla con al de los materiales convencionales.

Evaluar la resistencia de cada uno de los materiales a fuerzas axiales a través del ensayo de compresión uniaxial (UCS) y comparar las respuestas obtenidas para MGMs y materiales convencionales.

Evaluar el módulo resiliente de cada uno de los materiales, a través del ensayo triaxial dinámico, para comparar la rigidez de los MGMs y de los materiales convencionales.

## **2. Marco teórico**

A continuación, se presentan las definiciones de los conceptos relevantes para la investigación.

### **2.1 Vías terciarias**

Según el INVIAS, las vías terciarias son aquellas que conectan o unen los municipios con sus veredas y viceversa. Aquellas vías consideradas como terciarias pueden funcionar en afirmado. En caso de pavimentarse deberán cumplir con las condiciones geométricas estipuladas para las vías secundarias (INVIAS, 2008).

### **2.2 Material granular marginal (MGM)**

Se definen como MGMs a aquellos que no satisfacen completamente las especificaciones del INVIAS (INVIAS, 2013). Para este estudio se desarrollarán MGMs que cumplan con la granulometría de la franja de gravas y arenas de una subbase granular SBG-38 INVIAS, pero se aumentará el contenido de finos por encima de lo permitido en la especificación INVIAS E-320 (INVIAS, 2013) y los finos contarán con plasticidad superior a la máxima especificada por INVIAS.

### **2.3 Material tipo subbase**

Se denomina material tipo subbase a aquel que se encuentra debidamente esparcido y compactado sobre una superficie conocida como terreno natural o subrasante. Posee la capacidad de disipar y distribuir esfuerzos provenientes de una capa superior que frecuentemente es la base granular. Las subbases suelen estar compuestas por mezclas de suelo o suelo y agregados naturales y/o agregado triturado (INVIAS, 2013).

## 2.4 Ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles

Este ensayo permite determinar la resistencia a la degradación de agregados pétreos que poseen tamaños menores a 37.5 mm haciendo uso de la máquina de abrasión los ángeles. Para la ejecución del ensayo se sigue la norma INV E-218-13 (INVIAS, 2013), la cual establece los parámetros para la ejecución. En la ecuación 1 se muestra el cálculo del porcentaje de pérdidas a partir de este ensayo.

### Ecuación 1

*Porcentaje de pérdidas del ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles*

$$\%Pérdidas = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

Donde:

P1: Masa de la muestra antes del ensayo.

P2: Masa de la muestra después del ensayo al pasar tamiz N°12.

## 2.5 Curva de compactación

Se puede definir la compactación, como un proceso en el que aumenta la densidad de un material por el efecto de aplicación de fuerzas externas, sean estas de carácter estático o dinámico, reduciendo el volumen de vacíos y por ende disminuyendo la porosidad del suelo. Para determinar la curva de compactación se requiere de 4 a 5 probetas compactadas con distintos porcentajes de humedad, considerando que la compactación de cada muestra del material será ejecutada con un número de giros previamente definidos (compactación mediante compactador giratorio Superpave). Esto tiene como fin determinar el máximo peso unitario con su respectiva humedad óptima de compactación (Khaled et al., 2017) y (García et al., 2020).

## 2.6 Compactación por método giratorio

El método consiste en la aplicación de acciones simultáneas de presión vertical y acción giratoria, con un ángulo de inclinación con respecto al eje vertical, ejercidas por el compactador giratorio Superpave (SGC), el cual simula el proceso de compactación que se efectúa en las obras de construcción. Esto se debe al sistema de densificación por amasado y el modo de compactación por giros. Esta metodología fue creada por el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras, SHRP por su sigla en inglés, del Departamento de Transporte de Estados Unidos de Norteamérica (Duarte Suárez & Lizcano Carreño, 2015).

El uso de esta metodología ha ido en aumento en distintos países gracias a su precisión y el monitoreo que se tiene en el proceso, ya que este va midiendo la altura y densidad que se presentan en el proceso de compactación giro a giro; su uso se ha concentrado en el diseño y caracterización de mezclas asfálticas, pero en los últimos años también se ha incorporado en la compactación de suelos (Tauta et al., 2007) y (Duarte Suárez & Lizcano Carreño, 2015).

## 2.7 Punto de bloqueo

La definición más común y practica de “punto de bloqueo” (locking point) surge alrededor del año 1998 por (Vavrik & Carpenter, 1998) , quienes definieron este punto como el primer giro, de un conjunto de tres giros, precedido por dos giros de la misma altura en el compactador giratorio.

El concepto de punto de bloqueo hace referencia a la energía (número de giros) en el proceso de compactación de un material en el que este alcanza una estructura estable (Polaczyk et al., 2019). El ir más allá de este punto no trae beneficios en el proceso, sino que al contrario de esto se puede generar degradación en las partículas. Teniendo en cuenta lo anterior se puede inferir

que muestras compactadas que no alcancen el punto de bloqueo pueden considerarse inestables (Polaczyk et al., 2018).

## 2.8 Saturación de suelos

Los suelos se caracterizan por poseer partículas sólidas, agua y vacíos, que conforman la posibilidad de tres estados de saturación. El primero, suelo saturado, en donde todos los vacíos entre partículas sólidas se encuentran llenos de agua. El segundo, saturación parcial, implica que algunos vacíos son llenados con agua y otros no. El tercero, saturación nula, se presenta cuando solo existen partículas sólidas y vacíos en el suelo (Elena, 2012).

## 2.9 Módulo resiliente

Es la relación existente entre el esfuerzo desviador cíclico y la deformación unitaria axial (Herrera, 2014). Este parámetro es coherente a la realidad debido a que se genera carga y descarga con deformaciones permanentes en los materiales, siendo este fenómeno el que sufren los materiales granulares que conforman un pavimento en funcionamiento se determina según la ecuación 2.

### Ecuación 2

*Cálculo del módulo resiliente*

$$Mr = \frac{\sigma}{\epsilon_r}$$

Donde:

Mr: Módulo resiliente.

$\sigma$ : Esfuerzo desviador.

$\epsilon_r$ : Deformación unitaria recuperable.

### 2.10 Ensayo de compresión uniaxial

El ensayo consiste en aplicar una fuerza axial a una probeta cilíndrica. Para este caso, las probetas son de material granular marginal y de material granular convencional. Estas probetas deben ser llevadas hasta la rotura para determinar la fuerza axial máxima que pueden soportar los materiales (Galván-Ceballos & Restrepo, 2016).

La velocidad con la que se aplica la carga en el ensayo se encuentra en el rango de una deformación axial entre 0.5 y 2.5% de la longitud de la probeta (INVIAS , 2013). Con base en ello, la velocidad de aplicación de carga usada para los materiales marginales y convencionales es de 3 mm/min. El esfuerzo compresivo generado por cada carga registrada se determina según la ecuación 3, 4 y 5.

#### Ecuación 3

*Deformación axial para una carga dada*

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Donde:

$\Delta L$ : Longitud del espécimen

$L_0$ : Longitud inicial del espécimen del ensayo [mm]

#### Ecuación 4

*Área media correspondiente de la sección transversal*

$$A = \frac{A_0}{\left[1 - \frac{\varepsilon_1}{100}\right]}$$

Donde:

$A_0$ : Área media inicial de la sección transversal de la muestra, [mm<sup>2</sup>]

$\varepsilon_1$ : Deformación axial para una carga dada, [%]

**Ecuación 5***Esfuerzo axial*

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

Donde:

 $\sigma$ : Esfuerzo axial

P: Carga aplicada

A: Área media correspondiente de la sección transversal

**2.11 Ensayo de tracción indirecta**

El ensayo de tracción indirecta es una prueba de resistencia mecánica aplicada a materiales con baja resistencia a la tracción, de bajo costo, que permite obtener datos de forma simple. Esta técnica implica la colocación de una probeta en posición horizontal bajo fuerza de compresión y permite identificar la resistencia a la tracción del material. Se tiene como guía la norma ASTM D8225-19 (ASTM, 2019). La ecuación 6 describe el cálculo de la resistencia a la tracción indirecta.

**Ecuación 6***Cálculo de la resistencia a la tracción indirecta*

$$RTI = \frac{(2 * 10^6 * P)}{(\pi * h * d)}$$

Donde:

RTI: Resistencia a la tracción indirecta P: Carga máxima de rotura, [KN]

h: Altura de la probeta, [mm]

d: Diámetro de la probeta, [mm]

### 2.12 Ensayo triaxial dinámico

El ensayo triaxial dinámico es una técnica inventada desde 1966 por Seed y Lee (Gamarra Tuco, 2010). Este ensayo ha tenido diversas modificaciones y mejoras a lo largo del tiempo, pero el concepto de aplicar carga dinámica a un material al que se le desea conocer su módulo resiliente perdura hasta la fecha.

El ensayo consiste en primera instancia en la creación de una probeta, en este caso de material granular para pavimentos flexibles (Lázares & Mendoza, F, M, L, 2003), con el propósito de introducirla a una recámara y aplicar en estos determinados ciclos de carga “norma AASHTO T 307-99” (AASHTO, 2007). Los ciclos de carga se asocian a una presión hidráulica constante y una fuerza de compresión axial variable en el equipo triaxial dinámico, el cual cuenta con mecanismos de medición de carga y deformación.

### 3. Generalidades

#### 3.1 Proyecto general MGM

En este proyecto se realiza el estudio de diez tipos de materiales granulares marginales MGMs con distintos índices de plasticidad y diferentes contenidos de finos. Además, se estudian dos subbases granulares, también denominadas materiales de control (SBG-C0 y SBG-C1), las cuales servirán como material de control para determinar si los MGMs en estudio muestran resultados satisfactorios para su uso en la construcción de subbases granulares.

#### 3.2 Materiales y composición

Para la elaboración de las probetas de los MGMs y SBG-C1 se hizo uso de material cantera como componente principal. Este material fue extraído de la cantera Pavimentos Andinos S.A. (Paviandi) ubicada en el Km 4.5 vía Piedecuesta – Aratoca, Santander.

El material de cantera cuenta con las siguientes características: índice de plasticidad 11% en su fracción fina; desgaste por sulfatos del 3.70%; equivalente de arena de 48%, y un desgaste en la máquina de los ángeles de 60.7% (Gelves, 2021). Si se observa este último parámetro, se aprecia que dicho material no cumple con las especificaciones técnicas del INVIAS para subbase granular correspondiente al 50% de pérdidas a 500 revoluciones (INVIAS, 2013).

Para la elaboración de las probetas de la subbase de control SBG-C0 se hizo uso del material extraído de la cantera explotada por Sánchez Construcciones SAS ubicada en la finca El Júcaro, Vereda San Pedro, Kilometro 49 vía Bucaramanga-San Gil-Aratoca; Santander.

Además del uso del material de cantera, también se hizo uso de otros componentes adicionales para la elaboración de los distintos MGMs, puesto que la evaluación experimental general del proyecto incluye variaciones en los porcentajes de finos y los índices de plasticidad. Para esto se requiere hacer distintas combinaciones de materiales finos para la obtención de valores

preestablecidos de IP. El material de cantera Paviandi se obtiene al realizar el respectivo tamizado del material hasta obtener la fracción finos (pasa tamiz No. 200). El triturado Paviandi fue obtenido mediante el proceso de trituración, para posteriormente pasar a través del tamiz No. 200; no presenta plasticidad (no límite líquido, no límite plástico). La caolinita y bentonita son adquiridos por distribución comercial (importadas). Estos materiales tienen IP del 11.68% y 36.0%, respectivamente (Martínez y Vargas, 2022).

A continuación, en la (Tabla 1) se muestra el listado de los materiales MGMs y subbases de control, junto con sus respectivos contenidos de finos, IP, y gravedad específica.

**Tabla 1**

*Listado de materiales MGMs y materiales de control*

Material	% Finos	% IP	Gravedad específica
MGM-1	18	8	2.63
MGM-2	18	12	2.63
MGM-3	18	15	2.62
MGM-4	21	8	2.63
MGM-5	21	12	2.63
MGM-6	21	15	2.63
MGM-7	24	8	2.63
MGM-8	24	12	2.63
MGM-9	24	15	2.63
MGM-10	19	11	2.63
SBG-C1	8.5	0	2.62
SBG-C0	8.5	0	2.67

En el caso de estudio de este proyecto, los materiales a trabajar son MGM-9, MGM-10, SBG-C1 y SBG-CO, cuya composición de finos se muestra en la (Tabla 2).

