

Evaluación de la resistencia de muestras compactadas de materiales granulares marginales de
subbase granular (mgm-5-6-7-8)

Yesit Mauricio Orduz Alvarado, Yorman Julian Torres Ramírez

Trabajo de Grado para optar por el Título de Ingeniero Civil

Director

Alex Eduardo Alvarez Lugo

Ph.D. Ingeniería Civil

Codirector

Vladimir Ernesto Merchan Jaimes

Ph.D. Ingeniería del Terreno Cartografía y Geofísica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento principalmente al padre de la vida Dios y a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo de tesis de grado en Ingeniería Civil. Especialmente a nuestras familias por su apoyo incondicional, a la escuela de ingeniería civil por brindarnos los espacios para el desarrollo experimental de la investigación y a los profesores Ing. Alex Eduardo Álvarez Lugo y al Ing. Vladimir Merchán Jaimes director y codirector de este proyecto respectivamente, por toda su dedicación, tiempo y apoyo.

Yesit Mauricio Orduz Alvarado y Yorman Julian Torres Ramírez

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| Introducción | 11 |
| 1 Objetivos..... | 13 |
| 1.1 Objetivo general | 13 |
| 1.2 Objetivo específico..... | 13 |
| 2 Marco Teórico | 14 |
| 2.1 Materiales granulares marginales..... | 14 |
| 2.2 Proyecto global MGM..... | 14 |
| 2.3 Ensayos de calidad | 15 |
| 2.3.1 Ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles..... | 15 |
| 2.3.2 Ensayo Micro-deval | 15 |
| 2.4 Método de compactación giratoria..... | 16 |
| 2.5 Locking Point | 17 |
| 2.6 Curvas de compactación..... | 17 |
| 2.7 Grado de saturación..... | 17 |
| 2.8 Ensayo triaxial dinámico..... | 20 |
| 2.9 Módulo resiliente..... | 20 |
| 2.10 Ensayo de compresión no confinada..... | 21 |
| 2.11 Ensayo de tracción indirecta | 22 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3 | Generalidades | 23 |
| 3.1 | Ubicación de la cantera | 23 |
| 3.2 | Granulometría..... | 23 |
| 3.3 | Diseño de probetas | 24 |
| 4 | Metodología..... | 25 |
| 4.1 | Evaluación de calidad..... | 25 |
| 4.1.1 | Desgaste en la máquina de los ángeles | 26 |
| 4.1.2 | Resistencia a la degradación por abrasión con el aparato Micro-deval | 26 |
| 4.2 | Desarrollo de protocolos | 28 |
| 4.3 | Compactación..... | 28 |
| 4.3.1 | Curvas de comparación..... | 28 |
| 4.3.2 | Energía de compactación | 28 |
| 4.4 | Construcción de probetas de desempeño | 29 |
| 4.5 | Ensayo triaxial dinámico y calculo del modulo resiliente..... | 29 |
| 4.6 | Ensayo de compresión no confinada..... | 30 |
| 4.7 | Ensayo de tracción indirecta | 30 |
| 4.8 | Toma de imágenes 2D y 3D..... | 31 |
| 5 | Resultados..... | 33 |
| 5.1 | Evaluación de calidad..... | 33 |
| 5.1.1 | Desgaste en la máquina de los ángeles | 33 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1.2 | Resistencia a la degradación por abrasión con el aparato Micro-deval | 33 |
| 5.2 | Compactación..... | 34 |
| 5.2.1 | Curvas de compactación | 34 |
| 5.2.2 | Energía de compactación | 35 |
| 5.3 | Modulo resiliente..... | 36 |
| 5.4 | Ensayo de compresión no confinada..... | 40 |
| 5.5 | Evaluación de la resistencia a la tracción indirecta..... | 42 |
| 6 | Conclusiones..... | 46 |
| 7 | Recomendaciones | 47 |
| | Referencias Bibliográficas | 48 |
| | Apéndices..... | 51 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Tipos de materiales granulares | 14 |
| Tabla 2 Resumen parámetros de diseño..... | 24 |
| Tabla 3 Granulometría para el ensayo con máquina de los ángeles | 26 |
| Tabla 4 Granulometría para el ensayo con aparato micro-deval | 27 |
| Tabla 5 Resultados ensayo máquina de los ángeles..... | 33 |
| Tabla 6 Resultados ensayo con aparato micro-deval | 33 |
| Tabla 7 Peso unitario seco y humedades óptimas..... | 35 |
| Tabla 8 Resumen de datos de probetas para ensayo triaxial dinámico..... | 36 |
| Tabla 9 Resumen datos probetas de desempeño para ensayo de compresión no confinada..... | 40 |
| Tabla 10 Resumen datos probetas de desempeño para el ensayo de tracción indirecta | 43 |

Lista figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 Compactador giratorio..... | 16 |
| Figura 2 Granulometría de trabajo | 23 |
| Figura 3 Proceso metodológico | 25 |
| Figura 4 Material extraído del aparato micro-deval, después del ensayo, junto con las esferas .. | 27 |
| Figura 5 Montaje probetas para ensayo triaxial dinámico | 29 |
| Figura 6 Montaje para ensayo de compresión no confinada..... | 30 |
| Figura 7 Montaje para ensayo de tracción indirecta | 31 |
| Figura 8 Curvas de compactación..... | 34 |
| Figura 9 Curvas densidad vs número de giros | 35 |
| Figura 10 Módulos resilientes para el MGM 5 y material de control..... | 37 |
| Figura 11 Módulos resilientes para el MGM 6 y material de control..... | 37 |
| Figura 12 Módulos resilientes para el MGM 7 y material de control..... | 38 |
| Figura 13 Módulos resilientes para el MGM 8 y material de control..... | 39 |
| Figura 14 Curvas carga vs desplazamiento de los materiales en estudio | 40 |
| Figura 15 Resistencia a la compresión no confinada..... | 41 |
| Figura 16 Graficas carga vs desplazamiento para el ensayo de tracción indirecta..... | 43 |
| Figura 17 Resistencia a la tracción indirecta. | 44 |

Lista de Apéndices

| | |
|---|----|
| Apéndice A. Protocolo para el armado de la maquina control multiloader | 51 |
| Apéndice B. Protocolo para la ejecución de ensayos de compresión inconfiada | 55 |
| Apéndice C. Imágenes 2D | 62 |
| Apéndice D. Imágenes 3D | 66 |

Resumen

Título: Evaluación de la resistencia de muestras compactadas de materiales granulares marginales de subbase granular (mgm-5-6-7-8)

Autor: Yesit Mauricio Orduz Alvarado, Yorman Julian Torres Ramírez

Palabras Clave: Material granular marginal, módulo resiliente, tracción indirecta, compresión no confinada, saturación, subbase granular, índice de plasticidad.

Descripción:

Se muestra el estudio de materiales granulares marginales codificados como 5,6,7 y 8 estos materiales fueron clasificados según su contenido de finos e índice de plasticidad, tiene como finalidad caracterizar estos materiales para evaluar el potencial que pueden tener al ser empleados para la construcción de subbases granulares en vías terciarias y así ayudar a mejorar los costos de construcción y mantenimiento de este tipo de vías. En primera instancia se realizó ensayos de calidad como el de desgaste en la máquina de los ángeles y el ensayo de desgaste micro-deval. A partir de estos se evidencia como este material no cumple con las especificaciones INVIAE en términos de desgaste para las subbases granulares. También se establecieron parámetros de energía, humedad óptima de compactación y peso unitario seco para la elaboración de probetas con el compactador giratorio utilizadas en los ensayos de compresión no confinada, tracción indirecta y triaxial dinámico. Se realizaron ensayos para medir la resistencia de los materiales a la compresión no confinada y tracción indirecta donde se aprecia que el material con un índice de plasticidad más alto presenta una resistencia a ensayos de carga estática similar a la resistencia del material de control, por último, se determina el módulo resiliente de cada material, con esto se pudo observar que el contenido de finos no genera grandes variaciones en los valores obtenidos de módulo resiliente y el índice de plasticidad genera mejores resultados para materiales con un valor intermedio que para materiales con índice de plasticidad alto o bajo.

*Trabajo de grado

**Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Alex Eduardo Alvarez Lugo Ph.D. Ingeniería civil. Codirector: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes Ph.D. Ingeniería Del Terreno Cartografía Y Geofísica.

Abstract

Title: Strength evaluation of compacted samples of marginal granular materials of granular subbase (mgm-5-6-7-8).

Author(s): Yesit Mauricio Orduz Alvarado, Yorman Julian Torres Ramírez

Key Words: Marginal granular material, resilient modulus, indirect tension, unconfined compression, saturation, granular subbase, plasticity index.

Description:

The study of marginal granular materials coded as 5,6,7 and 8 is shown. These materials were classified according to their fines content and plasticity index, with the purpose of characterizing these materials to evaluate the potential they may have when used for the construction of granular sub-bases in tertiary roads and thus help to improve the construction and maintenance costs of this type of roads. In the first instance, quality tests such as the wear test in the angels machine and the micro-deval wear test were carried out. From these tests, it is evident that this material does not comply with INVIAS specifications in terms of wear for granular sub-bases. Energy parameters, optimum compaction moisture and dry unit weight were also established for the preparation of specimens with the gyratory compactor used in the unconfined compression, indirect traction and dynamic triaxial tests. Tests were carried out to measure the resistance of the materials to unconfined compression and indirect traction, where it was observed that the material with a higher plasticity index presented a resistance to static load tests similar to the resistance of the control material. Finally, the resilient modulus of each material was determined, which showed that the fines content did not generate large variations in the values obtained for the resilient modulus and the plasticity index generated better results for materials with an intermediate value than for materials with a high or low plasticity index.

*Degree work

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

Introducción

La infraestructura vial es uno de los principales factores que ayudan a mejorar la economía y el desarrollo de un país. Uno de los grandes problemas que se tienen en Colombia es el atraso que se presenta en este ámbito, siendo las vías terciarias las más afectadas ya que se tienen aproximadamente 142000 kilómetros que constituyen que de cada 10 kilómetros de vías en el territorio nacional 7 sean de vías terciarias; además, en estas se evidencia una grave problemática ya que según el Departamento Nacional de Planeación la cuarta parte de este tipo de vías son vías destapadas que no cuentan con una capa de afirmado y más del 80% se encuentran en mal o regular estado. Además, la inversión que se tiene para este tipo de vías no es la suficiente para que se pueda realizar un adecuada construcción y mantenimiento ya que del PIB solo se destina alrededor del 0.03% para la adecuación de vías terciarias, cuando el Banco Mundial recomienda que la inversión sea mayor al 0.4% del PIB (Rubiños y Espinosa, 2022). Por estos y otros motivos es necesario buscar alternativas para mejorar las condiciones de las redes viales que comunican y llevan el desarrollo económico de los campesinos en el país, ya que generalmente estas vías son las que permiten que los campesinos puedan sacar los productos que cultivan y los puedan comercializar y el estado de las vías es lo que les determina en buena medida el costo del transporte de sus productos.

Para la construcción de vías en el país se tienen parámetros establecidos en cuanto a metodologías de diseño, construcción y a los materiales que se deben emplear para estas. En algunos sectores, estos materiales escasean y su valor es demasiado elevado debido a problemas de accesibilidad y costos de transporte ya que en muchas ocasiones no se encuentran materiales en la región que cumplan con las especificaciones requeridas para que puedan ser empleados.