**Tabla 2**

*Composición de finos para los materiales de estudio*

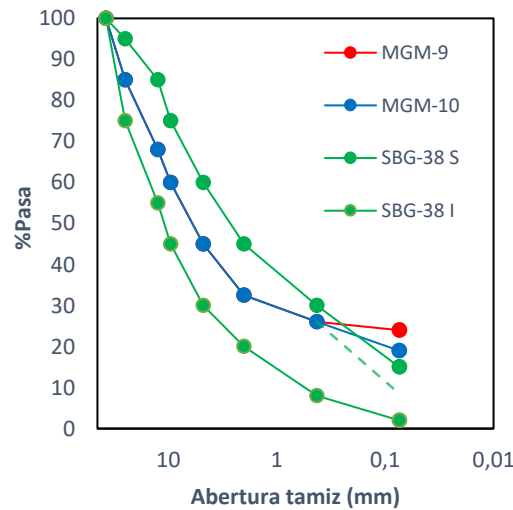
Material	Finos (%)	IP (%)	Composición de finos		
			Cantera Paviandi	Caolinita	Bentonita
MGM-9	24%	24	48.83%	48.83%	2.34%
MGM-10	19%	19	Cantera Paviandi		
			100%		
SBG-C1	8.5%	0	Cantera Paviandi	Triturado Paviandi	
			40%	60%	
SBG-C0	8.5%	0	Cantera Sánchez		
			100%		

**3.3 Granulometría de trabajo**

En la Figura 1 se encuentra la distribución granulométrica de los materiales de estudio y su comparación con respecto a la franja granulométrica SBG-38 delimitada por SBG-38-S como límite superior y SBG-38-I como límite inferior, siendo valores máximos y mínimos respectivamente (INVIAS, 2013).

**Figura 1**

*Curvas granulométricas para MGMs y materiales de control*



La granulometría de trabajo de los materiales de estudio presenta variaciones. Estos a su vez están regidos por un promedio de la franja granulométrica SBG-38 de la especificación INVIAS para subbase granular (INVIAS, 2013). Los materiales SBG-C1 y SBG-CO cumplen esta

especificación. Por el contrario, los materiales MGM-9 y MGM-10 presentan una modificación en el porcentaje de finos, teniendo como límite lo establecido en el artículo 320-22, Tabla 320- 3 el 15% (INVIAS, 2013), de manera que para estos es del 24% y 19%, respectivamente.

### **3.4 Diseño de probetas**

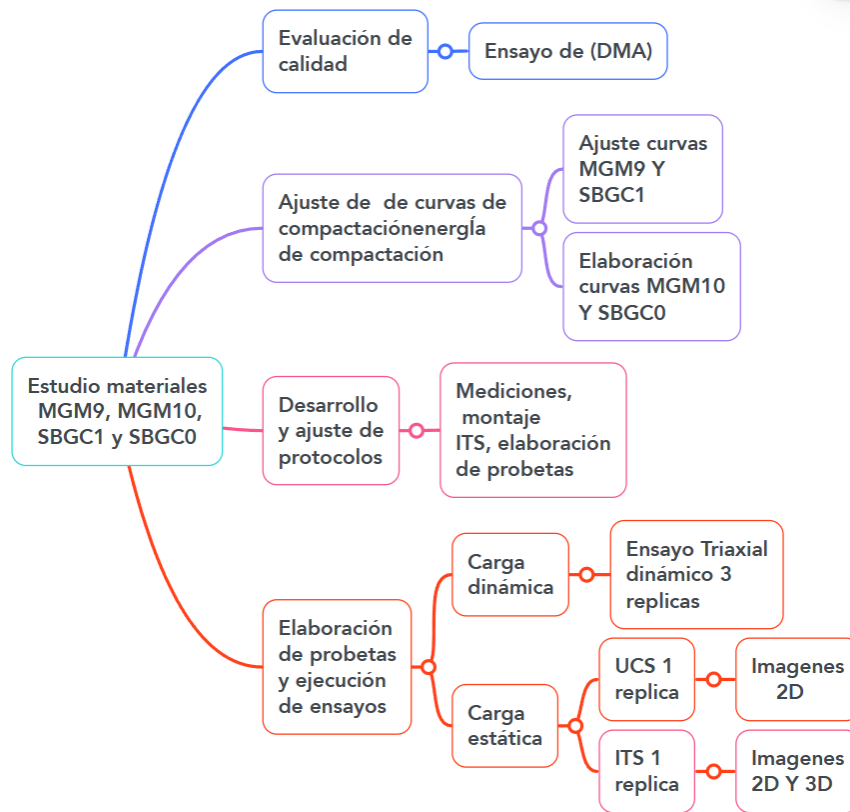
Las probetas fabricadas para el desarrollo de este proyecto poseen forma cilíndrica y dimensiones de 15 cm de diámetro y 20 centímetros de altura. Estas dimensiones se establecen con base en el requerimiento del tamaño para los ensayos a realizar, características del material y capacidad de fabricación que tiene el compactador giratorio empleado.

## 4. Metodología

En este apartado se describe el orden en el que se ejecutó el proyecto de investigación planteado, así como equipos e instrumentos que fueron necesarios para su desarrollo. En la Figura 2, se muestra la secuencia en la que se desarrollaron las distintas actividades.

**Figura 2**

*Metodología*



### 4.1 Evaluación de calidad

En este apartado se ejecutaron ensayos de laboratorio que tienen como objetivo determinar la calidad de uno de los materiales de trabajo. Para este caso el material a caracterizar se trata del proveniente de la cantera Paviandi, seleccionando las muestras según la norma INV E 202- 13 (INVIAS , 2013).

#### ***4.1.1 Ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles (DMA) para cantera Paviandi***

Para la ejecución de este ensayo se aplicó el protocolo de ensayo de la norma INV E 218-13 (INVIAS, 2013), en la cual se selecciona la granulometría tipo A de la Tabla 218-1 (granulometría de las muestras de ensayo) (INVIAS, 2013), elegida con base en las características del material cantera de Paviandi.

#### **4.2 Ajuste y elaboración de curvas de compactación**

Para la elaboración de las curvas de compactación se fabricaron probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 20 cm de altura para determinar el peso unitario seco máximo y la humedad óptima de compactación; las probetas fueron elaboradas haciendo uso del compactador giratorio.

##### ***4.2.1 Ajuste de energía de compactación y curvas de compactación de los materiales MGM-9 y SBG-C1***

En etapas tempranas del proyecto se realizó la compactación de los materiales usando como parámetro el peso unitario total de los mismos, pero debido a que este criterio generaba un comportamiento variable en el proceso de compactación de las muestras, se decidió cambiar el parámetro que rige la compactación por el de criterio de punto de bloqueo. Al cambiar el parámetro se observó que la energía oscilaba entre 90 y 150 giros para todos los MGMs y materiales de control.

Para estandarizar la cantidad de energía a suministrar en el proceso se realizó una campaña donde se compactó una probeta de cada material a 220 giros para encontrar un punto de bloqueo promedio, con el que se fabriquen las probetas, lo que dio como resultado 130 giros.

#### ***4.2.2 Elaboración de curvas compactación de los materiales MGM-10 y SBG-C0***

Para los materiales MGM-10 y SBG-C0 se realizaron curvas de compactación aplicando el criterio de punto de bloqueo, donde se determinó el máximo peso unitario y la humedad óptima de compactación para los materiales.

#### **4.3 Desarrollo y ajuste de protocolos de fabricación de probetas**

Antes de la preparación de las probetas para los distintos ensayos de laboratorio, fue necesario la elaboración y ajuste de protocolos de fabricación de probetas con el fin de mejorar la precisión de fabricación de probetas y ejecución de ensayos de laboratorio los cuales se describen a continuación:

Ajuste de **“Protocolo de preparación de muestra y ensayo de compactación giratoria”** (Martínez y Vargas, 2022).

Elaboración de **“Protocolo de toma de mediciones y envoltura para las probetas MGMs y SBGs”** ver apéndice A.

Ajuste de **“Ejecución ensayo de tracción indirecta”** (Cetina y Jaimes, 2022).

#### **4.4. Elaboración de probetas de desempeño y ejecución de ensayos.**

Para la elaboración de las probetas de desempeño, se requirió el ajuste de protocolos, curvas, y energía de compactación cómo se mencionó anteriormente. Estas probetas son elaboradas con base en los resultados de las curvas de compactación, humedad óptima, y peso unitario seco máximo. El proceso de preparación de probetas que incluye el proceso de secado, mezclado y compactación de muestras (Martínez y Vargas, 2022).

En el proceso de ejecución de ensayos del proyecto de investigación se ejecutaron ensayos de carga estática, ensayo de compresión uniaxial, ensayo de tracción indirecta, y ensayos de carga dinámica, ensayo triaxial dinámico.

#### ***4.4.1 Ensayo de compresión uniaxial***

En el proceso de ejecución de este ensayo se toma como guía la norma INV E 152-13 (INVIAS , 2013), sumado a la aplicación de los protocolos de montaje y uso de la prensa de carga (Orduz y Torres, 2024). Se realizó una probeta por cada material. Estas probetas fueron ensayadas una hora después de su elaboración. Para la ejecución del ensayo se establece una velocidad de carga comprendida entre el 0.5% y el 2.5% de la altura de la probeta (INVIAS , 2013), la cual corresponde a 200 mm. Por lo tanto, la velocidad de aplicación de carga para el ensayo es de 3 milímetros por minuto. En la Figura 3 se puede observar el montaje del ensayo antes de su ejecución.

### **Figura 3**

*Montaje ensayo de compresión uniaxial*



#### 4.4.2 Ensayo de tracción indirecta

Para la ejecución de este ensayo se siguió la guía de la norma ASTM D8225-19 (ASTM, 2019) para muestras asfálticas, de la cual se ajustó la velocidad de aplicación de la carga con base en la norma INV E 152-13 (INVIAS , 2013). Se decidió usar una velocidad 3 milímetros por minuto para las muestras de suelo, que a su vez permitiera realizar comparaciones respecto al ensayo de compresión uniaxial. Para este proceso se elaboró una probeta de cada uno de los materiales, las cuales fueron ensayadas una hora después de su fabricación.

Para el desarrollo de este ensayo fue necesaria la adaptación de un cabezal de transmisión de carga, que se ajustara al tamaño de la prensa de carga y dimensiones de las probetas, además del uso del protocolo (Ordúz y Torres, 2024). En la Figura 4 se muestra el montaje del ensayo antes de su ejecución.

#### Figura 4

*Montaje ensayo de tracción indirecta.*



#### ***4.4.3 Toma de imágenes 2D y 3D***

El proceso de toma de imágenes 2D y 3D, se requiere para la toma de un registro físico de la forma y estado de las probetas previa y después de la ejecución de los ensayos (Garzón y Sánchez, 2022).

La toma de imágenes 2D fue hecha mediante una cámara de 20.1 megapíxeles. Las imágenes eran tomadas al inicio de los ensayos de compresión uniaxial y tracción indirecta, con las cuales se tomaba un registro de imágenes en la parte frontal y superior de las probetas, lo que permitía observar características propias de cada uno de los especímenes tales como imperfecciones, colores o rasgos.

El registro de las imágenes 3D fue realizado mediante el uso de un Kinect Xbox 360 controlado por el software Developer Toolkit Browser v1.8.0 (Kinect for Windows) (Microsoft, S.f). Estas imágenes fueron tomadas posteriormente al ensayo de tracción indirecta ya que las probetas se dividen en dos secciones, con lo cual se toma un registro de los planos de falla de ambas secciones.

#### ***4.4.4. Ensayo triaxial dinámico y determinación de módulo resiliente***

Para el desarrollo del ensayo se hizo uso de un equipo triaxial dinámico, en el cual se aplicó la metodología descrita en la norma AASHTO T 307-99 (AASHTO, 2007), para determinar la respuesta esfuerzo-deformación de las probetas de los materiales marginales MGM-9 y MGM-10 al igual que la de los materiales convencionales SBG-C0 y SBG-C. Se fabricaron 3 probetas de cada uno de los materiales mencionados anteriormente, elaboradas bajo las mismas condiciones para realizar una comparación de posibles variaciones entre los mismos especímenes y los otros materiales. Los ensayos de las probetas se ejecutaron una hora después de su elaboración. Fue de gran importancia la adecuada manipulación de las probetas previa y después de realizados los

ensayos, puesto que posteriormente se realizarán procesos humedecimiento y secado a estos materiales en posteriores trabajos de grado.

En la Figura 5 se observa la envoltura de la probeta antes de ser ingresada en la cámara triaxial; además, en la Figura 6 se muestra el equipo en medio de la realización del ensayo.

### Figura 5

*Probeta aislada en membrana de látex momentos antes del ensayo.*



### Figura 6

*Equipo para ensayo triaxial dinámico.*



## 5. Análisis de Resultados

### 5.1 Resultados de ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles para cantera Paviandi

Se realizaron seis réplicas para el ensayo de DMA en donde los datos se encuentran plasmados en la (Tabla 3).

**Tabla 3**

*Resumen de resultados ensayo de la máquina de los ángeles*

<b>Ensayo 1</b>	P1 (g)	5000
	P2 (g)	1902
	% Pérdidas	61.96%
<b>Ensayo 2</b>	P1 (g)	4999
	P2 (g)	1835
	% Pérdidas	63.29%
<b>Ensayo 3</b>	P1 (g)	5015
	P2 (g)	1737
	% Pérdidas	65.36%
<b>Ensayo 4</b>	P1 (g)	5004
	P2 (g)	1465
	% Pérdidas	70.72%
<b>Ensayo 5</b>	P1 (g)	5027
	P2 (g)	1556
	% Pérdidas	69.05%
<b>Ensayo 6</b>	P1 (g)	5007
	P2 (g)	1591
	% Pérdidas	68.22%

Del análisis de datos se puede observar que el material no cumple con el valor límite correspondiente del 50% de pérdidas establecido en las especificaciones de INVIAS (INVIAS, 2013), teniendo como promedio 66.43% y desviación estándar de 2.98% por ende, el material es propenso a ser deleznable.

## 5.2 Resultados de las curvas compactación

### 5.2.1 Curvas compactación

En la (Tabla 4) se puede observar los resultados del ajuste de la curva de compactación de los materiales MGM-9 y SBG-C1 junto con la construcción de las curvas de compactación de los materiales SBG-C0 y MGM-10. Los resultados se evidencian de forma gráfica en las Figura 7 y Figura 8.

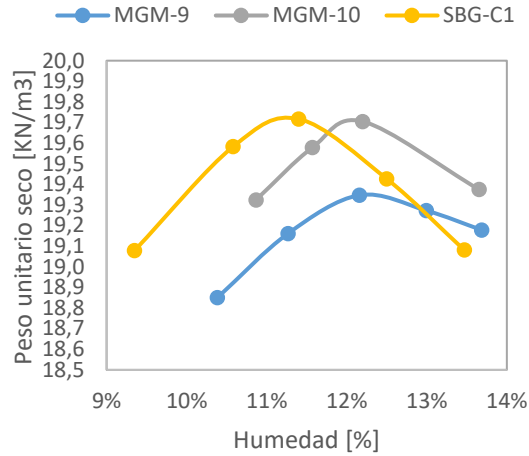
**Tabla 4**

*Datos obtenidos para la curva de compactación para MGMs y materiales de control*

Código de la probeta	Humedad óptima [%]	Número de giros punto de bloqueo	Peso unitario seco [KN/m <sup>3</sup> ]
MGM10_C1	10.87%	141	19.32
MGM10_C2	11.57%	131	19.57
MGM10_C3	12.20%	130	19.70
MGM10_C4	13.65%	104	19.37
MGM9_C3	13.00%	153	19.27
SBG_C1_C1	10.58%	182	19.58
SBG_C1_C2	11.40%	144	19.71
SBG-C0-C1	4.63%	89	22.02
SBG-C0-C2	4.85%	142	22.64
SBG-C0-C3	5.13%	106	23.14
SBG-C0-C4	5.21%	152	23.05
SBG-C0-C6	5.64%	123	22.74
SBG-C0-C7	5.90%	108	22.41
SBG-C0-C8	6.04%	82	22.33

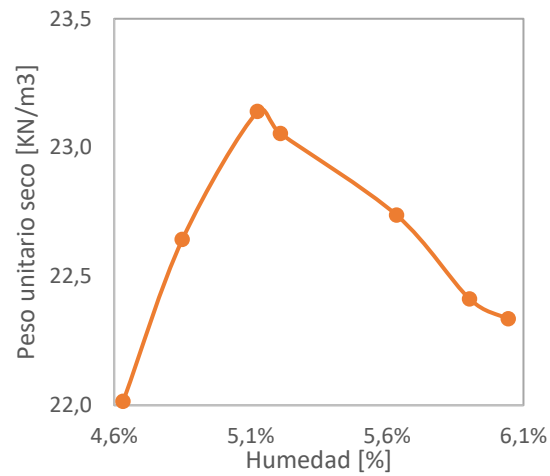
**Figura 7**

*Curva de compactación de los materiales MGM-10, MGM-9, y SBG-C1*



**Figura 8**

*Curva de compactación del material SBG-C0*



**5.2.2 Valores de diseño para MGMs y materiales de control**

A partir de las curvas de compactación se obtuvieron los valores de máximo peso unitario seco y humedad óptima requeridos para diseñar las probetas a ensayar, los datos se encuentran resumidos en la (Tabla 5).

**Tabla 5**

*Resumen de los datos obtenidos de las curvas de compactación*

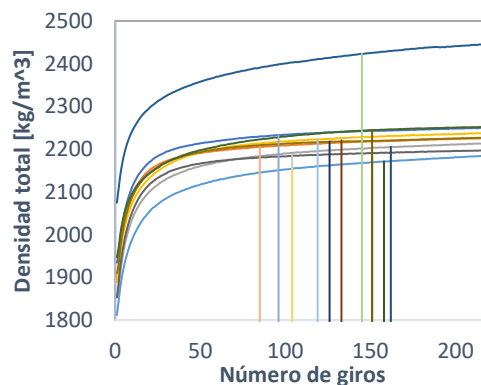
Código de la probeta	Humedad óptima [%]	Peso unitario seco máximo [KN/m <sup>3</sup> ]	Grado de saturación [%]
MGM-9	12.80%	19.35	94.97%
MGM-10	12.10%	19.71	96.41%
SBG-C0	5.10%	23.15	91.04%
SBG-C1	11.30%	19.72	91.06%

### 5.3 Energía de compactación

El ajuste del número de giros de compactación para las probetas de desempeño se debe a la presencia de alta variabilidad en este parámetro una vez finalizada la compactación de las probetas, puesto que para un solo material con las mismas características podía tener 30, 70 o 150 giros de energía de compactación para alcanzar un mismo peso unitario seco. Para estandarizar el parámetro del número de giros se realizó una campaña en donde se compactaron todos los materiales a una energía elevada (220 giros). En la Figura 9 se observa los valores obtenidos de compactar todos los materiales MGMs y de control del proyecto a 220 giros.

#### Figura 9

*Densidad total vs número de giros.*



Se observa que el valor mínimo de giros para estabilizar los materiales es de 85 y el máximo generado es de 162 giros. Por ende, se decidió hacer una estandarización de la energía a

la que se compactarían las probetas. El valor de energía de compactación a utilizar en el proyecto fue de 130 giros.

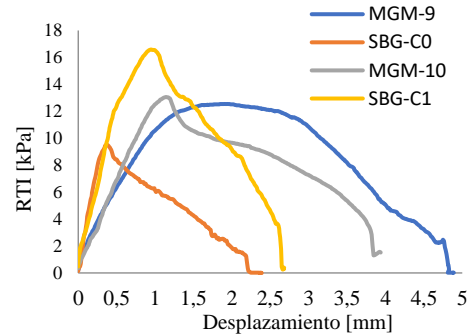
## 5.4 Ensayos de carga estática

### 5.4.1 Resultados del ensayo de tracción indirecta

En la Figura 10 se ilustra de forma resumida los resultados de resistencia a la tracción indirecta RTI.

#### Figura 10

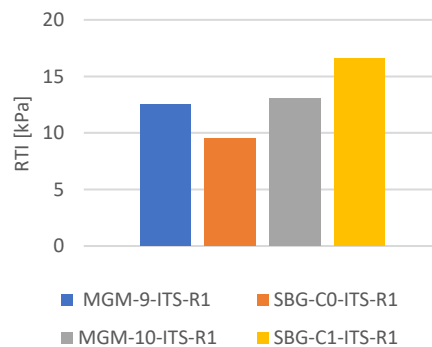
*RTI vs Desplazamiento axial para cada material*



En la Figura 11 se comparan los valores de RTI de cada uno de los materiales, donde se observa que tienen magnitudes similares entre sí, a excepción de la SBG-C1 que posee una resistencia mayor en comparativo a los demás materiales.

#### Figura 11

*Comparación de RTI de los materiales*

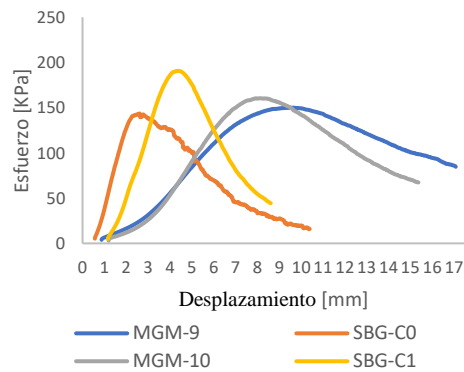


### 5.4.2 Resultados del ensayo de compresión uniaxial

En la Figura 12 se ilustra de forma resumida los resultados dados por los materiales bajo la carga uniaxial del ensayo.

#### Figura 12

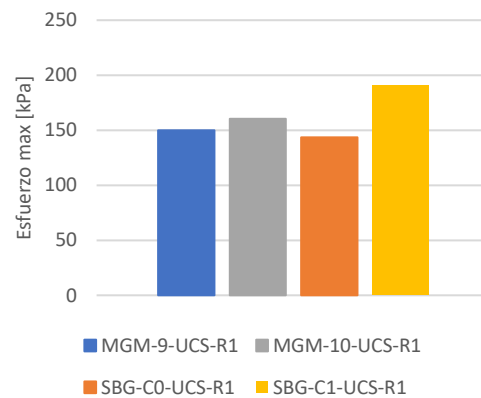
*Esfuerzo vs Desplazamiento axial de los materiales*



En la Figura 13 se presentan los valores de la resistencia a la compresión inconfiada que lograron cada uno de los materiales bajo la ejecución del ensayo. Cabe resaltar que al igual que el ensayo de ITS, el esfuerzo máximo soportado según la figura fue por SBG-C1.

#### Figura 13

*Comparación de la resistencia a la compresión inconfiada de los materiales*



### 5.4.3 Porcentaje de RTI vs resistencia a la compresión inconfiada

En la (Tabla 6) se muestra el valor del porcentaje de RTI en comparativa a la resistencia a la compresión inconfiada.

**Tabla 6**

*Porcentaje de RTI vs resistencia a la compresión inconfiada*

MGM-9	SBG-C0	MGM-10	SBG-C1
<b>RTI [kPa]</b>			
12.5	9.5	13.1	16.6
<b>Resistencia a la compresión inconfiada [kPa]</b>			
150.0	143.6	160.5	190.7
<b>RTI / resistencia a la compresión inconfiada</b>			
8.36%	6.63%	8.13%	8.70%

Cabe señalar que para tener un análisis más profundo de la tendencia del comportamiento de estos materiales es prudente ensayar una mayor cantidad de probetas por cada material.

## 5.5 Resultados del ensayo triaxial dinámico

La ejecución de este ensayo se realizó, una hora después del proceso de compactación. Es de esperarse que los valores de humedad óptima, peso unitario seco y grado de saturación del diseño teórico mostrados en la (Tabla 5), respecto al resultado experimental varíen puesto que las condiciones del proceso no son ideales. En la (Tabla 7) se muestran los resultados de obtenidos post compactación de los especímenes.