Todas estas problemáticas sumadas hacen que se presente el déficit en vías terciarias que se explica anteriormente. Una alternativa de solución que puede ayudar a mejorar la calidad en estas vías es el uso de materiales granulados marginales. Según Blanco, (2016) estos materiales son denominados así debido a que no cumplen con algunas de las especificaciones, pero que podrían ser utilizados en vías con bajos niveles de tránsito siempre y cuando muestren resultados positivos cuando sean sometidos a estudios que determinen que podrían ser empleados y que sean mejoradas las propiedades en las que estén presentando falencias.

Para esto se realiza el estudio de materiales de este tipo, clasificados y denominados por su contenido de finos e índice de plasticidad, tomando como referencia el ensayo triaxial dinámico para la obtención del módulo resiliente de cada material, con el objetivo de observar su comportamiento dependiendo de la cantidad de finos o el índice de plasticidad que tengan, además también se evalúa la resistencia que presentan a la compresión no confinada y a la tracción indirecta observando el comportamiento mostrado mediante las curvas de carga-desplazamiento obtenidas con la ejecución de estos ensayos. También se realizaron ensayos de calidad con la finalidad de observar la degradación del material original extraído de cantera por medio de ensayos con la máquina de los ángeles y con el aparato micro-deval siguiendo las indicaciones de las normativas respectivas.

Todos los procedimientos mencionados anteriormente tienen el fin de aportar información valiosa a un proyecto global de investigación de los materiales granulados marginales, la cual permita comparar estos materiales con los tradicionales que cumplen con especificaciones y así determinar posteriormente si son aptos para ser usados en la construcción de vías o ver en qué aspectos muestran falencias para un posterior proceso de mejoramiento o acondicionamiento.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento mecánico de muestras compactados de materiales granulares marginales de subbase granular para vías de bajo volumen de tránsito (MGM 5-6-7-8) basándose en los ensayos de UCS en ITS.

1.2 Objetivo específico

Obtener curvas carga-desplazamiento para el ensayo de resistencia a la compresión no confinada (UCS) y el ensayo de tracción indirecta (ITS) de las muestras de desempeño evaluadas.

Establecer índices de desempeño para las muestras compactadas de los materiales granulares marginales en estudio basándose en las curvas carga-desplazamiento obtenidas.

Identificar la influencia que tienen las propiedades de los materiales granulares marginales en el comportamiento en términos de resistencia y de los índices de desempeño calculado.

2 Marco Teórico

2.1 Materiales granulares marginales

Los suelos se clasifican en cuatro grupos (seleccionados, adecuados, tolerables e inadecuados), el grupo de los suelos marginales está clasificado dentro de los suelos inadecuados (Rodríguez y Cáceres, 2021). Los materiales granulares marginales son aquellos que no cumplen con las especificaciones de calidad vigentes para la construcción de carreteras (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], 2013)., estos materiales pueden ser potencialmente utilizados en la construcción de vías terciarias o con bajos niveles de tránsito después de un estudio y análisis en laboratorio que permita señalar cuales son las propiedades que se deben mejorar.

2.2 Proyecto global MGM

En este proyecto se realiza el estudio de materiales granulares marginales con distintos índices de plasticidad y diferentes cantidades de finos. Además, se estudian dos subbases granulares denominadas SBG-C0 y SBG-C1 las cuales se construyen basándose en la SBG-38 y servirán como material de control para saber si los materiales granulares marginales en estudio muestran resultados satisfactorios para su uso en la construcción de subbases granulares. A continuación, se muestran los diferentes tipos de materiales granulares con sus índices de plasticidad y porcentajes finos (Tabla 1).

Tabla 1

Tipos de materiales granulares

| Material | % Finos | % IP | Gs |
|-----------------|--------------------|-------------|-----------|
| MGM 1 | 18 | 8 | 2.626 |
| MGM2 | 18 | 12 | 2.625 |

| | | | |
|---------------|----|----|-------|
| MGM 3 | 18 | 15 | 2.624 |
| MGM 4 | 21 | 8 | 2.628 |
| MGM 5 | 21 | 12 | 2.626 |
| MGM 6 | 21 | 15 | 2.626 |
| MGM 7 | 24 | 8 | 2.63 |
| MGM 8 | 24 | 12 | 2.628 |
| MGM 9 | 24 | 15 | 2.627 |
| MGM 10 | 19 | 11 | 2.628 |

2.3 Ensayos de calidad

2.3.1 *Ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles*

Es un procedimiento para determinar la resistencia a la degradación de agregados pétreos de tamaño menor a 37.5 mm utilizando la máquina de los ángeles. Para la ejecución de este ensayo se tuvo en cuenta los parámetros establecidos en la norma INV E 218-13 (INVIAS, 2013). La Ecuación 1 muestra el cálculo del porcentaje de pérdidas a partir de este ensayo.

Ecuación 1

Porcentaje de pérdidas para el ensayo de desgaste en máquinas de los ángeles

$$\% \text{ pérdidas} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

Donde:

P_1 : masa de la muestra seca antes del ensayo

P_2 : masa de la muestra seca después del ensayo, lavada sobre tamiz de 1.70 mm número 12

2.3.2 *Ensayo Micro-deval*

Este método se utiliza para medir la resistencia a la abrasión de los agregados gruesos por medio del aparato micro-deval; esto debido a que muchos materiales muestran más debilidad en estado húmedo que seco. Para realizar este ensayo se siguen las indicaciones de la norma INV E

238-13 (INVIAS, 2013). La Ecuación 2 muestra cómo se calcula el porcentaje de pérdidas para este método.

Ecuación 2

Porcentaje de pérdidas para el ensayo degradación aparato micro-deval

$$\% \text{ pérdidas} = \frac{A - B}{A} \times 100$$

Donde:

A: masa de la muestra seca antes del ensayo

B: masa de la muestra seca después del ensayo, retenida en el tamiz de 1.18 mm (No 16)

2.4 Método de compactación giratoria

Consiste en la aplicación de acciones simultáneas de presión vertical y acción giratoria, con un ángulo de inclinación con respecto a la vertical; de esta forma se asemeja los procesos constructivos de compactación en obras (Camacho et al., 2007). La Figura 1 se muestra el compactador giratorio utilizado para la producción de probetas de desempeño para los estudios que abarcan esta investigación. Este equipo se encuentra ubicado en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 1

Compactador giratorio



2.5 Locking Point

Esta metodología fue desarrollada por el Departamento de Carreteras de Illinois en Estados Unidos y fue una alternativa para evitar la sobre compactación utilizando el método de compactación giratoria (Nascimento, 2008).

En tal sentido Vavrik y Carpenter (1998), la definen como el primer giro en el compactador giratorio de una secuencia de 3 giros con la misma altura siempre y cuando sean precedidos por 2 giros con la misma altura.

Para la fabricación de las probetas de desempeño para los ensayos de esta investigación se utilizó esta metodología para la obtención de humedades óptimas y pesos unitarios secos para realizar las curvas de compactación de cada material.

2.6 Curvas de compactación

La curva de compactación de un material se obtiene a partir de pruebas de compactación al mismo material variando la humedad, con esto se obtienen valores de peso unitario seco para cada prueba. Luego se grafican todos los datos para cada compactación realizada y se puede observar y extraer el punto donde el peso unitario seco es máximo al que corresponde la humedad óptima (Chirinos, 2016).

2.7 Grado de saturación

Los suelos pueden encontrarse en un estado saturado en un sistema de partículas sólidas y agua, como también pueden presentarse en un estado seco donde se encontrarán partículas sólidas y aire. Además, existe un estado intermedio que es cuando el suelo está parcialmente saturado; en este caso existen las tres fases interactuando entre sí, las partículas sólidas, agua y aire (Meza,

2012). El procedimiento para el cálculo del grado de saturación de cada material se describe con las ecuaciones Ecuación 3, Ecuación 4, Ecuación 5, Ecuación 6, Ecuación 7, Ecuación 8, Ecuación 9.

Ecuación 3

Densidad máxima seca

$$\rho_{\text{máxima seca}} = \frac{m_s}{V_T}$$

Donde:

$\rho_{\text{máxima seca}}$: Densidad máxima seca

m_s : Masa de los sólidos

V_T : Volumen total

Ecuación 4

Masa del agua

$$m_w = m_s * \omega$$

Donde:

m_w : Masa del agua

m_s : Masa de los sólidos

ω : Contenido de humedad

Ecuación 5

Relación de vacíos

$$e = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_T} \right) * (\omega + 1) - 1$$

Donde:

e: Relación de vacíos

γ_s : Peso unitario seco

γ_T : Peso unitario total

Ecuación 6

Peso unitario de los solidos

$$\gamma_s = \gamma_w * G_s$$

Ecuación 7

Peso unitario total

$$\gamma_T = \frac{m_T}{V_T}$$

Donde:

γ_w : Peso unitario del agua

G_s : Gravedad específica de los sólidos.

m_T : Masa total.

Ecuación 8

Masa de la mezcla húmeda

$$m_T = m_s * m_w$$

Ecuación 9

Grado de saturación

$$S_r = \frac{\omega * G_s}{e}$$

Donde:

S_r : Grado de saturación

2.8 Ensayo triaxial dinámico

Consiste en la aplicación de cargas dinámicas a un espécimen cilíndrico de suelo que es recubierto con una membrana de látex en una recámara con control de las presiones, efectuando mediciones sobre sus características mecánicas de forma completa (Salas, 2011).

2.9 Módulo resiliente

El módulo resiliente es la medida con la que un material absorbe energía sin sufrir deformaciones permanentes. Este se obtiene mediante la aplicación de un ensayo triaxial dinámico de carga repetida; en otras palabras, es la relación entre un esfuerzo desviador y la deformación axial recuperable (Herrera, 2014). El módulo resiliente se calcula mediante Ecuación 10.

Ecuación 10

Cálculo de modulo resiliente

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Donde:

Mr: módulo resiliente.

σ_d : esfuerzo desviador.

ϵ_r : deformación unitaria recuperable.

2.10 Ensayo de compresión no confinada

Este ensayo se realiza siguiendo las indicaciones establecidas en la norma INV E-152-13. Para esto se aplica una carga axial a una muestra de suelo no confinada con control de deformación. La resistencia a la compresión no confinada se toma como el esfuerzo calculado cuando se alcanza la carga máxima por unidad de área del ensayo. La velocidad de aplicación de carga del ensayo debe ser de tal forma que genere una deformación axial entre el 0.5 y el 2.5% de la longitud de la probeta por minuto (INVIAS, 2013). El esfuerzo compresivo generado por cada carga registrada se calcula según la Ecuación 11.

Ecuación 11

Esfuerzo compresivo

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

Donde:

P: Carga aplicada

A: área media correspondiente de la sección transversal

2.11 Ensayo de tracción indirecta

En este procedimiento se aplica una carga de compresión diametral a las probetas cilíndricas, generando un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga. El parámetro para calcular el esfuerzo máximo del ensayo es la carga de rotura o máxima experimentada en el procedimiento (Sociedad Estadounidense para pruebas y materiales [ASTM], 2019)., se calcula mediante la Ecuación 12.

Ecuación 12

Resistencia a la tracción indirecta

$$RTI = \frac{2 P_{\max}}{\pi t D}$$

Donde:

RTI: resistencia a la tracción indirecta [N/mm²].

P_{max}: carga máxima [N].

t: altura del espécimen [mm].

D: diámetro del espécimen [mm].