**Tabla 7**

*Datos experimentales de las probetas post compactación*

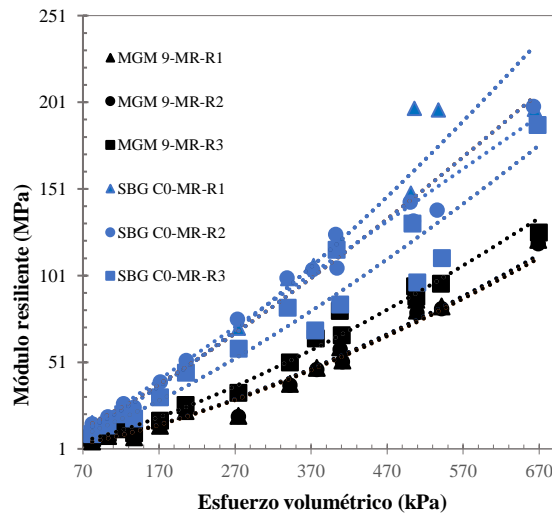
Material	Peso unitario seco [KN/m3]	Masa (g)	Humedad (%)	Grado de Saturación (%)
<b>MGM9 R1</b>	19,32	7679	12,75%	89,94%
<b>MGM9 R2</b>	19,34	7684	12,87%	91,40%
<b>MGM9 R3</b>	19,28	7789	12,94%	89,50%

<b>MGM10 R1</b>	19,70	7779	12,27%	88,07%
<b>MGM10 R2</b>	19,83	7777	12,21%	95,17%
<b>MGM10 R3</b>	19,88	7785	12,30%	97,67%
<b>SBG_C1 R1</b>	20,04	7733	11,47%	94,80%
<b>SBG_C1 R2</b>	20,06	7732	11,38%	95,50%
<b>SBG_C1 R3</b>	20,12	7815	11,43%	96,04%
<b>SBG-C0 R1</b>	22,94	8560	5,06%	84,59%
<b>SBG-C0 R2</b>	23,06	8559	5,13%	94,25%
<b>SBG-C0 R3</b>	22,91	8561	5,36%	97,38%

Se compararon los resultados obtenidos de los materiales marginales y el material de control con mayor valor de módulo resiliente. En las Figura 14, Figura 15, y Figura 16 se describe la diferencia de cada uno de los ensayos realizados en los materiales MGM-9, MGM-10, y SBG-C1 con respecto al material SBG-C0.

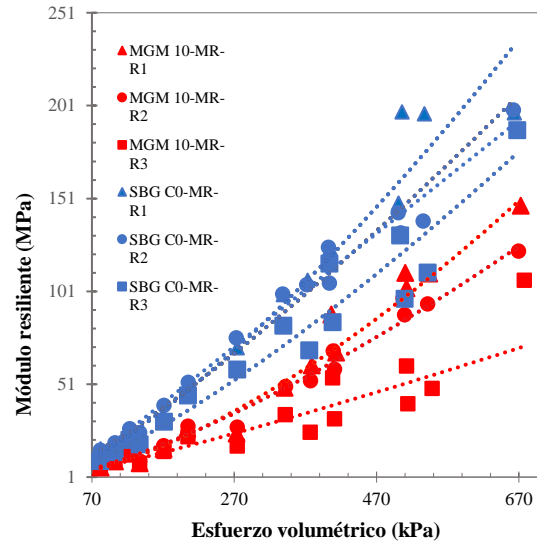
**Figura 14**

*Comparación función de módulo resiliente MGM-9 y SBG-CO*



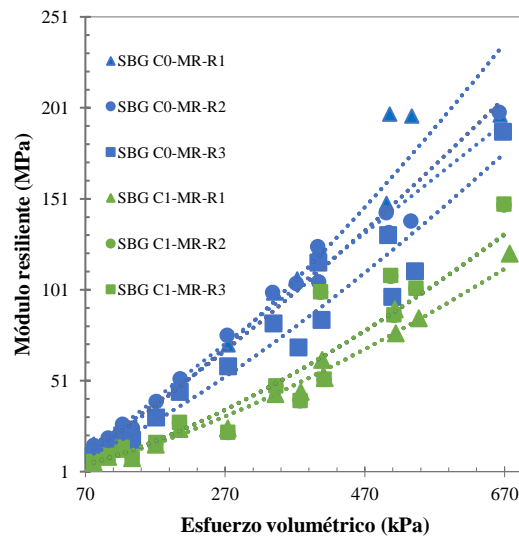
**Figura 15**

*Comparación función de módulo resiliente MGM-10 y SBG-CO*



**Figura 16**

*Comparación función de módulo resiliente SBG-C1 y SBG-C0*



En la (Tabla 8) se describen todos los valores de humedad, la energía a la que cada material llegó al punto de bloqueo y el valor de módulo resiliente promedio de cada uno de los materiales.

**Tabla 8**

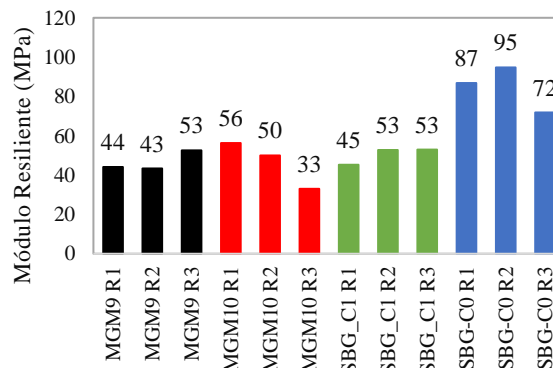
*Resultados experimentales de humedad, punto de bloqueo y módulo resiliente promedio*

<i>Material</i>	<i>Humedad%</i>	<i>Número de giros a punto de bloqueo</i>	<i>Módulo resiliente promedio (MPa)</i>
<b>MGM9 R1</b>	12,75%	109	44
<b>MGM9 R2</b>	12,87%	124	43
<b>MGM9 R3</b>	12,94%	107	53
<b>MGM10 R1</b>	12,27%	110	56
<b>MGM10 R2</b>	12,21%	118	50
<b>MGM10 R3</b>	12,30%	78	33
<b>SBG_C1 R1</b>	11,47%	115	45
<b>SBG_C1 R2</b>	11,38%	108	53
<b>SBG_C1 R3</b>	11,43%	127	53
<b>SBG-C0 R1</b>	5,06%	120	87
<b>SBG-C0 R2</b>	5,13%	124	95
<b>SBG-C0 R3</b>	5,36%	120	72

Mostrados los resultados anteriores se puede ver que el comportamiento de los materiales MGM 9, MGM 10, y SBG-C1 es similar. También se puede observar que respecto al material SBG-CO, los valores de módulo resiliente promedio en comparación a los especímenes mencionados anteriormente es cercano al doble. En la Figura 17 se muestran los resultados del módulo resiliente promedio de cada material.

**Figura 17**

*Módulo residente promedio de los materiales MGMs y materiales de control*



El comportamiento similar del material SBG-C1 respecto a los otros MGMs es un comportamiento esperado puesto que material de cantera Paviandi no cumple con las especificaciones establecidas por el INVIAS (INVIAS, 2013), que es la mayor parte de la composición del material, lo cual muestra que el establecer la misma granulometría que el material SBG-CO, no genera cambios considerables en el comportamiento de los MGMs respecto en términos del ensayo triaxial dinámico.

Un aspecto notable es que en el material de control SBG-CO y el MGM-10 uno de los especímenes tiene una variación importante respecto a sus réplicas, por lo cual al indagar en los resultados se mostró que para la SBG-CO R3 se presentó una variación de la humedad la cual fue de 5,36% variando respecto al diseño teórico y los resultados experimentales de las otras replicas puesto que la probeta se encontraba más húmeda (ver Tabla 3). Para el caso de MGM-10 R3 se evidenció que en el proceso de compactación la probeta alcanzó el punto de bloqueo a los 78 giros, mientras que los demás especímenes lo alcanzaron más cerca a los 130, siguiendo la teoría del punto de bloqueo la cual indica que superado este punto los aportes al proceso de compactación no son muchos, si no que al contrario puede generar degradación del material.

## 6. Conclusiones

Una vez se estandarizó la energía de compactación a usar en el proyecto se logró obtener valores comparables de peso unitario seco y de módulo resiliente entre los diferentes materiales evaluados. Para el caso de los materiales analizados se puede evidenciar que sus valores de punto de bloqueo son muy cercanos al valor de 130 giros, lo que permite afirmar que la compactación de esos materiales es viable.

Los materiales de control permiten cuantificar qué tanto difieren los MGMs de una subbase funcional en la industria. Los datos obtenidos en el ensayo triaxial dinámico del material de control SBG-C0 evidencian un mejor comportamiento, en general casi duplicando la rigidez con respecto a los demás materiales. El SBG-C1 es un material de control construido a partir de material de Paviandi, aunque modificando su contenido de finos y plasticidad. El hecho de que su fracción de gravas presenta un desgaste en promedio del 66% en el ensayo de máquina de los ángeles lo cual supera lo permitido por la norma INVIAS (INVIAS, 2013) genera que su respuesta ante el ensayo triaxial dinámico no sea óptima como material de control.

En términos de resistencia mecánica, el material de control SBG-C0 tiene valores menores a los de los materiales marginales y el material de control SBG-C1 como se pudo observar en las figuras 11 y 13, debido a que es un material no plástico y no cohesivo. Por ende, este presenta una respuesta frágil en los ensayos en comparación a los demás materiales, a diferencia del material de control SBG-C1 el cual presenta mayor resistencia ante carga axial y tracción indirecta.

Los resultados evidencian que existe congruencia entre RTI y el esfuerzo máximo del ensayo de compresión uniaxial; se puede observar que el valor promedio de este parámetro en estos materiales es de 8%. Llama la atención que la posible ganancia de cohesión por un mayor porcentaje de finos en los materiales no implica un mayor RTI o esfuerzo en el ensayo de

compresión uniaxial puesto que se observa que el material de control SBG-C1 respecto a los MGMs presenta una mejor respuesta en los ensayos estáticos con un porcentaje de finos menor

### **7. Recomendaciones**

En futuras investigaciones para la continuidad de este proyecto sobre MGMs, se sugiere: Se recomienda un mayor monitoreo en cada una de las fases necesarias para la elaboración de las probetas de desempeño con el fin de garantizar resultados óptimos. Para el establecimiento de un nuevo proceso se recomienda siempre estandarizar de forma clara y concisa los pasos y normativas a realizar a través de protocolos para evitar incongruencias posteriores a lo largo del tiempo.

### Referencias Bibliográficas

AASHTO. (2007). Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials, T 307-99.

Acosta-Ariza, M y Alarcón-Romero, P. (2017). Análisis de la cantidad y el estado de las vías terciarias en Colombia y la oportunidad de la ingeniería civil para su construcción y mantenimiento. Tesis de Grado. Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia

ASTM. (2019). Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature, D8225-199

Cetina, J., y Jaimes, J. (2022). Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como mgm-4. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Duarte Suárez, L. M., & Lizcano Carreño, E. V. (2015). Evaluación de las ventajas y desventajas de usar en Colombia las especificaciones técnicas de Superpave para diseño de mezcla asfáltica convencional. Tesis de grado. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga, Colombia.

Elena, M. O. V. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. Boletín de Ciencias de la Tierra, pp. 23-38, jul. 2012.

Galván-Ceballos, M., & Restrepo, I. A. (2016). Resistance correlation with compression uniaxial effective humidity and porous rocks. Dyna, 83, 9-15.

Gamarra Tuco, R. F. (2010). Determinación del módulo resiliente de suelos granulares mediante ensayos triaxiales dinámicos [Master's Thesis]. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

García, N.P., Garnica, P., Luis, A., Bernal, A. B. y Ortiz, J. (2020). Determinación de la curva de compactación Proctor estándar de suelos de terraplén o subrasante usando el equipo giratorio. Instituto Mexicano del transporte, no. 604, pp. 3–9.

Garzón, J. y Sánchez, H. (2022). Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como mgm-3. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Gelves, R. (2021). Evaluación Exploratoria de la Caracterización Mecánica e Hidráulica de un Material Granular Marginal a Emplear en Estructuras de Pavimento. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Herrera, M. (2014). Determinación del módulo resiliente de diseño de pavimentos mediante criterios ASSHTO 1993 y 2002. Tesis de Máster en Ingeniería Civil con Mención en Ingeniería Vial. Universidad de Piura. Lima, Perú.

INVIAS, Instituto Nacional de Vías, Manual de diseño Geométrico de carreteras. (2008). Criterios de diseño Vías secundarias [Online]. Available: [www.invias.gov.co](http://www.invias.gov.co)

INVIAS. (2013). Capítulo 3 – Afirmados, subbases y bases especificaciones generales de construcción de carreteras. INVIAS.

INVIAS. (2013). INV E- 218-13 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.7mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles . INVIAS.

INVIAS. (2013). INV E-152-13 Compresión inconfiada en muestras de suelos, INVIAS.

INVIAS. (2013). INV E-201-13, Muestreo de agregados para la construcción de carreteras, INVIAS.

INVIAS. (2013). INV E-202-13, Reducción de muestras de agregados por cuarteo, INVIAS.

Khaled, Z. S. M., Abed, A. H., & Nsayif, T. S. (2017). Significance of using a Superpave Gyrotory Compactor to Simulate Field Compaction of Fine-Grained Soil. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 20, 641-646. <https://www.researchgate.net/publication/320567150>

Lázares, I. W. G., & Mendoza, F, M. L. (2003). ENSAYO DE MODULO RESILIENTE. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:124192152>

Liebenberg, J. J. E., & Visser, A. T. (2003). Stabilization and Structural Design of Marginal Materials for Use in Low-Volume Roads. *Transportation Research Record*, 1819(1), 166-172. <https://doi.org/10.3141/1819b-21>

Martínez, J., y Vargas, J. (2022). Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase granular identificados como mgm-1. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Microsoft, "Kinect for Windows SDK – It's Here!",2011, [En , línea]. Disponible en. <https://blogs.microsoft.com/blog/2011/06/16/kinect-for-windows-sdk-its-here/>. [Accedió: 12-12-2023]

Ministerio de transporte. (2023). “Anuario Nacional de Transporte. [Online]. Available: [www.mintransporte.gov.co](http://www.mintransporte.gov.co)

Orduz, Y. y Torres, Y. (2024). Evaluación de la Resistencia de Muestras Compactadas de Materiales Granulares Marginales de Subbase Granular (MGM-5-6-7-8). Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Polaczyk, P., Han, B., Huang, B., Jia, X., & Shu, X. (2018). Evaluation of the hot mix asphalt compactability utilizing the impact compaction method. *Construction and Building Materials*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115423703>

Polaczyk, P., Huang, B., Shu, X., & Gong, H. (2019). Investigation into Locking Point of Asphalt Mixtures Utilizing Superpave and Marshall Compactors. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(9), 04019188. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002839](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002839)

Tauta, J. F. C., Ortiz, O. J. R., & González, D. F. M. (2007). Ensayo de compactación giratoria en suelos como alternativa al ensayo de compactación proctor. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 17, 67-81.

Vavrik, W. R., & Carpenter, S. H. (1998). Calculating Air Voids at Specified Number of Gyration in Superpave Gyrotory Compactor. *Transportation Research Record*, 1630(1), 117-125. <https://doi.org/10.3141/1630-14>

Vega-Acosta, K. (2021). La información de los proyectos de vías terciarias en Colombia 2017 a 2021 en un sistema de información geográfica SIG. Tesis de grado. Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia.

## Apéndices

**Apéndice A.** Protocolo de toma de mediciones y envoltura para las probetas MGM Y SBG.

**Elaborado por:** Dairo Alejandro Rodríguez Ruiz y Diego Julián Anaya Gómez

A continuación, se muestra el procedimiento a realizar para la toma de mediciones de las probetas, estas constan de registro de alturas (mm), diámetros(mm), masas (g) Temperatura y humedad relativa.

El procedimiento anterior es necesario para la determinación de área, volumen, relaciones de fase y grado de saturación real de las probetas, este procedimiento de debe realizar en las siguientes etapas:

### 1. Registro de temperatura y humedad relativa haciendo uso del hidrómetro.

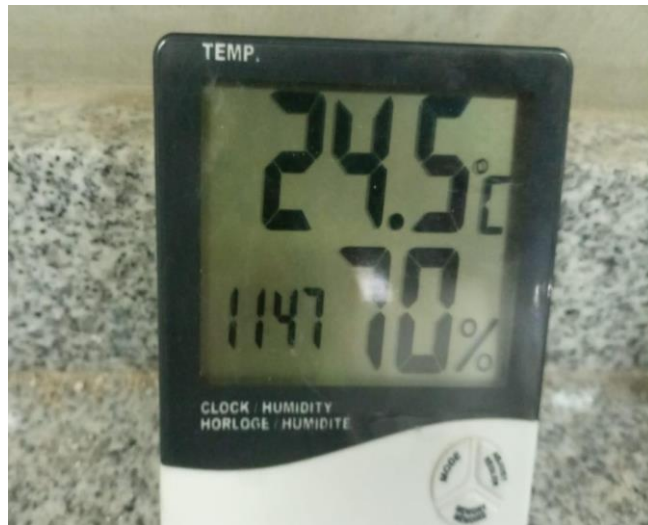


Figura 1. Registro de temperatura y humedad relativa.

### 2. Registro de Masa de la probeta post compactación.

Este procedimiento se debe realizar sin que la muestra tenga un contacto directo con las manos o las superficies sólidas externas para evitar la contaminación de la muestra. Se recomienda el uso guantes o recubrimiento superficial con (vinipel amarillo) para su manipulación.



Figura 2. Masa de la probeta post compactación.

### 3. Toma de mediciones de diámetros y altura

Una vez registrada la masa post compactación procedemos a realizar las mediciones de diámetros y alturas de la probeta en distintos puntos con el fin de tener un valor promedio de dichas mediciones.

Antes de realizar las mediciones de altura y diámetros se recomienda hacer un recubrimiento sencillo de (Envoltura Doble- Vinipel Amarillo) para evitar la degradación de la muestra, el vinipel mencionado se adecua muy bien a la forma de la probeta y es muy delgado por lo cual no afecta en una gran consideración las mediciones.

- **Medición de alturas.** Se requieren 6 mediciones altura de la probeta, estas mediciones además de un recubrimiento delgado de vinipel, se hará uso de un disco sólido para la ayuda de la medición de estas.

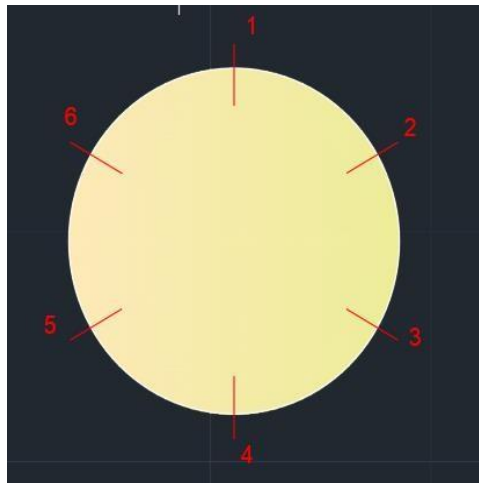


Figura 3. Distribución de puntos para la medición de altura de probeta

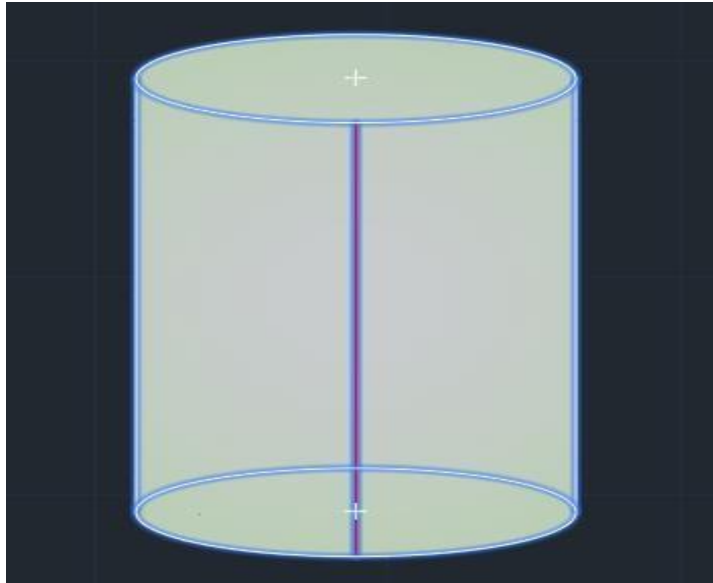


Figura 4. Extensión hasta la parte inferior de los puntos de medición de la probeta.

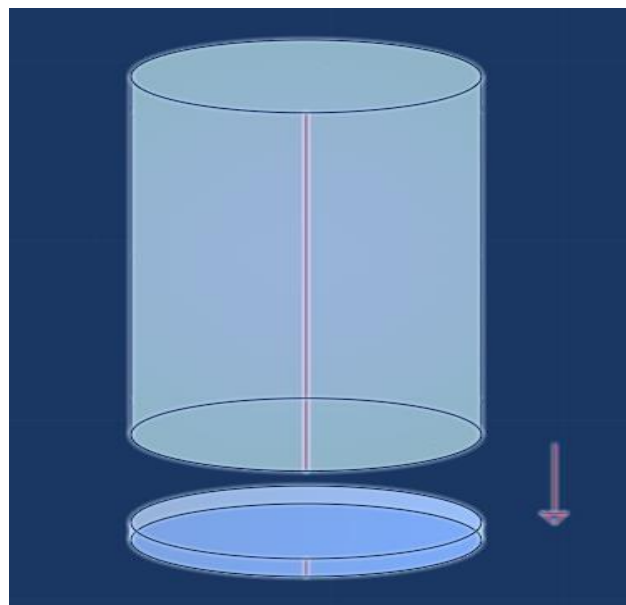


Figura 5. Extensión parte inferior y disco de las marcas de medición

Las mediciones de altura de la probeta se realizarán de la siguiente forma, las 6 mediciones se marcarán en el papel vinipel de la parte superior de la probeta como se muestra en la (figura 1), posteriormente se extenderán hasta la parte inferior como se muestra en la (Figura 2), (Figura 3) esto se realiza con el fin de garantizar la verticalidad de la medición, además de ello debemos enumerar tanto el disco como la probeta, respecto al número de medición que se esté tomando.

Una vez hecho esto debemos realizar la medición total desde la parte inferior del disco, hasta la parte superior de la probeta, esto se hace para las 6 mediciones, después de realizar las mediciones totales, procedemos a realizar las mediciones del disco solido en el mismo orden en el que hicieron las mediciones totales, estas mediciones se realizarán con el uso del (**calibrador electrónico**).

Altura	Probeta + Disco(mm)	Disco(mm)	Probeta (mm)
H1			
H2			
H3			
H4			
H5			
H6			
		<b>Altura promedio (mm)</b>	

Tabla 1. Tabla de mediciones para altura de la probeta

Medición de diámetros. Se deben realizar medición de diámetros en las distintas alturas de la probeta con el fin de tener suficiente información del diámetro de la probeta, para así obtener un diámetro promedio de la probeta, esta medición se realizará de la siguiente forma.

Para la parte superior usaremos el (calibrador electrónico) y realizaremos 4 mediciones en los siguientes sentidos, (A.A)-(B-B)-(C-C)-(D-D).

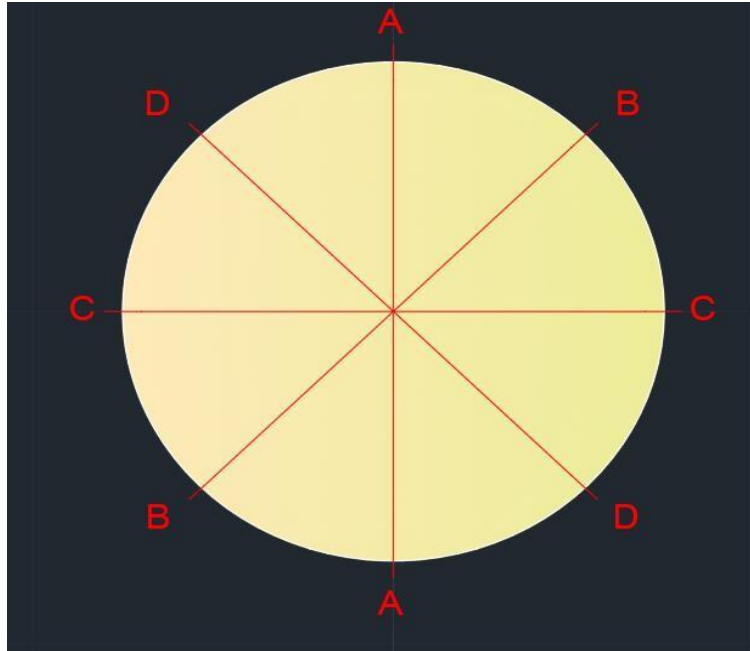


Figura 6. Numeración medición de diámetros parte superior (1)

Para las siguientes partes de la probeta haremos uso de una cinta métrica para medir la longitud de la circunferencia, con el fin de obtener un diámetro estimado de esas secciones. Dichas mediciones se realizan a una distancia de 5 cm ,10cm, y 20cm medidos desde la base superior de la probeta.