3 Generalidades

3.1 Ubicación de la cantera

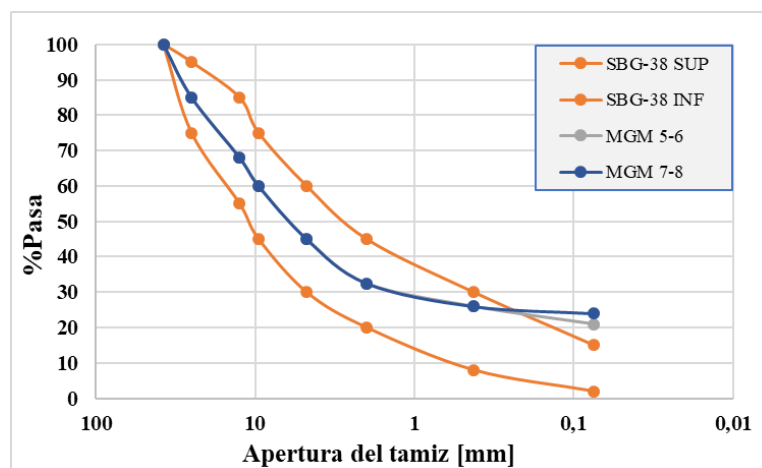
El material de cantera para la fabricación de los materiales mostrados en la tabla 1 fue extraído de la cantera propiedad de Pavimentos Andinos (PAVIANDI) ubicada en el municipio de Piedecuesta.

3.2 Granulometría

Todos los materiales que se estudian en el proyecto de investigación están definidos por la misma franja granulométrica, con un 21% de fracción fina para los materiales MGM 5 y 6 y 24% para los MGM 7 y 8. Esta granulometría se establece a partir de las especificaciones (INVIAS, 2013). El material de referencia utilizado fue la SBG-38 y se muestra la comparación de los materiales en estudio con el material de control (Figura 2).

Figura 2

Granulometría de trabajo



3.3 Diseño de probetas

El punto de partida es la curva de compactación de cada material; con esta se define el peso unitario seco y el contenido de humedad de las probetas de desempeño, además con los datos anteriores y el volumen del molde de compactación se puede conocer la masa para la probeta.

En la Tabla 2 se resumen los datos teóricos de cada material para la fabricación de probetas de desempeño. Para la preparación de cada probeta se agregaron 800 gramos de masa de sólidos con su respectiva masa de agua, para extraerlos antes de compactar con el fin de realizar mediciones de la humedad real que tendrá cada probeta.

Tabla 2

Resumen parámetros de diseño

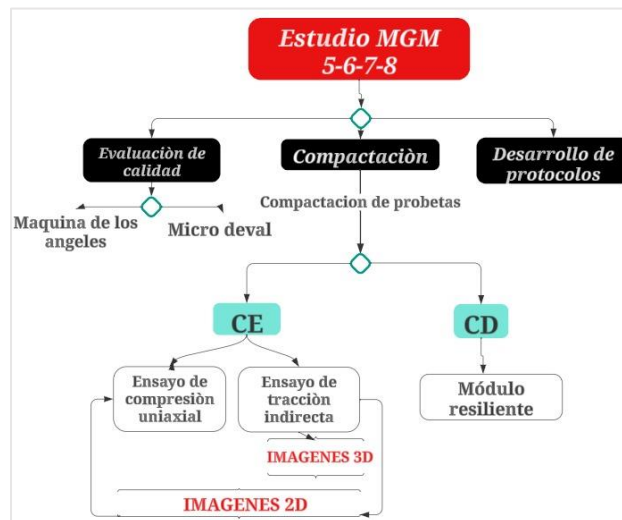
| Material | Peso unitario [kN/m³] | Humedad Optima [%] | Masa teórica Probeta [g] | Grado de saturación teórico [%] |
|-----------------|---|-------------------------------|-------------------------------------|--|
| MGM 5 | 19.61 | 12.20 | 7766 | 95 |
| MGM 6 | 19.51 | 11.80 | 7709 | 90 |
| MGM 7 | 19.72 | 12.30 | 7823 | 98 |
| MGM 8 | 19.58 | 12.30 | 7771 | 95 |

4 Metodología

Para el desarrollo del proyecto de investigación descrito en el presente documento se planteó la metodología mostrada en la Figura 3 los aspectos más importantes se describen a continuación:

Figura 3

Proceso metodológico



Donde:

CE: evaluación mediante ensayos de carga estática

CD: evaluación con ensayos de carga dinámica

4.1 Evaluación de calidad

Con el fin de medir la calidad de los materiales en estudio se propone la ejecución de ensayos de calidad que permitan mostrar el desgaste y las pérdidas por abrasión observando el comportamiento tanto en estado seco como en estado húmedo saturado. Estos ensayos se

realizaron con material original de la cantera, extrayendo muestras del material y reduciéndolas según las normas INV E 201-13, INV E 202-13 (INVIAS, 2013).

4.1.1 *Desgaste en la máquina de los ángeles*

Teniendo en cuenta los requerimientos de la norma INV E 218-13 [5] se determinó el tipo de granulometría que más se asemeja a la de los materiales para realizar el ensayo que en este caso es la granulometría tipo A. La granulometría utilizada para el ensayo se muestra en la (Tabla 3)

Tabla 3

Granulometría para el ensayo con máquina de los ángeles

| Tamaños de tamiz | | Masas de las diferentes fracciones, g | | | |
|------------------|-------------------|---------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Pasa tamiz | Retenido en tamiz | Granulometrías | | | |
| | | A | B | C | D |
| 37.5 (1 1/2") | 25.0 (1") | | | | |
| 25.0 (1") | 19.0 (3/4") | | | | |
| 19.0 (3/4") | 12.5 (1/2") | 1250 ± 25 | | | |
| 12.5 (1/2") | 9.5 (3/8") | 1250 ± 25 | | | |
| 9.5 (3/8") | 6.3 (1/4") | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | | |
| 6.3 (1/4") | 4.75 (N° 4) | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | 2500 ± 10 | |
| 4.75 (N° 4) | 2.36 (N° 5) | | | 2500 ± 10 | 5000 ± 10 |
| Total | | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 |

Nota. Adaptado de (INVIAS, 2013).

A partir de esto se realizaron tres réplicas del ensayo para así determinar un promedio de desgaste o porcentaje de pérdidas.

4.1.2 *Resistencia a la degradación por abrasión con el aparato Micro-deval*

Con base en las disposiciones de la norma INV E 238-13 (INVIAS, 2013) se escogió la granulometría para el ensayo y la preparación de la muestra. Teniendo en cuenta el tamaño máximo

nominal del material original de cantera, a continuación, se muestra la granulometría utilizada para el ensayo (Tabla 4)

Tabla 4

Granulometría para el ensayo con aparato micro-deval

| Pasa tamiz | Retenido en tamiz | Masa |
|-------------------|--------------------------|-------------|
| 19,0 mm | 16.0 mm | 375 g |
| 16,0 mm | 12.5 mm | 375 g |
| 12,5 mm | 9.5 mm | 375 g |

Nota. Adaptado de (INVIAS, 2013).

Para la ejecución de este ensayo se utilizó el aparato micro-deval, en el cual se realizaron tres replicas para obtener varios datos de porcentaje de pérdidas. En la Figura 4 se presenta el material resultado del ensayo junto con las esferas.

Figura 4

Material extraído del aparato micro-deval, después del ensayo, junto con las esferas



4.2 Desarrollo de protocolos

En los distintos procesos implicados en el desarrollo de esta investigación se consideró necesario la redacción de protocolos que sirvieran como guía para ejecutar cada proceso con precisión siguiendo las indicaciones de las normas correspondientes. Estos protocolos forman parte del material de apoyo para el proyecto global de investigación MGM. También fueron modificados y adecuados algunos protocolos previos como el protocolo de preparación de muestras y ensayo de compactación giratoria para la generación de curvas de compactación por Martínez y Vargas (2022)., Protocolo para toma de imágenes 2D y 3D por Garzón y Sánchez, (2022)., Protocolo para ejecución de ensayo de tracción indirecta por Cetina y Jaimes (2022). Los protocolos diseñados quedan como material de apoyo para el proyecto global MGM.

4.3 Compactación

4.3.1 Curvas de comparación

Las curvas de compactación se realizaron teniendo en cuenta la metodología locking point realizando varias réplicas de cada material a diferentes humedades y compactándolas con el compactador giratorio hasta obtener la densidad máxima y la humedad óptima de compactación.

4.3.2 Energía de compactación

Para definir la energía con la que se deben compactar las probetas de desempeño se realizó una campaña de compactación de probetas a una humedad óptima y a una energía de 220 giros de compactación.

4.4 Construcción de probetas de desempeño

Para obtener una probeta de desempeño apta para someterla a los ensayos que se realizaron en esta investigación se tienen que realizar procesos previos de tamizado, secado, mezclado y compactación definidos por Martínez y Vargas (2022)., teniendo en cuenta la energía de compactación de 130 giros en el compactador giratorio. Una vez compactada la probeta se realiza un proceso de medición de masas, diámetros y alturas para revisar el grado de saturación real y la variación con respecto al diseño teórico.

4.5 Ensayo triaxial dinámico y cálculo del módulo resiliente

Para el desarrollo de este ensayo se aplicó la metodología descrita en la norma (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales [AASHTO], 2007). Para esto se prepararon las probetas de desempeño de cada material y se realizó el ensayo en un estado del material denominado recién compactado; este estado consiste en dejar reposar una hora la probeta antes de iniciar el montaje del ensayo. Para cada material se realizaron 3 réplicas para observar si había variaciones entre ellas por algún factor o variable. En la Figura 5 se muestra una de las probetas sometidas a estudio en el proceso de montaje.

Figura 5

Montaje probetas para ensayo triaxial dinámico



4.6 Ensayo de compresión no confinada

Siguiendo la indicación de la norma INV E 152-13 (INVIAS, 2013). Además, los protocolos de uso y montaje de la maquina mostrados en los Apéndice A y Apéndice B del presente documento, se obtuvieron los datos necesarios para generar las curvas carga-desplazamiento de los materiales en estudio. Para las probetas generadas se tiene una longitud de 200 milímetros se seleccionó una velocidad intermedia entre los valores especificados por la norma, la cual generara un 1.5% de deformación axial, por lo tanto, la velocidad de aplicación de ensayo de compresión no confinada para los materiales marginales de este proyecto es de 3 milímetros por minuto. La figura 6 presenta el montaje la probeta de desempeño del material denominado MGM 6.

Figura 6

Montaje para ensayo de compresión no confinada



4.7 Ensayo de tracción indirecta

Para este procedimiento se adaptó un cabezal transmisor de carga con las medidas adecuadas que garantizaba la aplicación de carga en toda la longitud diametral de las probetas de desempeño. Además, utilizando una prensa de carga estática con control de desplazamiento, la velocidad de

aplicación de carga se estandarizó en 3 milímetros por minuto. Esta modificación fue necesaria debido a que la metodología descrita por la norma ASTM D8225-19 (ASTM, 2019) está enfocada para muestras de concreto asfáltico y no en muestras de suelos. Además, al utilizar esta velocidad de aplicación de carga se pretende comparar el comportamiento de cada material marginal en las curvas de carga y desplazamiento de este ensayo con respecto al de compresión no confinada. En la Figura 7 se muestra la probeta del MGM para realizar el ensayo.

Figura 7

Montaje para ensayo de tracción indirecta



4.8 Toma de imágenes 2D y 3D

Para tener registro de las características físicas de los materiales estudiados es importante la toma de fotos antes y después de la aplicación de cada ensayo de carga estática, estos registros fueron elaborados según el protocolo de toma de imágenes 2D y 3D (Garzón y Sánchez, 2022).

Las imágenes 2D fueron realizadas con una cámara de 20.1 megapíxeles antes de los ensayos de compresión no confinada y tracción indirecta con las que se pretendía mostrar la

superficie frontal y superior de las probetas, para apreciar características propias de cada ejemplar tales como imperfecciones, colores o rasgos.

Para el caso de las imágenes 3D fueron realizadas por medio de un Kinect Xbox 360 controlado por el software SDK versión 1.8. Estas se tomaron después del ensayo de tracción indirecta ya que a partir de este se obtiene una división de la probeta en dos partes, con estas imágenes se puede observar la superficie de falla o de rotura de cada material.

5 Resultados

5.1 Evaluación de calidad

5.1.1 Desgaste en la máquina de los ángeles

A continuación se muestran los datos y resultados de los ensayos realizados (Tabla 5).

Tabla 5

Resultados ensayo máquina de los ángeles

| Ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles | | |
|--|-----------|---------|
| Ensayo 1 | P1 (g) | 5004 |
| | P2 (g) | 1465 |
| | %Perdidas | 70,723% |
| Ensayo 2 | P1 (g) | 5027 |
| | P2 (g) | 1556 |
| | %Perdidas | 69,047% |
| Ensayo 3 | P1 (g) | 5007 |
| | P2 (g) | 1591 |
| | %Perdidas | 68,224% |

En todas las réplicas realizadas se puede evidenciar que los resultados obtenidos superan el 50% de pérdidas que es el valor máximo permitido en los requisitos de INVIAS, siendo este el factor fundamental para caracterizar este tipo de material como marginal (INVIAS, 2013).

5.1.2 Resistencia a la degradación por abrasión con el aparato Micro-deval

Tabla 6

Resultados ensayo con aparato micro-deval

| Ensayo de desgaste micro-deval | | |
|---------------------------------------|---|--------|
| Ensayo 1 | A | 1504,5 |

| | | |
|-----------------|-----------|---------|
| | B | 608,6 |
| | %Desgaste | 59,548% |
| Ensayo 2 | A | 1499,9 |
| | B | 547,8 |
| | %Desgaste | 63,478% |
| Ensayo 3 | A | 1501,5 |
| | B | 593,7 |
| | %Desgaste | 60,460% |

Con los datos mostrados en la Tabla 6 se observa que el porcentaje de desgaste para este tipo de ensayo tampoco satisface los requerimientos de las normas INVIAS ya que todos los resultados obtenidos superan el valor máximo de desgaste permitido de 35% (INVIAS, 2013).

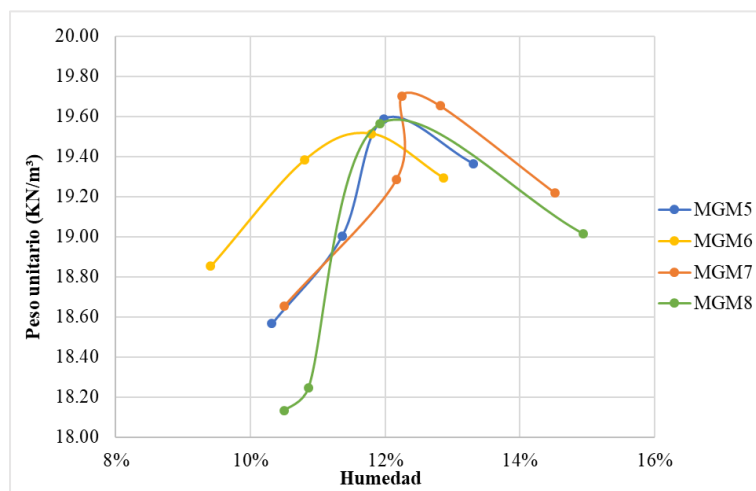
5.2 Compactación

5.2.1 Curvas de compactación

Las curvas de compactación para los cuatro materiales en estudio obtenidas mediante la metodología locking point se muestran (Figura 8).

Figura 8

Curvas de compactación



Con estas curvas se obtuvo los valores de humedad óptima y peso unitario seco (Tabla 7).

Tabla 7

Peso unitario seco y humedades óptimas

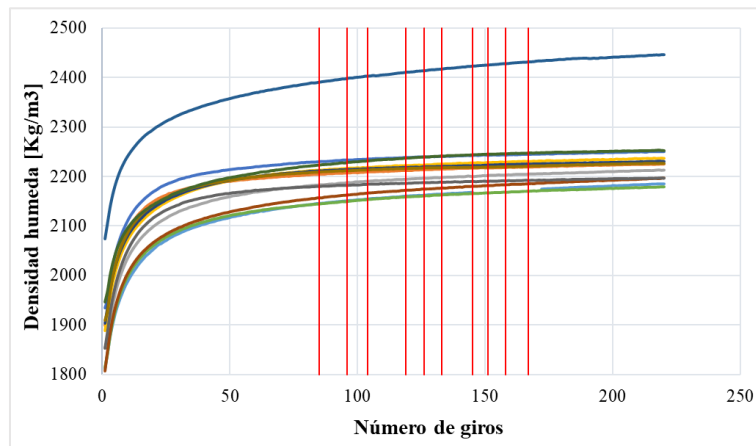
| Material | Peso unitario [kN/m ³] | Humedad Óptima [%] |
|--------------|---------------------------------------|-----------------------|
| MGM 5 | 19.61 | 12.20 |
| MGM 6 | 19.51 | 11.80 |
| MGM 7 | 19.72 | 12.30 |
| MGM 8 | 19.58 | 12.30 |

5.2.2 Energía de compactación

En la figura 9 se muestran las curvas de densidad y número de giros obtenidos a partir la compactación de probetas de desempeño a 220 giros y el punto en el cual se encontró el locking point para cada una.

Figura 9

Curvas densidad vs número de giros



A partir de la Figura 9 se logró establecer que el promedio al cual los materiales en estudio alcanzan el locking point es a 130 giros. Por lo tanto, se estandariza este número de giros como la energía a la cual se realizará la compactación de probetas de desempeño para los materiales granulares marginales.

5.3 Modulo resiliente

En la tabla 8 se presentan los datos de las réplicas de cada probeta de desempeño con las que se realizó el ensayo triaxial dinámico para el cálculo de módulo resiliente.

Tabla 8

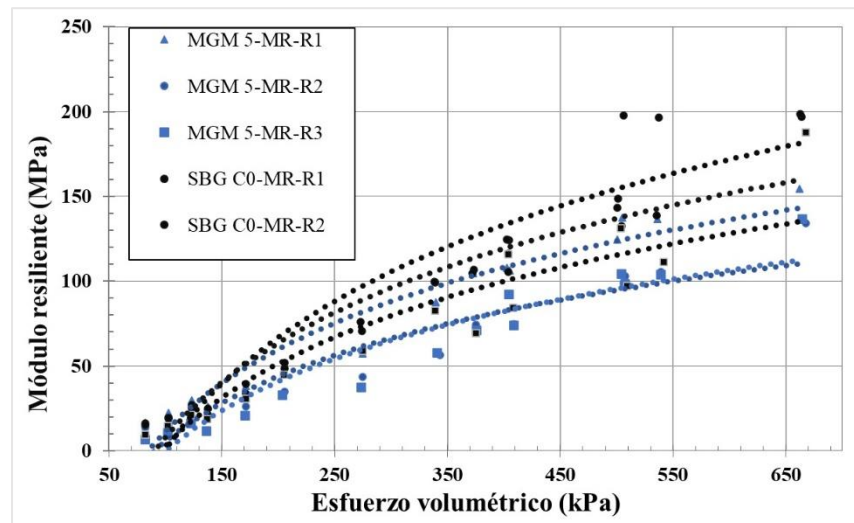
Resumen de datos de probetas para ensayo triaxial dinámico

| Material | Humedad [%] | Peso unitario [kN/m³] | Masa [g] | Grado de Saturación [%] |
|-----------------|--------------------|---|-----------------|--------------------------------|
| MGM 5 R1 | 12.36 | 19.164 | 7854 | 99.95 |
| MGM 5 R2 | 12.46 | 19.412 | 7751 | 90.76 |
| MGM 5 R3 | 12.57 | 19.589 | 7853 | 96.75 |
| MGM 6 R1 | 11.91 | 19.286 | 7687 | 86.63 |
| MGM 6 R2 | 12.00 | 19.582 | 7690 | 90.30 |
| MGM 6 R3 | 11.34 | 19.400 | 7780 | 84.49 |
| MGM 7 R1 | 12.50 | 19.674 | 7791 | 96.09 |
| MGM 7 R2 | 12.50 | 19.719 | 7787 | 96.02 |
| MGM 7 R3 | 12.54 | 19.711 | 7796 | 97.99 |
| MGM 8 R1 | 12.47 | 19.226 | 7748 | 85.89 |
| MGM 8 R2 | 12.61 | 19.068 | 7748 | 86.79 |
| MGM8 R3 | 12.47 | 19.271 | 7756 | 87.33 |

Con las probetas de desempeño compactadas y los datos mostrados anteriormente se determinaron los módulos resilientes que se muestran a continuación. Además, se muestran los módulos resilientes para el material de control SBG-38 (SBG-C0) desarrollados por Anaya y Rodríguez, (2024).

Figura 10

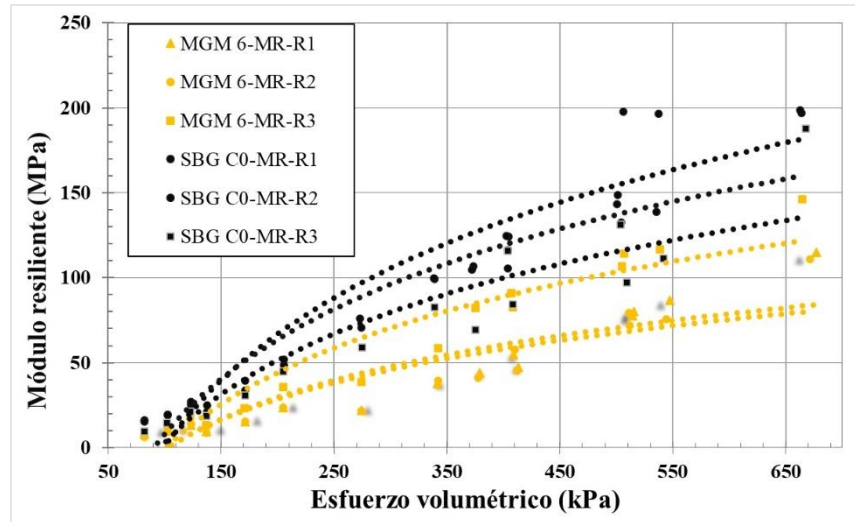
Módulos resilientes para el MGM 5 y material de control



Como se puede observar en la Figura 10 en general los resultados sugieren que la respuesta del material de control es mayor al MGM 5, observándose mayor diferencia de comportamiento a mayor esfuerzo volumétrico. Sin embargo, este material presenta los mejores resultados de los materiales estudiados, ya que el promedio de módulos resilientes muestra una diferencia menor en 22% al material de control y para los demás materiales se observan diferencias menores de más del 38%. Por otra parte, llama la atención la réplica 1 que muestra el mejor comportamiento del módulo resiliente, separándose de las otras réplicas a pesar de contar con el grado de saturación más alto y el peso unitario seco más bajo.