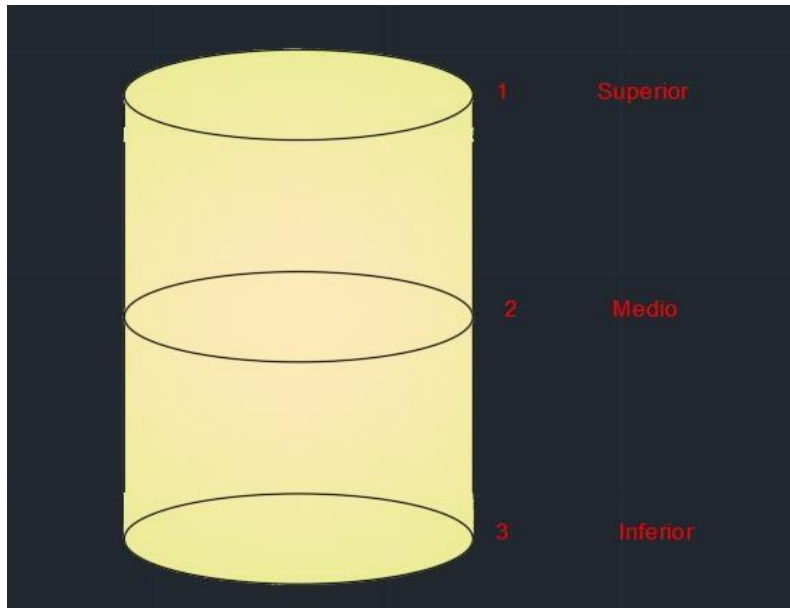


Figura 7. medición de los diámetros de la probeta en 1, 2 y 3.

- Con las medidas ya tomadas procedemos a calcular el diámetro promedio.

***Superior***

Diámetro			
A-A	B-B	C-C	D-D
Diámetro Promedio (C1)			

***Medio***

Diámetro			
A-A	B-B	C-C	D-D
Diámetro Promedio (C2)			

*Inferior*

Diámetro			
A-A	B-B	C-C	D-D
		Diámetro Promedio (C3)	

$$Diametro Promedio = \frac{C1 + C2 + C3}{3}$$

**4. Puesta en equilibrio por succión de la probeta después de Mr.**

Este es el procedimiento se debe realizar una vez hemos terminado el ensayo de Módulo resiliente, la probeta entrará en un periodo de equilibrado de mínimo 15 días.

*Recomendaciones*

La manipulación del papel filtro debe ser con pinzas o guantes de látex, deben encontrarse totalmente limpios, evitar totalmente la manipulación o contaminación de estos con las manos u otros implementos.

Uso de una tara de aluminio pequeño que se encuentre seca y limpia de cualquier tipo de muestra o sustancia.

Secado en Horno de los papeles filtro ( $110^{\circ} + - 5^{\circ}$ ), secado en horno mínimo una hora, tener cuidado a la hora de ponerlos en el horno para evitar su contaminación.

La información más detallada sobre este procedimiento se encuentra en el protocolo de “PROTOCOLO DE MEDICIÓN DE SUCCIÓN EN MUESTRAS DE SUELOS.”

A continuación, se muestran las formas en las que debemos posicionar los elementos junto con la probeta.



Figura. 8. Esquema de puesta en succión de la probeta.

El esquema anterior muestra el tipo de discos a usar en esta etapa, como se puede ver existen dos tipos de configuración.

A Continuación, se explica la composición de las dos configuraciones para la puesta en succión de las muestras.

#### Primera configuración

- Disco sólido parte superior.
- 2 papeles filtro
- Disco perforado
- Probeta
- Disco sólido parte inferior.

#### Segunda configuración

- Tapa

- 2 papeles filtro
- Rejilla
- Probeta
- Disco solido parte inferior

## 5. Envoltura de Probetas

El procedimiento se realiza con el fin de garantizar la integridad y mantener el porcentaje de humedad de la muestra una vez terminado el proceso de compactación, debido que puede ver afectada por las condiciones del ambiente, afectando el estado de la muestra y por ende los ensayos a realizar.

### 5.1 Envoltura Doble (Vinipel Amarillo).

Consiste en hacer una envoltura en el sentido vertical de la probeta y 2 vueltas en el sentido Horizontal



Figura. 9. Envoltura de probeta vinipel amarillo paso 1.



Figura. 10. Envoltura de probeta vinipel amarillo paso 2.



Figura. 11. Envoltura de probeta vinipel amarillo paso 3.



Figura. 12. Envoltura de probeta vinipel amarillo terminada.

### 5. 2 Envoltura Triple (Vinipel Blanco).

Consiste en hacer una envoltura en el sentido vertical de la probeta y vueltas en el sentido Horizontal



Figura 13. Envoltura de probeta vinipel blanco paso 1

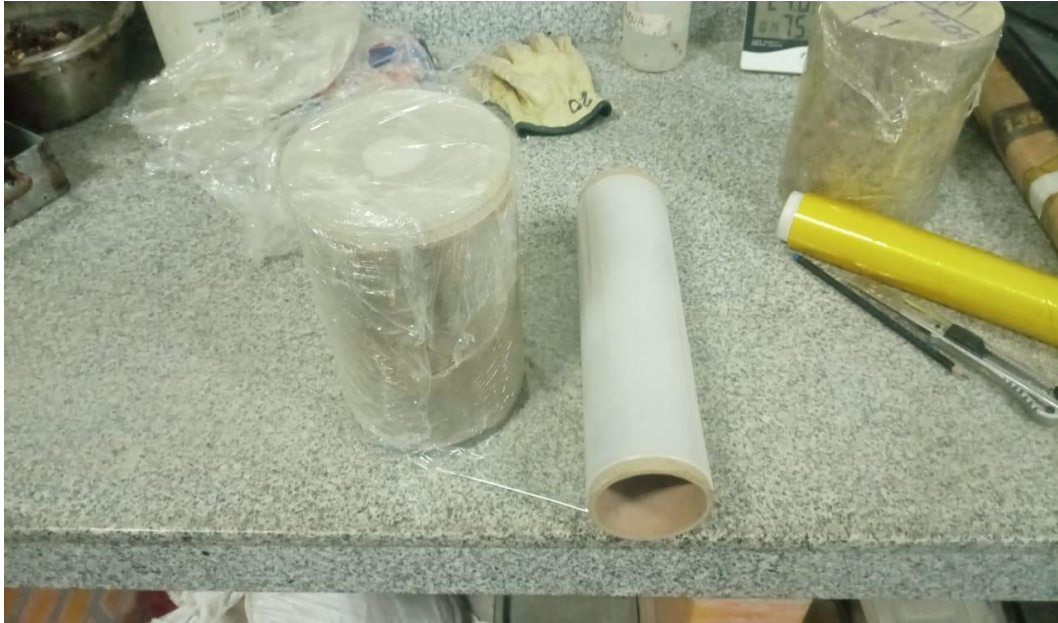


Figura. 14. Envoltura de probeta vinipel blanco paso 2

Una vez terminados las envolturas con vinipel asegurar con cinta de enmascarar la parte superior e inferior donde se encuentran las uniones de la probeta con los discos, para posteriormente marcar con la codificación de la probeta, fecha, parte de la probeta donde se marcó e indicando el estado en el que se encuentra.

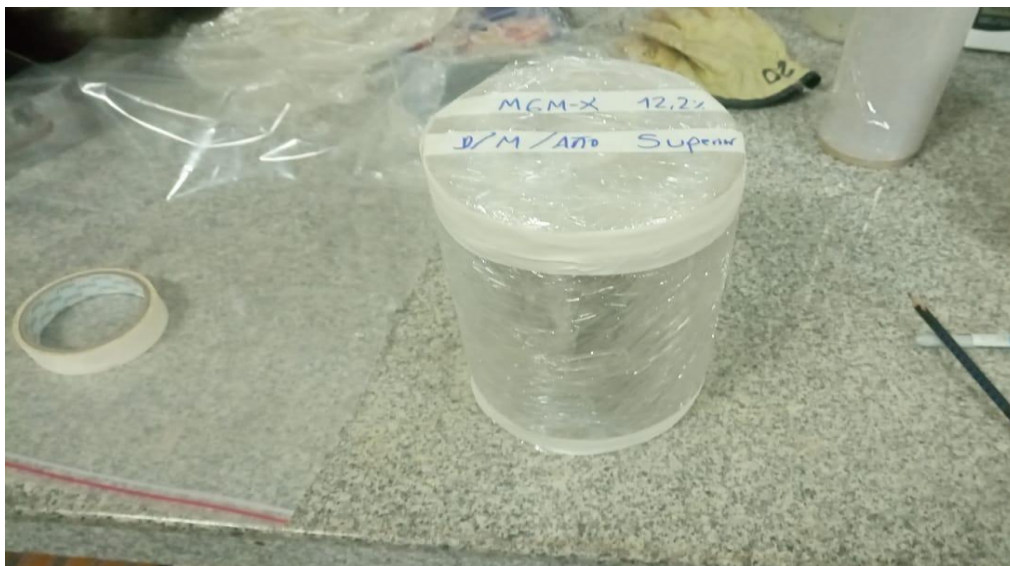


Figura 15. Envoltura de probeta vinipel blanco paso 3

### 5. 3 Envoltura Doble bolsas (ziploc)

En este procedimiento debemos asegurarnos de sacar el aire de las bolsas ziploc, ya que esto puede afectar la conservación de la probeta, además de hacer sellos con cinta transparente preferiblemente, en la parte inferior, media y superior, iniciando desde la parte inferior. Este procedimiento se realiza 2 veces.



Figura. 16. Envoltura de probeta bolsa ziploc paso 1.



Figura. 17. . Envoltura de probeta bolsa ziploc paso 2.



Figura 18. . Envoltura de probeta bolsa ziploc terminada.

#### 5. 4 Envoltura con papel burbuja

Esta envoltura se realiza con el fin de garantizar la integridad de la probeta una vez terminado los procesos en envoltura anteriores, este procedimiento se debe realizar siempre que una probeta vaya a entrar en equilibrio por succión 15 días o más, o en periodos de tiempo en que las probetas no se vayan a manipular, como ejemplo tenemos las vacaciones, son periodos de tiempo donde la probeta reposara y debemos garantizar su cuidado tanto de humedad como su forma, sumado al almacenamiento en caba.



Figura 19. Envoltura de la probeta papel burbuja paso 1.



Figura 20. Envoltura de la probeta papel burbuja paso 2.



Figuras 21. Envoltura de la probeta papel burbuja paso 3.

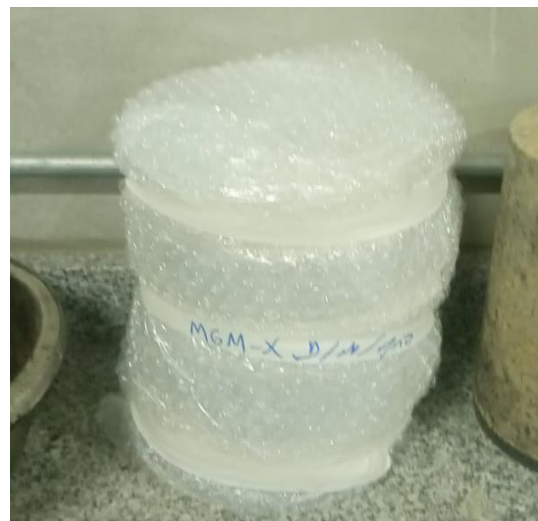


Figura 22. Probeta envuelta en papel burbuja con su respectivo nombre y codificación.

Una vez terminado este proceso de envoltura ponemos un pedazo de cinta de enmascarar y marcamos la probeta con su código de marcación y fecha para reconocerla cuando se requiera manipular de nuevo.

## **6. Pasos para seguir en los distintos ensayos realizados en el laboratorio.**

### **-Post Compactación- Ensayo (UCS Y ITS)**

Paso 1. Extracción de la probeta del molde del compactador giratorio.

Paso 2. Retiro de los discos sólidos metálicos del molde, posteriormente retiró los discos de papel. Paso 3. Registro de peso de la probeta post compactación.

Paso 4. Medición de diámetros y Alturas de la probeta. (Envoltura doble)

Paso 5. Envoltura de la probeta con vinipel.

(Envoltura doble) Paso 6. Reposos de (30 a 60) minutos.

Paso 7.” Revisión protocolo de toma de imágenes 2D y 3D.”

Paso 8. Retiro de la envoltura de vinipel, ejecución del ensayo respectivo.

Paso 9. Almacenamiento de muestra post ensayo de ser necesario.

### **-Post Compactación- Medidas antes de medición de MR.**

PASO 1. Registro de temperatura y humedad relativa haciendo uso del hidrómetro.