Figura 11

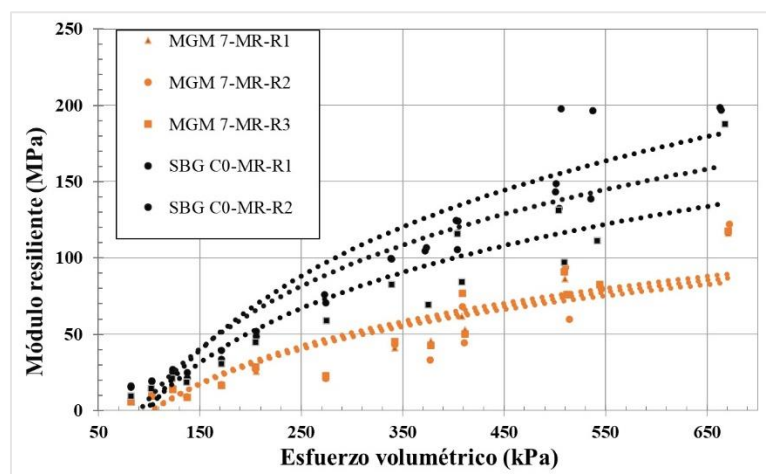
Módulos resilientes para el MGM 6 y material de control



En la réplica 3 del MGM 6, al igual que en el caso del MGM 5, también se obtuvo un valor mayor de módulo resiliente al de las demás réplicas del mismo material. Para este caso se obtuvo una humedad menor a la de diseño y a las réplicas 1 y 2 (Tabla 2). Según Rojas (2014), para materiales granulares cuando la humedad es más baja el resultado del módulo resiliente tiende a ser mayor al de un mismo material con un contenido de humedad más alto.

Figura 12

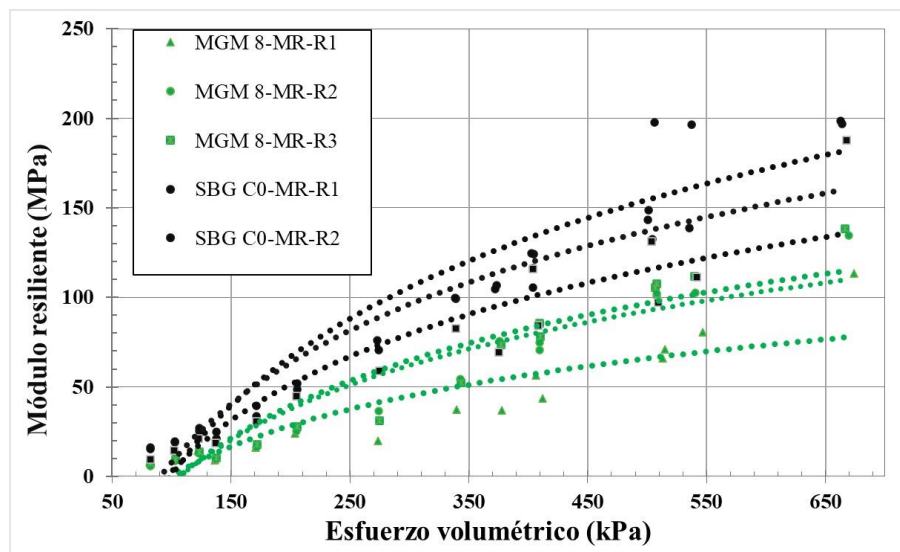
Módulos resilientes para el MGM 7 y material de control



Respecto a los resultados del MGM7, se observa baja dispersión en los resultados en las réplicas; nuevamente los resultados del material de control son mayores a los del material marginal.

Figura 13

Módulos resilientes para el MGM 8 y material de control



En las figuras anteriores se puede observar que los módulos obtenidos para los materiales en estudio son menores a los del material de control SBG-38 (SBG-C0). Además, se puede apreciar que el material con el índice de plasticidad más bajo MGM 7 (Tabla 1) presenta un módulo resiliente más bajo que los demás materiales que tienen un índice de plasticidad más alto.

Por otro lado, el MGM 6 también muestra valores bajos de módulo resiliente, siendo este el material con el índice de plasticidad más alto de los cuatro materiales en estudio. Estos resultados sugieren que para este tipo de materiales un índice de plasticidad muy bajo o alto no influyen positivamente en el desempeño de este. Además, con los resultados de los materiales MGM 5 y MGM 8 que son los que presentan los valores de módulo resiliente más altos se sugiere

que un índice de plasticidad intermedio (12%) puede generar mayores resultados de módulo resiliente.

Al comparar el promedio de los módulos resilientes de cada material en estudio con el promedio de los módulos resilientes del material de control se puede apreciar como todos los materiales presentan valores de modulo resiliente que son menores en más del 20% que el material de control, siendo el MGM 7 el material con el promedio más alejado (47%), apoyando las observaciones planteadas con anterioridad a partir de Figura 12 y Figura 13

5.4 Ensayo de compresión no confinada

Para este ensayo se encontraron resultados de carga y desplazamiento (Figura 14). Los datos de las probetas de desempeño que se realizaron para este ensayo se describen (Tabla 9).

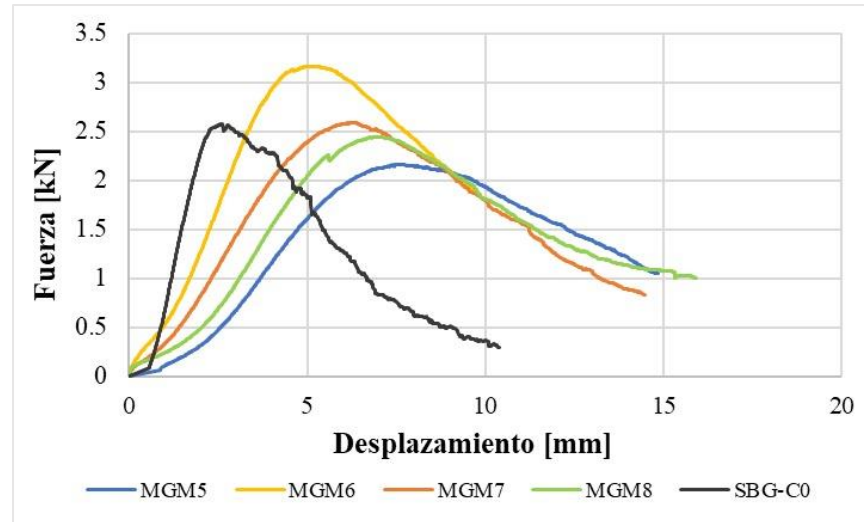
Tabla 9

Resumen datos probetas de desempeño para ensayo de compresión no confinada

| Material | Humedad [%] | Peso unitario [kN/m³] | Área [mm²] | Masa [g] |
|-----------------|--------------------|---|------------------------------|-----------------|
| MGM 5 | 12.24 | 19.521 | 17803.14 | 7747 |
| MGM 6 | 11.92 | 19.523 | 17743.20 | 7689 |
| MGM 7 | 12.33 | 19.703 | 17748.51 | 7791 |
| MGM 8 | 12.60 | 19.367 | 17712.52 | 7747 |

Figura 14

Curvas carga vs desplazamiento de los materiales en estudio



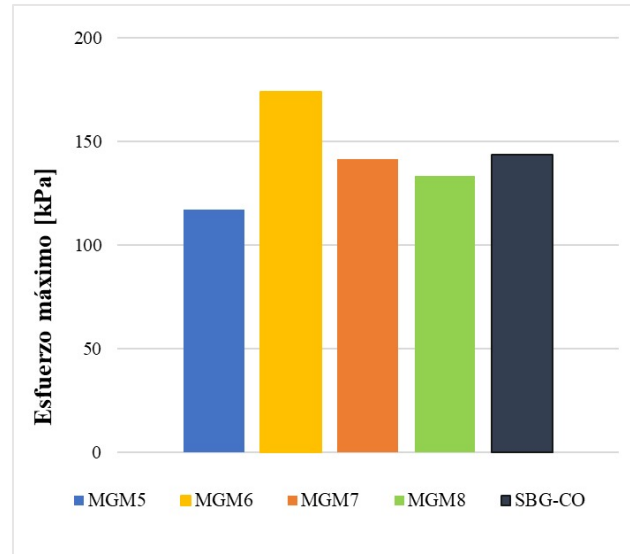
Con los resultados obtenidos se puede apreciar como el MGM6 que es el material con el índice de plasticidad más alto de los cuatro materiales es el que soporta más carga antes de llegar a la rotura, y como los MGM 5 y 8 que son los que tienen un índice de plasticidad intermedio (12%) son los que menos resistencia presentan al soportar una carga menor antes de fallar que los demás materiales.

Llama la atención que MGM 5 que es la probeta con menor contenido de finos e índice de plasticidad intermedio presente el menor UCS, lo cual sugiere que aún no se puede establecer una tendencia clara de la influencia del contenido de finos y el índice de plasticidad en el resultado del esfuerzo máximo de compresión.

En la Figura 15 se muestran los esfuerzos máximos que soportó cada material en el ensayo de compresión no confinada y esfuerzo máximo presentado en el material de control SBG-38 (SBG-C0).

Figura 15

Resistencia a la compresión no confinada



Los resultados sugieren que el MGM 6 es el material que presenta una mayor resistencia y cuya característica principal que puede influir en este resultado es su índice de plasticidad mayor al de los demás materiales. Además, el MGM 7 también presenta una resistencia mayor al de los otros dos materiales teniendo un índice de plasticidad menor, sugiriendo que un índice de plasticidad intermedio genera una menor resistencia en esta clase de materiales.

Al comparar los resultados obtenidos con el material de control SBG-38 (SBG-C0) se puede apreciar como los materiales granules marginales en estudio presentan valores similares e incluso el MGM 6 logra tener una resistencia mayor al material de control. Para los materiales probados, los resultados del ensayo de compresión no confinada sugieren que no hay una influencia significativa del contenido de finos o del índice de plasticidad afectando la resistencia a la compresión no confinada.

5.5 Evaluación de la resistencia a la tracción indirecta

Para este estudio se generaron las probetas de desempeño las cuales presentan las características (Tabla 10)

Tabla 10

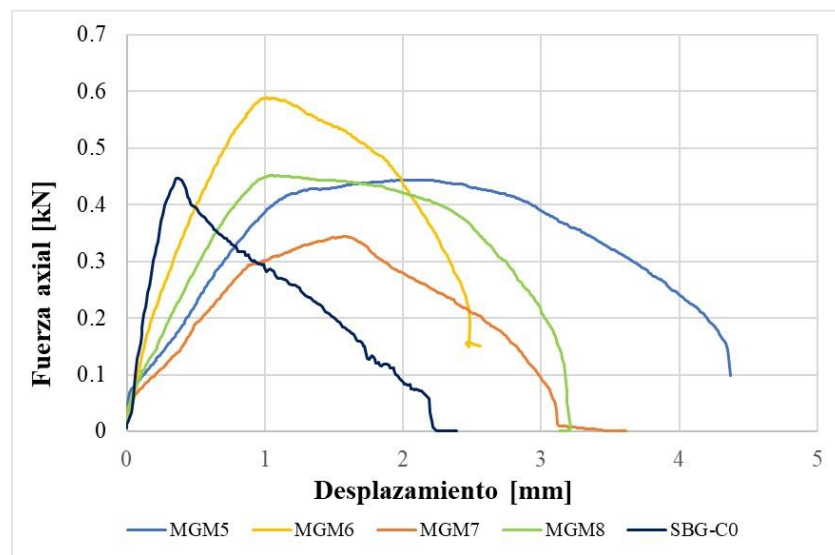
Resumen datos probetas de desempeño para el ensayo de tracción indirecta

| Material | Humedad [%] | Peso unitario [kN/m ³] | Altura [mm] | Diámetro [mm] | Masa [g] |
|----------|-------------|------------------------------------|-------------|---------------|----------|
| MGM 5 | 12.19 | 19.524 | 201.76 | 150.045 | 7765 |
| MGM 6 | 12.00 | 19.333 | 201.28 | 150.08 | 7708 |
| MGM 7 | 12.48 | 19.746 | 200.57 | 149.71 | 7792 |
| MGM 8 | 12.60 | 19.320 | 202.34 | 150.02 | 7753 |

Con los materiales con las condiciones mostradas anteriormente se obtuvieron los resultados para el ensayo de tracción indirecta (Figura 16).

Figura 16

Graficas carga vs desplazamiento para el ensayo de tracción indirecta



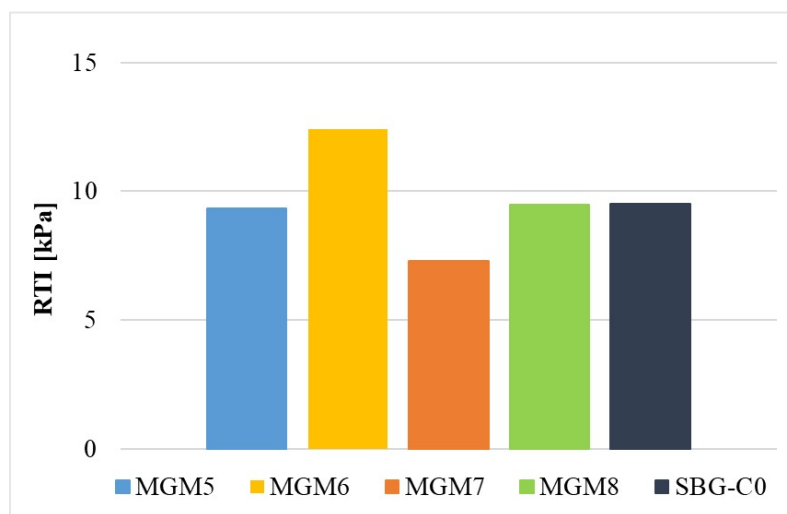
Con los resultados obtenidos se observa una relación directamente proporcional entre el índice de plasticidad y la carga que soporta cada material antes de la falla, ya que entre MGM 5 y

MGM 6 y entre MGM 7 y MGM 8, se observa que a mayor índice de plasticidad se incrementa la resistencia a la tracción indirecta.

Además, para también analizar la influencia que puede tener el contenido de finos en la resistencia a la tracción indirecta se calculó la resistencia máxima a la tracción indirecta según la Ecuación 12 y se representa en la (Figura 17).

Figura 17

Resistencia a la tracción indirecta.



A partir de la resistencia máxima a la tracción indirecta se observan pequeñas variaciones en los materiales MGM 5 y MGM 8 que tienen el mismo índice de plasticidad, pero distinto contenido de finos, mostrando que para un mismo índice de plasticidad a mayor contenido de finos la RTI no muestra diferencias importantes.

Al comparar la resistencia a la tracción indirecta de los materiales en estudio y el material de control (SBG-C0) los resultados sugieren valores similares a la resistencia máxima de tracción indirecta del material de control.

6 Conclusiones

La evaluación de calidad corrobora el estado de marginalidad del material estudiado, tanto en estado seco como en estado saturado, debido a que los porcentajes de desgaste mostrados son ampliamente superiores a las especificaciones establecidas en el artículo 320-13 INVIAS tanto para el ensayo de la máquina de los ángeles como para el ensayo con el aparato micro-deval.

Al comparar los materiales en el estudio de módulo resiliente en estado recién compactado con el material de control SBG-38 (SBG-C0) se observa que los valores de rigidez en general son menores al material de control, por lo que se abre la posibilidad de la apuesta por el mejoramiento con aditivos u otras técnicas de estos materiales.

Los resultados de módulo resiliente sugieren que el material con la combinación de un índice de plasticidad de 12% y un contenido de finos del 21% muestra los mejores resultados de los materiales en estudio, por lo que el material MGM 5 genera mayores expectativas para su potencial uso en vías terciarias con bajos niveles de tránsito, sin embargo, se deben realizar estudios adicionales que comprueben el nivel de tránsito para el cual es apto este material.

Los ensayos de compresión no confinada y tracción indirecta mostraron que los materiales en estudio presentan una resistencia a ensayos de carga estática similar al del material de control. Para el caso del ensayo de compresión no confinada se observa que no hay una influencia significativa del contenido finos y del índice de plasticidad en el comportamiento de cada material. Por otra parte, para el ensayo de tracción indirecta se logra apreciar la tendencia de a mayor índice de plasticidad mayor resistencia a la tracción indirecta, mientras que para materiales con un mismo índice de plasticidad un contenido de finos mayor o menor no muestra diferencias significativas.

7 Recomendaciones

Para futuras investigaciones con los materiales granulares marginales se recomienda explorar otras metodologías para la medición de humedad con el fin de tener más precisión en las lecturas experimentales de humedad.

Revisar constantemente el material tamizado y almacenado ya que este tiende a desintegrarse y por lo tanto se pierde la noción del tamaño real que representa.

Revisar el grado de saturación de todas las probetas en estado recién compactado y después de cada ensayo al que sean sometidos, además de tener precaución y suma precisión en el trazado de guías para la toma de medidas.

Referencias Bibliográficas

- AASHTO. (2007). Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials, T 307-99.
- Anaya, D., y Rodriguez, D. (2024). *Evaluación del comportamiento mecánico de materiales granulares convencionales de subbase y marginales identificados como MGM-9 y MGM-10* (Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniería Civil). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 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.
- Cáceres, Ó., y Rodríguez, A. (2021). *Estimación de la resistencia monotónica en materiales granulares marginales como alternativa para la construcción de vías*. (Trabajo de grado). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Camacho, J., Reyes, O., y Méndez, D. (2007). Ensayo de compactación giratoria en suelos como alternativa al ensayo de compactación proctor. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 17(2), 67–81. <https://doi.org/10.18359/rcin.1075>
- Cetina, J., y Jaimes, J. (2022). *Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como mgm-4* (Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniería Civil). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

- Chirinos, J. (2016). *Efecto de la energía de compactación en la densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad del suelo granular de la cantera El Gavilán, 2015*. (Tesis para optar el título profesional de ingeniero civil). Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú.
- Fuertes, J. (2016). *Caracterización y mejora de suelos marginales en obra civil* (Trabajo Final de Grado). Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España.
- Garzón, J., y Sanchez, H. (2022). *Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como mgm-3* (Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniería Civil). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Herrera, M. (2014). *Determinación del módulo resiliente de diseño de pavimentos mediante criterios ASSHTO 1993 y 2002*. (Tesis para optar el Grado de Máster en Ingeniería Civil con mención en Ingeniería Vial). Universidad de Piura, Lima, Perú.
- INVIAS. (2013). Capítulo 3 – Afirmados, subbases y bases especificaciones generales de construcción de carreteras.
- INVIAS. (2013). compresión inconfiada en muestras de suelos, E-152.
- INVIAS. (2013). Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-deval, E-238.
- INVIAS. (2013). Muestreo de agregados para la construcción de carreteras, E-201.
- INVIAS. (2013). Reducción de muestras de agregados por cuarteo, E-202.
- INVIAS. (2013). Resistencia a la degradación de lo agregados de tamaños menores de 37.7mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles E-218.

- Martínez, J., y Vargas, J. (2022). *Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase granular identificados como mgm-1* (Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniería Civil). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Meza, V. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (31), 23-38.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31251>
- Nascimento, L. (2008). *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Rojas, L. (2014). *Evaluación del módulo resiliente y deformación permanente en material arcilloso con presencia de material friccionante* (Proyecto de investigación). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Rubiños, S., y Espinosa, S. (2022). El Acuerdo de Paz y las vías terciarias en Colombia. *Bitácora Urbano Territorial*, 32(1), 149-160. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v32n1.98480>
- Salas, O. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. *Métodos y materiales*, 1(1), 14-24.
<https://doi.org/10.15517/mym.v1i1.8391>
- Vavrik, W., & Carpenter, S. (1998). Calculating air voids at specified number of gyrations in Superpave gyratory compactor. *Transportation Research Record*, 1630(1), 117-125.

Apéndices

Apéndice A. Protocolo para el armado de la maquina control multiloader

El presente documento es una guía básica para conocer el montaje de todas las partes de la maquina control multiloader para ejecutar ensayos de compresión inconfiada y tracción indirecta.

1. Montaje de la celda de carga

Antes del montaje se debe seleccionar el tipo de celda que se debe montar para el ensayo teniendo en cuenta que se tienen disponibles la celda de máximo 3.5 KN de carga y la celda de 50 KN de carga. Este procedimiento se debe realizar con dos personas debido a que es una pieza muy delicada, para esto la primera persona debe tomar la celda y acercarla al soporte superior de la máquina y la otra persona debe ajustar los tornillos de la celda, luego se conecta la celda de carga a la máquina con los cables de conexión que están en la parte lateral derecha de la máquina.



Figura 1. Montaje de la celda de carga

2. Ubicación de los discos inferior y superior

Se coloca el disco inferior y se ajusta el tornillo de apoyo.



Figura 2. Ubicación del disco inferior.

También se enrosca el disco superior en la celda y se ajusta el brazo que va a sostener el soporte del deformímetro dejándolo alineado con el tornillo del disco inferior.



Figura 3. Ajuste del disco superior



Figura 4. Brazo del soporte

3. Ajuste de la parte superior del soporte del deformímetro

Se coloca en el brazo la parte superior del soporte haciendo un pre-ajuste para que este no se caiga.



Figura 5. Ajuste cabezal soporte del deformímetro

4. Ajuste de deformímetro a su soporte

Se desliza el deformímetro por las guías del soporte y se ajusta con el tornillo lateral para que éste quede fijo.



Figura 6. Montaje del deformímetro en el soporte



Figura 7. Ajuste del deformímetro

5. Montaje de soporte en el brazo

Se coloca el soporte con el deformímetro en la parte superior que ya se había colocado en el brazo insertándolo de forma ascendente y luego realizando un ajuste para que quede fijo.



Figura 8. Montaje del soporte en el brazo.

6. Conexión deformímetro

Se debe conectar el deformímetro a la máquina con los cables que se encuentran en la parte lateral derecha de la máquina, para reconocer los cables del deformímetro estos tienen una marca con resaltador negro.

Como recomendación final siempre habrá que verificar que la máquina este nivelada, esto se puede verificar con el nivel que hay el cabezal superior de la máquina.

Apéndice B. Protocolo para la ejecución de ensayos de compresión inconfiada

El presente documento es una guía básica que describe el paso a paso para la ejecución de ensayos de compresión inconfiada en la máquina control multiloader, teniendo cuenta los parámetros establecidos en la norma INV E- 152-13.

1. Armado de la máquina CONTROL MULTILOADER

Este se debe realizar basándose en las especificaciones señaladas en el protocolo para el armado de esta máquina o también en el video propuesto.