PASO 2. Registro de Masa de la probeta obtenida en la post compactación (sin vinipel solo la probeta)

PASO 3 Registro de Masa de la probeta con vinipel, la probeta recibe un recubrimiento (Envoltura doble) de vinipel por cual gana una masa adicional, la cual debe ser registrada.

PASO 4. Medición de diámetros y Alturas antes del ensayo (estas mediciones corresponden a las mediciones (post compactación). Una vez terminado el ensayo de módulo resiliente realizamos las siguientes mediciones.

**-Post Ensayo triaxial Dinámico- Medidas después de medición de MR.**

PASO 1. Registro de temperatura y humedad relativa haciendo uso del hidrómetro.

PASO 2. Registro de Masa de la probeta con vinipel post Mr.

PASO 3. Medición de diámetros y Alturas después de realizado el ensayo de módulo resiliente.

PASA 4. Registro de Masa de la probeta sin vinipel post Mr.

PASA 5. Puesta en equilibrio (succión) de la probeta.

PASO 6. Envoltura para el reposo de la probeta. (Contempla todas las envolturas)

**Apéndice B.** Toma de imágenes 2D y 3D

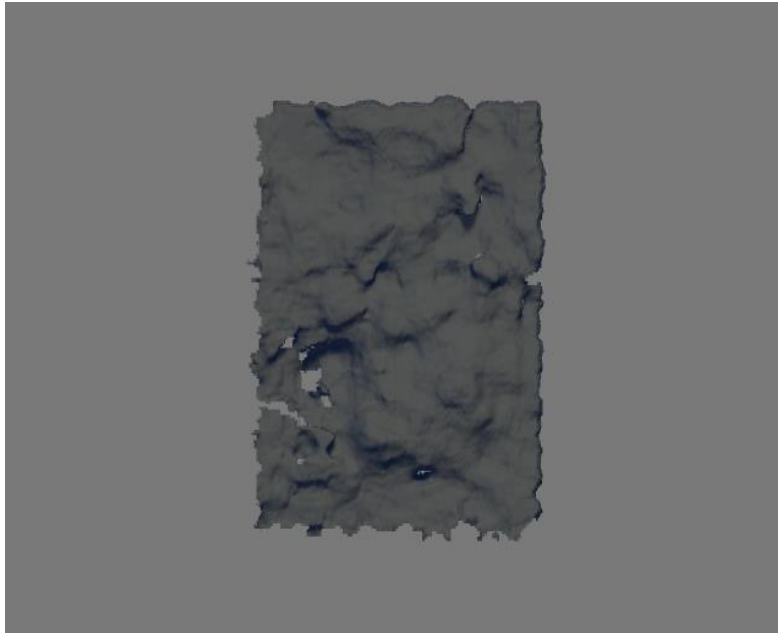
A continuación, se adjuntas las imágenes de las probetas de cada material, antes y después del ensayo de tracción indirecta.

- Toma de imágenes 2D de MGM-9-R1-ITS:

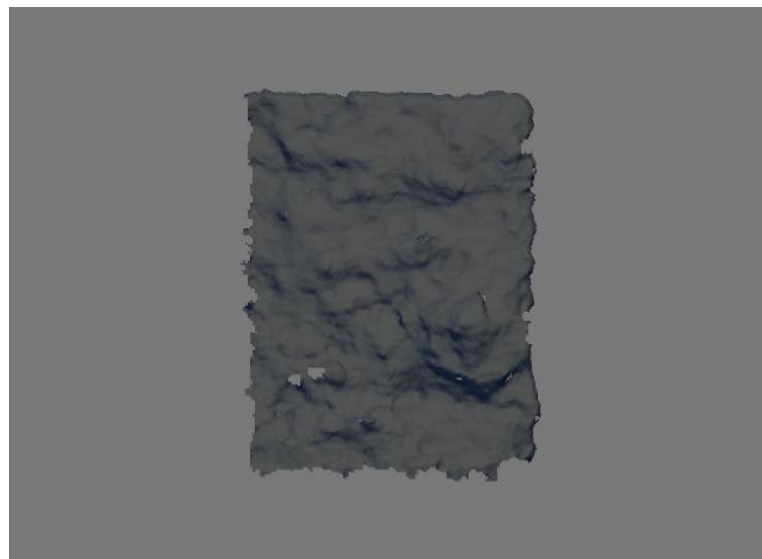


**Figura 1.** Probeta MGM-9-R1-ITS vista frontal y superior.

- Toma de imágenes 3D de MGM-9-R1-ITS:



**Figura 2.** Imagen 3D cara 1 de MGM-9-R1-ITS.

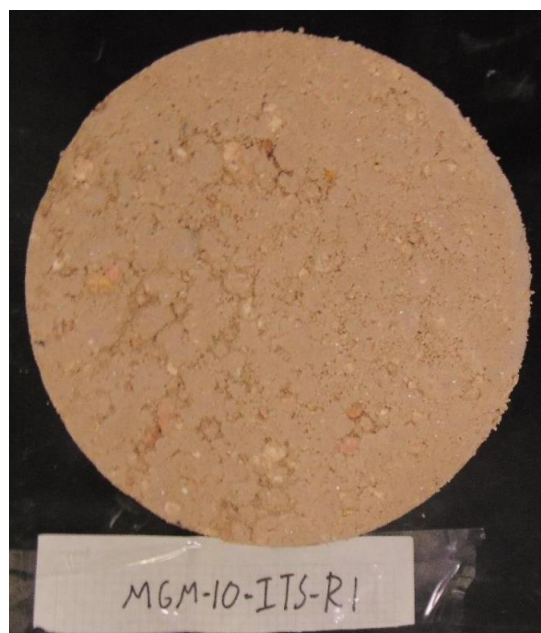


**Figura 3.** Imagen 3D cara 2 de MGM-9-R1-ITS.

- Toma de imágenes 2D de MGM-10-R1-ITS:

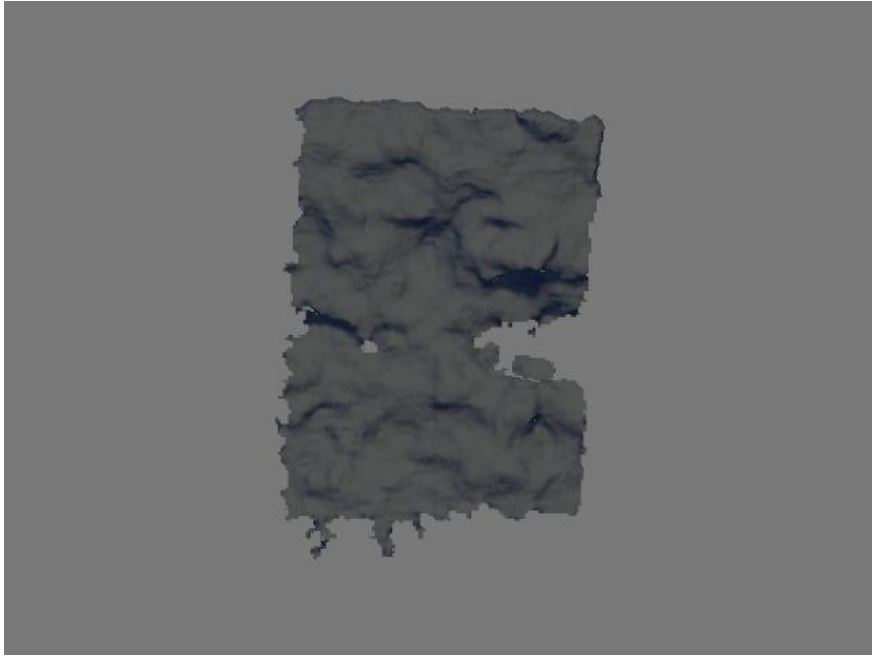


**Figura 4.** Probeta MGM-10-R1-ITS vista frontal.

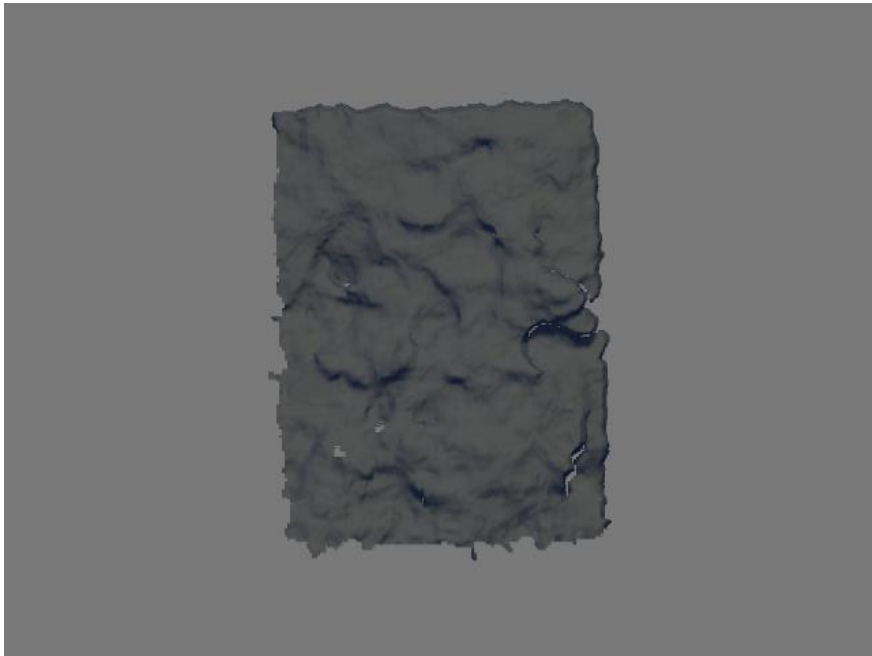


**Figura 5.** Probeta MGM-10-R1-ITS vista superior.

- Toma de imágenes 3D de MGM-10-R1-ITS:



**Figura 6.** Imagen 3D cara 1 de MGM-10-R1-ITS

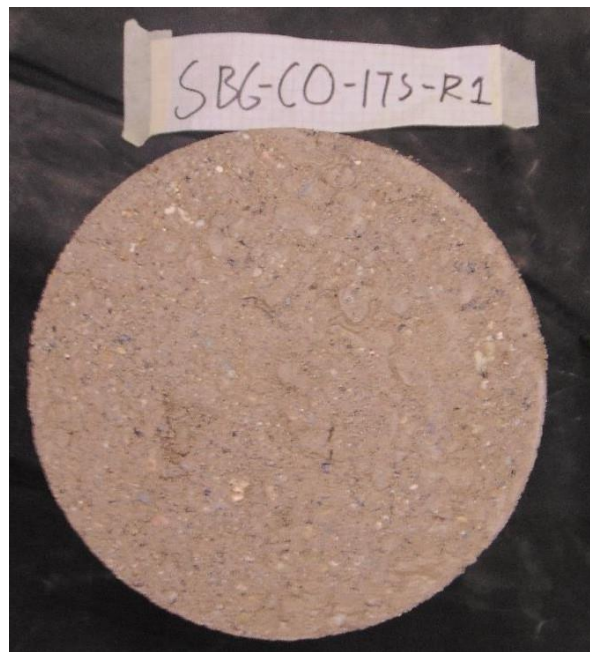


**Figura 7.** Imagen 3D cara 2 de MGM-10-R1-ITS

- Toma de imágenes 2D de SBG-C0-R1-ITS:

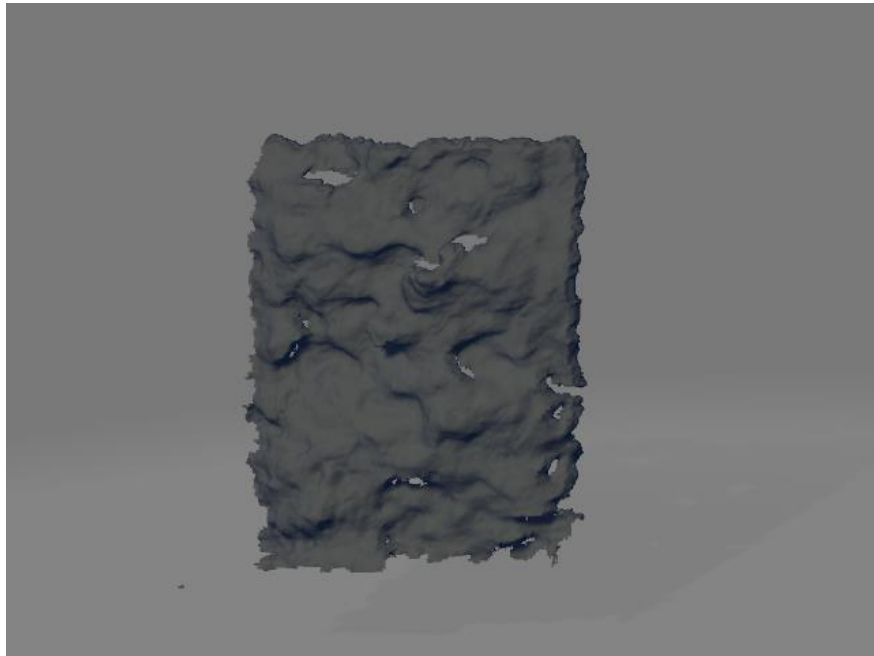


**Figura 8.** Probeta SBG-C0-R1-ITS vista frontal.

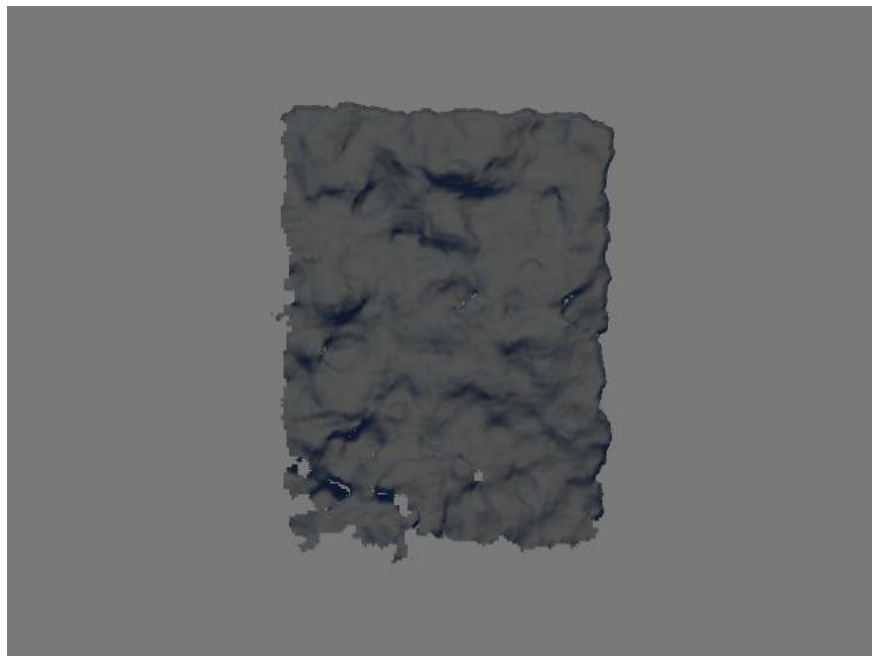


**Figura 9.** Probeta SBG-C0-R1-ITS vista superior.

- Toma de imágenes 3D de SBG-C0-R1-ITS:



**Figura 10.** Imagen 3D cara 1 de SBG-C0-R1-ITS.

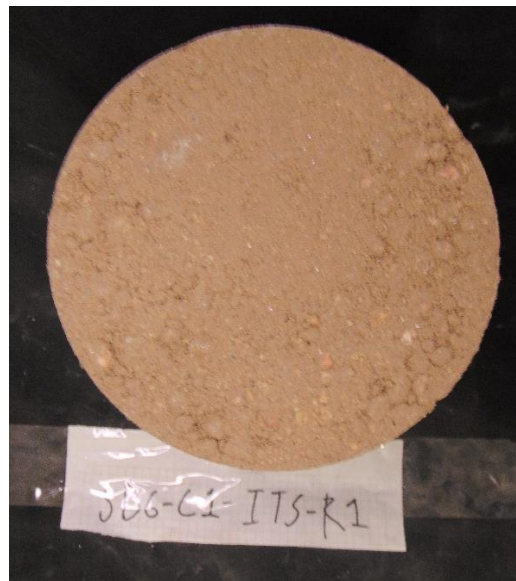


**Figura 11.** Imagen 3D cara 2 de SBG-C0-R1-ITS.

- Toma de imágenes 2D de SBG-C1-R1-ITS:

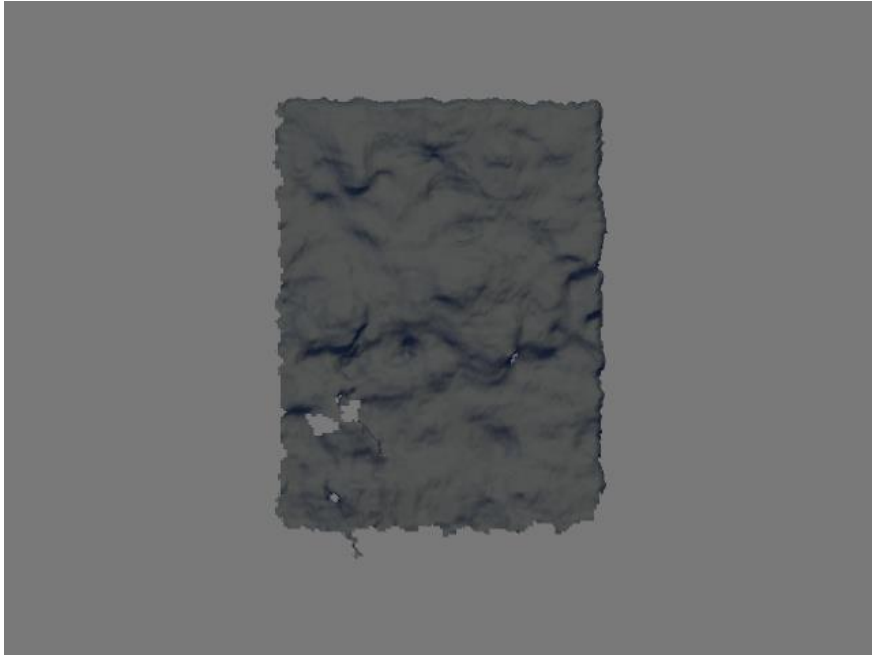


**Figura 12.** Probeta SBG-C1-R1-ITS vista frontal.

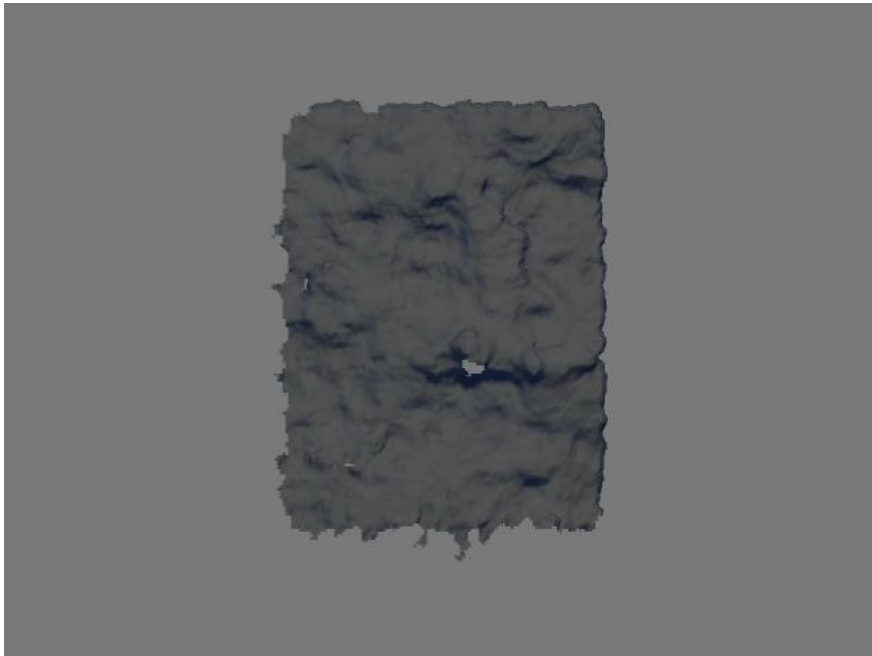


**Figura 13.** Probeta SBG-C1-R1-ITS vista superior.

- Toma de imágenes 3D de SBG-C1-R1-ITS:



**Figura 14.** Imagen 3D cara 1 de SBG-C1-R1-ITS.



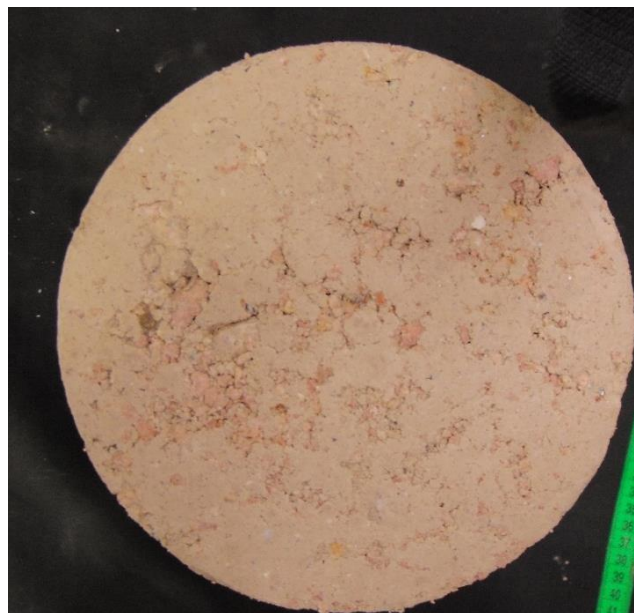
**Figura 15.** Imagen 3D cara 2 de SBG-C11-R1-ITS.

A continuación, se adjuntas las imágenes de las probetas de cada material, antes del ensayo de compresión inconfiada.

- Toma de imágenes 2D de MGM-9-R1-ITS:



**Figura 16.** Probeta MGM-9-R1-UCS vista frontal.



**Figura 17.** Probeta MGM-9-R1-UCS vista superior.

- Toma de imágenes 2D de MGM-10-R1-ITS:



**Figura 18.** Probeta MGM-10-R1-UCS vista frontal

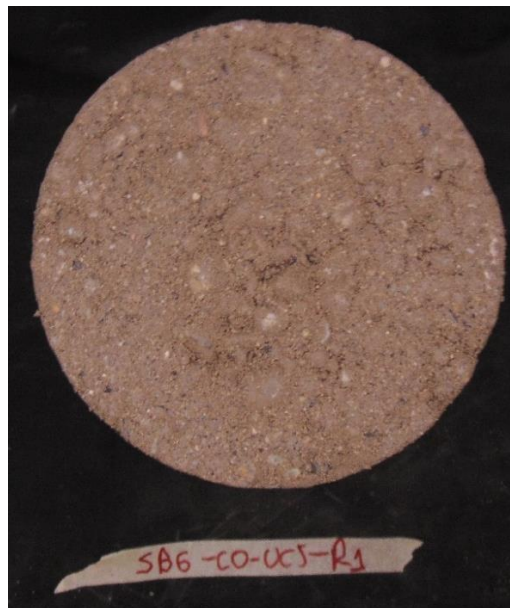


**Figura 19.** Probeta MGM-10-R1-UCS vista superior.

- Toma de imágenes 2D de SBG-C0-R1-UCS:



**Figura 20.** Probeta SBG-C0-R1-UCS vista frontal.

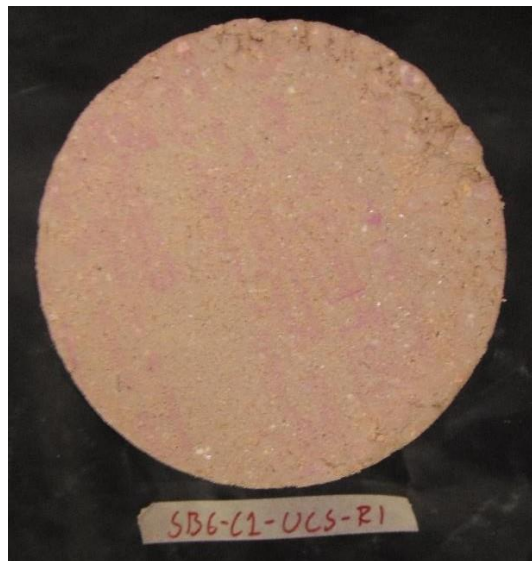


**Figura 21.** Probeta SBG-C0-R1-ITS vista superior.

- Toma de imágenes 2D de SBG-C1-R1-UCS:



**Figura 22.** Probeta SBG-C1-R1-ITS vista superior.



**Figura 23.** Probeta SBG-C1-R1-ITS vista superior.