Figura 1. Máquina para ensayo

2. Montaje de la probeta en discos

Una vez realizada la toma de fotos 2D según el protocolo de imágenes 2D Y 3D, se coloca un disco que se encuentre sin ninguna imperfección en su superficie y sobre este se colocará la probeta para finalmente colocar otro disco en la parte superior de la probeta, estos discos pueden ser los mismos que se utilizan en el molde del compactador.



Figura 2. Discos y probeta



Figura 3. Montaje de probeta en los discos

3. Montaje de la probeta en la máquina y ajuste del cabezal superior

Cuando la probeta ya está montada con los discos, se sujeta de la parte inferior con mucho cuidado y manipulándola con guantes se coloca en la máquina y se centra, para luego bajar el cabezal superior de la máquina hasta que éste quede prácticamente pegado a la probeta pero sin que ejerza ninguna precarga, esta precarga se puede verificar en la configuración de la máquina antes de empezar a ejecutar el ensayo y se debe configurar para que sea lo más cercana a cero.



Figura 4. Montaje de la probeta en la máquina.



Figura 5. Ajuste del cabezal superior

4. Nivelación de la máquina y verificación del desplazamiento inicial

Se hace una verificación del nivel de la parte superior de la máquina y que el deformímetro no esté haciendo un desplazamiento inicial, también se revisa en la pantalla de la máquina que el desplazamiento inicial sea cero, por último, se inspecciona qué tanto el tornillo donde se apoya el deformímetro como el mismo deformímetro no estén en contacto con la probeta y tenga un pequeño espacio entre la probeta y estos elementos, también se debe hacer el ajuste de las tuercas de la parte superior.

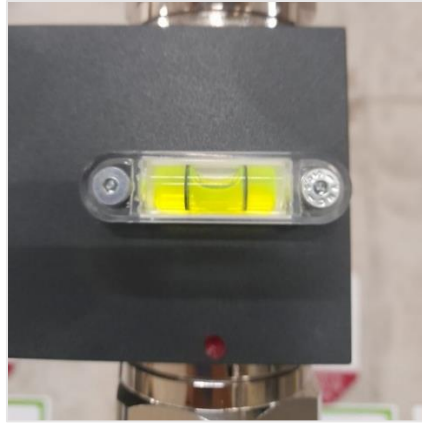


Figura 6. Nivelación del cabezal superior



Figura 7. Chequeos finales

5. Configuración de la máquina para el inicio del ensayo

En el panel de la máquina se selecciona ejecución del ensayo, canal que corresponda a la celda por lo cual se debe seguir la siguiente configuración:

*Celda de 50 KN: Canal 1

*Celda de 3.5 KN canal 2

Estas configuraciones también se deben revisar en las conexiones que se encuentran en la parte lateral de la máquina. Por último, se busca el ensayo que se quiere realizar en este caso UCS, se verifica que estén todos los parámetros iniciales como la velocidad según la

norma INVE 152 y que el desplazamiento no sea mayor a 17 cm para no comprometer el deformímetro.

- **Velocidad de la carga**

Se aplica la carga para que se produzca una deformación axial a una velocidad de $\frac{1}{2}$ a 2.5 % por minuto. Se registran los valores de carga, deformación y tiempo a intervalos suficientes para definir la curva esfuerzo-deformación (normalmente son suficientes 10 a 15 puntos). La velocidad de deformación se debe escoger de manera que el tiempo necesario para la falla no exceda de 15 minutos.

Para el caso de las probetas de MGM se decidió tomar el valor de 1,5% de la altura por lo tanto al tener una altura teórica de probeta de 200 [mm] la velocidad de aplicación de la carga sería 3[mm/min].

- **Control de velocidad con cruceta y deformación mediante medidor externo:** La norma INV E-152-13 especifica que se requiere la medición de deformaciones se debe realizar con el medidor externo y no con la cruceta o medidor interno del motor, para esto se debe seguir las siguientes configuraciones:

- * Control de velocidad: cruceta

- * Control deformación: canal 3

6. Deformación inicial

Antes de iniciar el ensayo se debe realizar una deformación inicial del deformímetro que registre en la pantalla alrededor de 0.5 [mm], para que el registro de datos se realice correctamente.

7. Ejecución del ensayo

Con todas las verificaciones previas ya realizadas se inicia el ensayo y éste se debe dejar hasta que se observe que la probeta ya no va a resistir más y este a punto de empezar a desprender sólidos o hasta que se alcance la capacidad máxima del deformímetro (17 cm), esto con el fin de obtener la mayor cantidad de datos.

- 8. Desmote la probeta:** Una vez finalizado el ensayo lo primero que se debe retirar es todo el soporte del deformímetro, para luego bajar la probeta manipulándola con guantes y retirando los discos para prepararla para los procesos posteriores cómo toma fotos o granulometrías.



Figura 8. Desmote del deformímetro

9. Cálculos

Se calcula la deformación axial al 0.1% más cercano como se muestra en la ecuación 1.

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

Donde: ΔL : Cambio de longitud del espécimen, obtenido a partir de las lecturas del indicador de deformaciones o calculado por un dispositivo electrónico

L_0 : Longitud inicial del espécimen de ensayo, mm (pg.).

Luego se calcula el área transversal media como se muestra en la ecuación 2.

$$A = \frac{A_0}{\left[1 - \frac{\varepsilon_1}{100}\right]} (2)$$

Donde:

A₀: Área media inicial de la sección transversal de la muestra, mm² (pg2).

ε₁: Deformación axial para una carga dada, %. [1]

Por último, se calcula el esfuerzo compresivo como se muestra en la ecuación 3.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} (3)$$

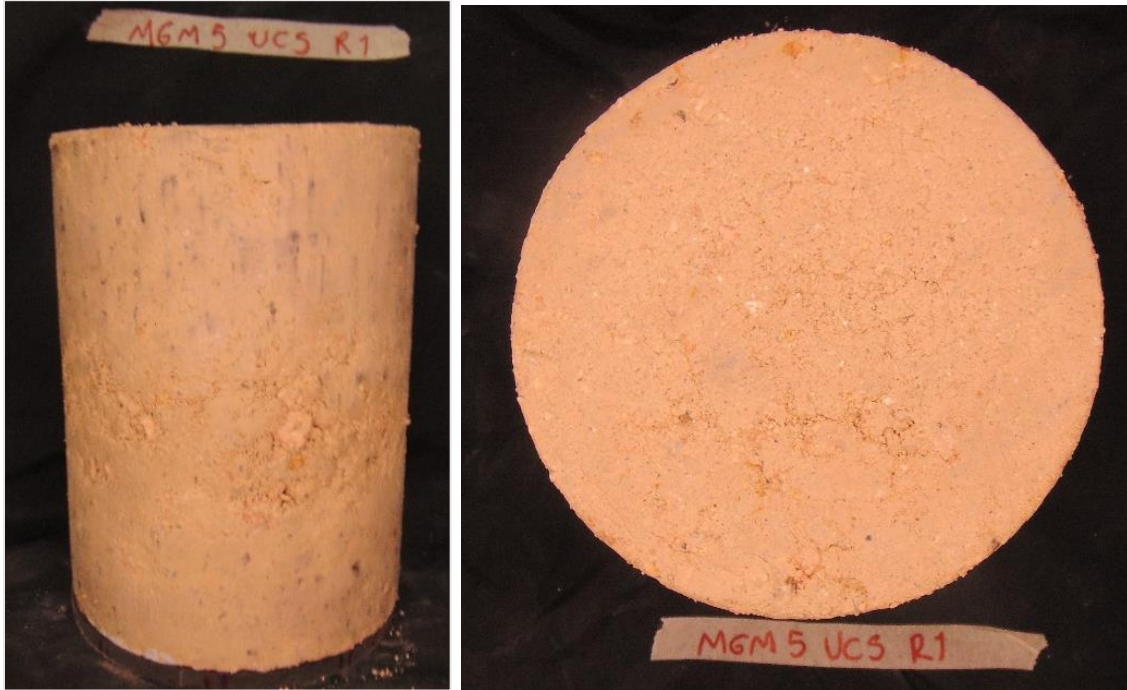
Donde:

P: Carga aplicada (columna 3 del formato del Anexo A), kN (lbf).

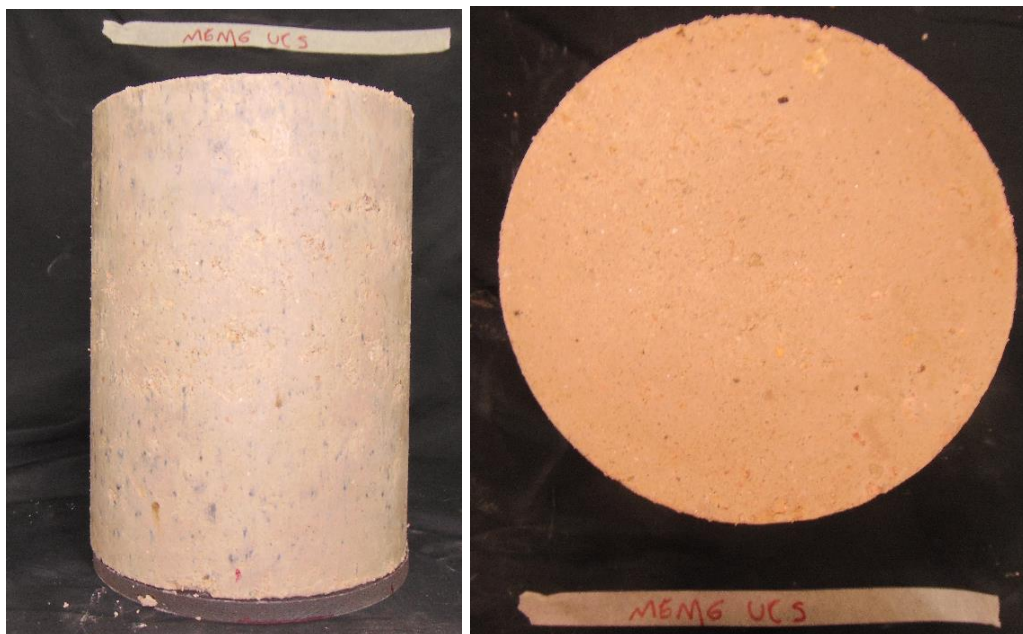
A: Área media correspondiente de la sección transversal, mm²(pg2).

Apéndice C. Imágenes 2D

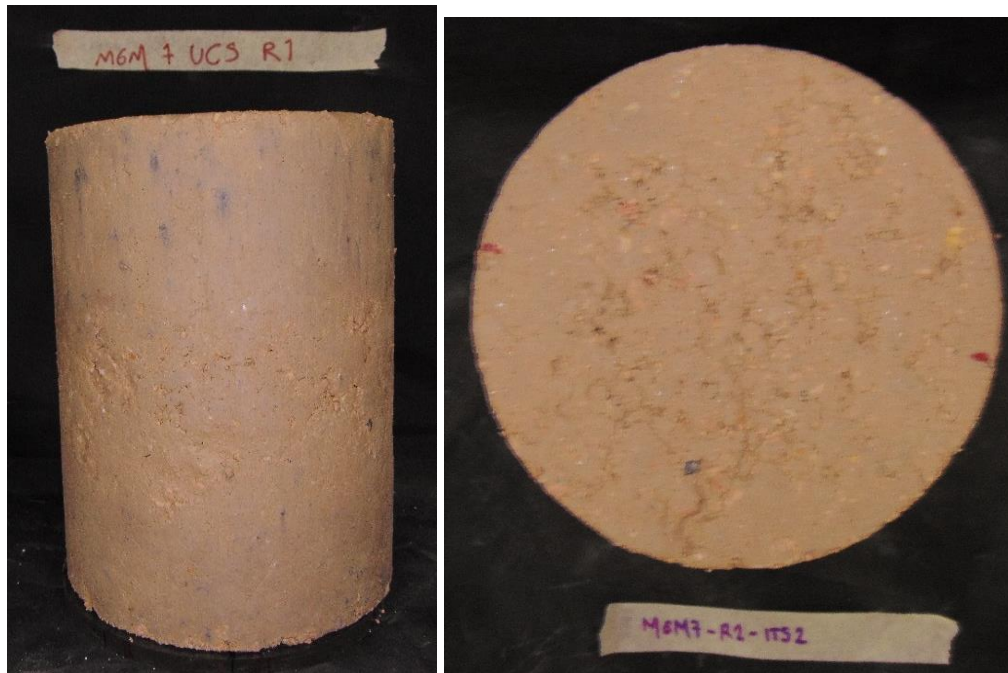
MGM 5 UCS



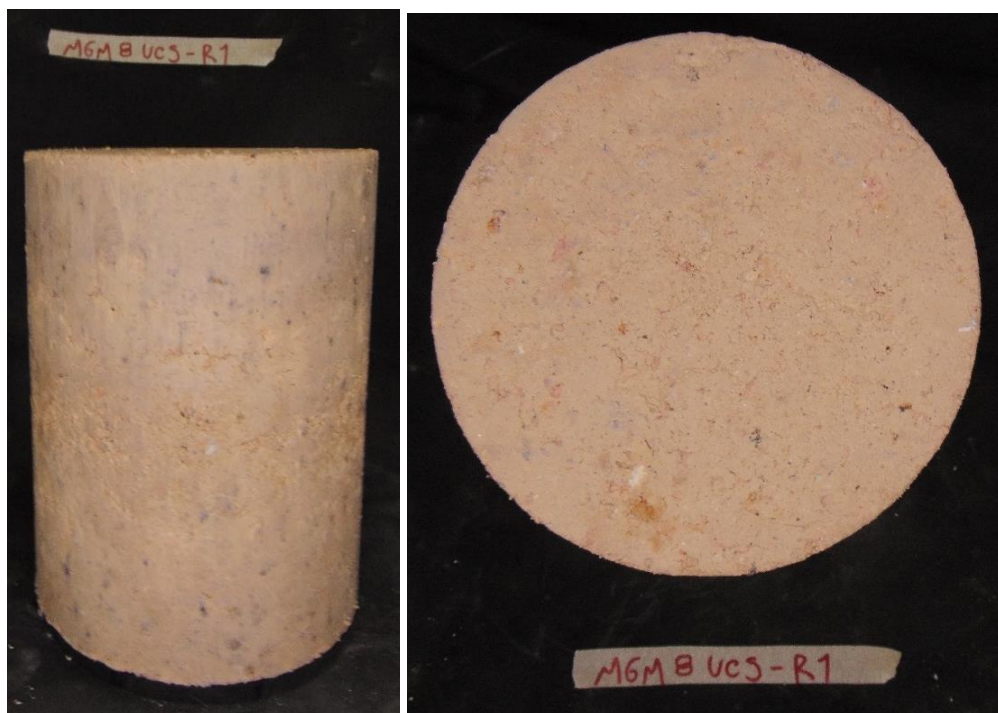
MGM 6 UCS



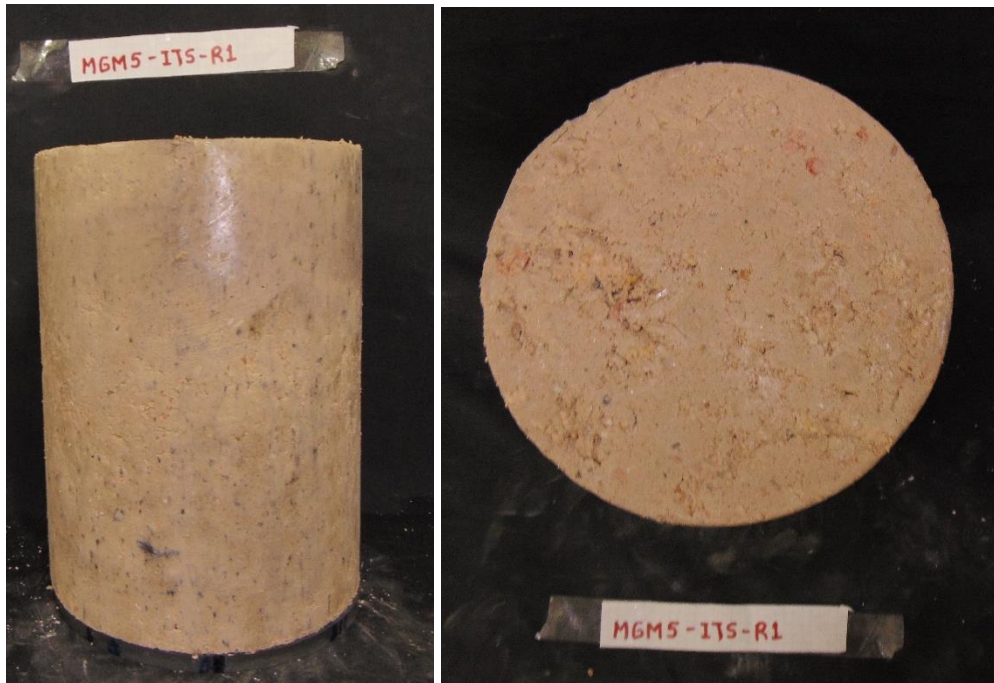
MGM 7 UCS



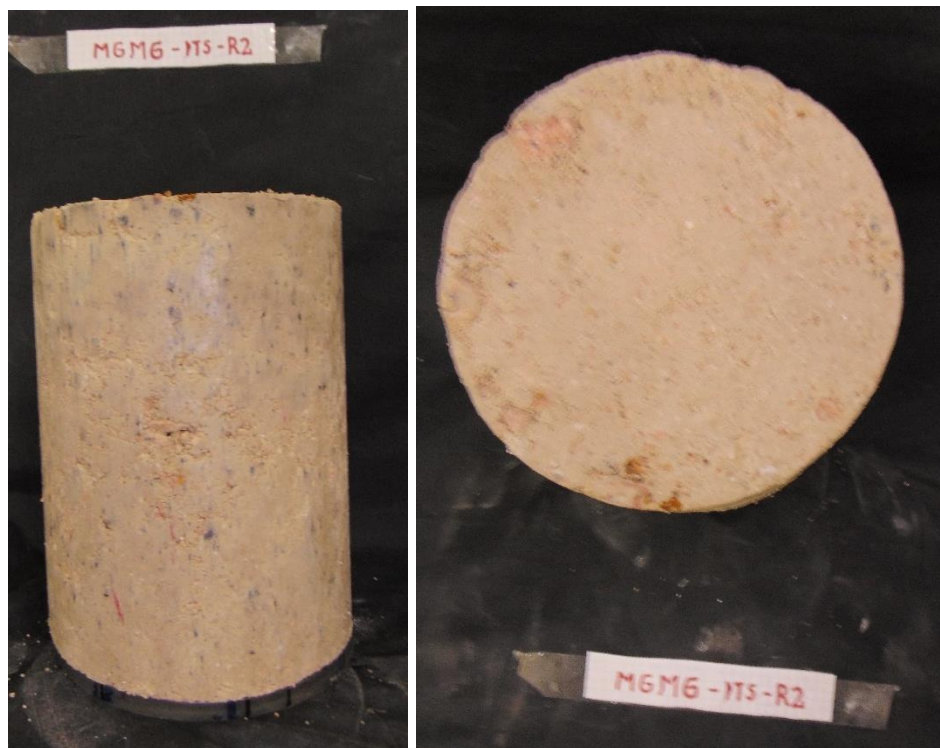
MGM 8 UCS



MGM 5 ITS



MGM6 ITS



MGM 7 ITS

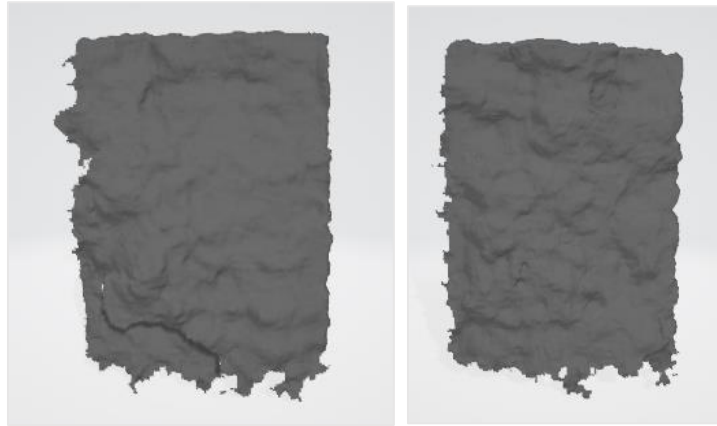


MGM 8 ITS

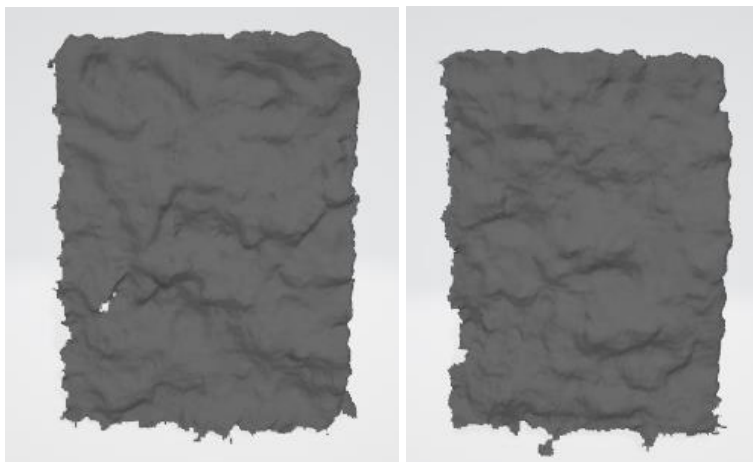


Apéndice D. Imágenes 3D

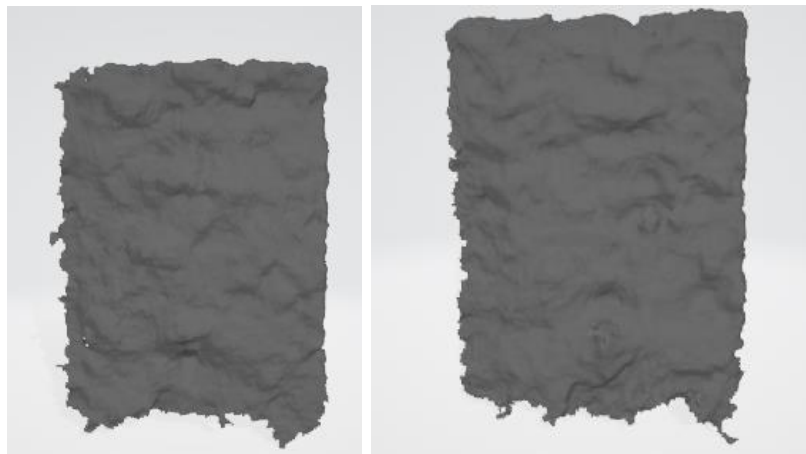
MGM 5



MGM6



MGM 7



MGM 8

