

Evaluación de la resistencia de muestras compactadas de materiales granulares marginales de
subbase granular (MGM 1-2-3-4)

Edgar Gonzalo Alvarez Medina, Andrés Felipe Paredes Aranda

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero civil

Director

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Ph.D. en Ingeniería

Codirector

Alex Eduardo Alvarez Lugo

Ph.D. en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios por sus infinitas bendiciones, por ser mi camino y mi guía, por darme esa fuerza y sabiduría para alcanzar esta meta en mi vida.

A mi madre Luisa Consuelo Aranda Suarez, por su amor, trabajo, apoyo incondicional y por ser mi mayor motivación para querer salir adelante.

A mi padre Luis Alexander Paredes Álvarez, por creer en mí y por su sacrificio para poder cumplir esta meta de ser profesional.

A mi hermano Diego Enrique Paredes Aranda, por darme una voz de aliento cuando más la necesito, alentándome a seguir adelante.

Andrés Felipe Paredes Aranda

A Dios por sus infinitas bendiciones, por ser mi camino y mi guía, por darme esa fuerza y sabiduría para alcanzar esta meta en mi vida.

A mi madre Esperanza Medina Arias, por su amor, trabajo, apoyo incondicional y por ser mi mayor motivación para querer salir adelante.

A mi padre Gonzalo Alvarez Alarcon, por creer en mí y por su sacrificio para poder cumplir esta meta de ser profesional.

A mi hermana Laura Carolina Alvarez Medina, por darme una voz de aliento cuando más la necesito, alentándome a seguir adelante.

Edgar Gonzalo Álvarez Medina

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a todas las personas que formaron parte de este proceso de formación, tanto como estudiantes de ingeniería civil, individuos y profesionales. En especial, extendemos nuestro agradecimiento a nuestras familias por su apoyo incondicional a lo largo de este proyecto. También agradecemos a la escuela de ingeniería civil por proporcionarnos los espacios necesarios para el desarrollo experimental de nuestras investigaciones.

No podemos pasar por alto la contribución invaluable de los profesores, en particular al Ing. Alex Eduardo Álvarez Lugo y al Ing. Vladimir Merchán Jaimes, director y codirector de este proyecto, respectivamente. Su dedicación, tiempo y apoyo han sido fundamentales para nuestro crecimiento académico y profesional. Estamos profundamente agradecidos por su guía y liderazgo a lo largo de este viaje educativo

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Generalidades.....	14
1.1 Proyecto general MGM.....	14
1.2 Ubicación de la cantera.....	15
1.3 Granulometría.....	15
1.4 Diseño de las probetas.....	16
2. Metodología	16
2.1 Compactación de probetas de desempeño.....	17
2.1.1 Curvas de compactación.....	17
2.1.2 Energía de compactación.....	18
2.1.3 Compactación de probetas	18
2.2 Ensayo de calidad	19
2.2.1 Resistencia a la degradación por abrasión con el aparato Micro-deval.....	19
2.3 Ensayos mecánicos	20
2.3.1 Ensayo triaxial dinámico.....	20
2.3.2 Ensayo de tracción indirecta	21
2.3.3 Ensayo de compresión inconfiada	22
2.3.4 Toma de imágenes 2D y 3D	23
3. Análisis de resultados.....	25
3.1 Compactación	25

3.1.1 Curvas de compactación	25
3.1.2 Energía de compactación	26
3.2 Ensayo de calidad.....	26
3.2.1. Resistencia a la degradación por abrasión con el aparato micro-deval.....	26
3.3 Módulo resiliente.....	28
3.4 Ensayo de tracción indirecta	32
3.5 Ensayo de compresión inconfiada	34
4 Conclusiones	35
5 Agradecimientos	36
6 Referencias.....	37

Lista de Tablas	Pág.
Tabla 1. <i>Clasificación de suelos para construcción de vías.</i>	12
Tabla 2. <i>Muestra de MGMs objeto de estudio.</i>	14
Tabla 3. <i>Captura de imágenes en 2D y 3D.</i>	23
Tabla 4: <i>Humedades y pesos unitarios secos máximos de los MGMs 1-2-3-4.</i>	25
Tabla 5. <i>Porcentaje de pérdidas del agregado fino Paviandi.</i>	26
Tabla 6. <i>Porcentaje de pérdidas del agregado grueso del material de control.</i>	27
Tabla 7. <i>Porcentaje de pérdidas del agregado fino del material de control.</i>	27
Tabla 8: <i>Requisito de agregados establecidos por INVIAS.</i>	28
Tabla 9. <i>Resumen de datos reales de las probetas de desempeño.</i>	28
Tabla 10. <i>Características de las probetas.</i>	32
Tabla 11. <i>Características de las probetas.</i>	34

Lista de Figuras	Pág.
Figura 1. <i>Ubicación de la cantera; en sentido norte se encuentra el municipio de Bucaramanga.</i>	15
Figura 2. <i>Curvas granulométricas de los MGM (1-2-3-4) y los límites inferior y superior de la franja granular SBG-38.</i>	15
Figura 3. <i>Metodología.</i>	16
Figura 4: <i>Máquina Micro-Deval</i>	20
Figura 5: <i>Montaje de probeta en equipo triaxial dinámico</i>	20
Figura 6: <i>Imagen 2D de probeta post ensayo de tracción indirecta.</i>	21
Figura 7: <i>Ensayo de compresión confinada.</i>	23
Figura 8: <i>Fotografía 2D, probeta post ensayo de compresión confinada.</i>	24
Figura 09: <i>Curvas de compactación.</i>	25
Figura 10: <i>Curva densidad contra Número de giros.</i>	26
Figura 11. <i>Módulo resiliente de materiales MGM 1 y SBG C0.</i>	29
Figura 12: <i>Módulo resiliente de materiales MGM 2 y SBG C0.</i>	30
Figura 13: <i>Módulo resiliente de materiales MGM 3 y SBG C0</i>	30
Figura 14: <i>Módulo resiliente de materiales MGM 4 y SBG C0.</i>	31
Figura 15: <i>Módulo resiliente promedio de los MGMs y material de control</i>	32
Figura 16: <i>Resultados de ensayos tracción indirecta</i>	33
Figura 17: <i>Resultados de ensayos de compresión confinada</i>	34

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A: <i>Toma de imágenes en 2D (ITS) (UCS)</i>	39
Apéndice B: <i>Toma de imágenes en 3D (ITS)</i>	51

Resumen

Título: Evaluación de la resistencia de muestras compactadas de materiales granulares marginales de subbase granular (MGM 1-2-3-4)**

Autor: Edgar Gonzalo Alvarez Medina, Andrés Felipe Paredes Aranda††

Palabras Clave: Material granular marginal (MGM), Ensayo de calidad, Parámetros de compactación, Probetas de desempeño.

Descripción: El presente artículo detalla el estudio realizado a los materiales granulares marginales (1-2-3-4), comparado con la respuesta del material de control SBG C0, con la finalidad de evaluar el potencial de su posible uso en la construcción de subbases granulares para vías terciarias (vías de bajo volumen de tránsito). Generando con este un impacto de desarrollo en las posibles zonas intervenidas y disminuyendo su costo de construcción. Se desarrollaron ensayos mecánicos y de calidad a los materiales para así determinar su respuesta individual y la comparación entre estos. Se encontró que en el ensayo de calidad realizado en la máquina Micro-Deval al material de tamaño grava de los materiales marginales (1-2-3-4) cumple según los requerimientos del Instituto Nacional de Vías, aunque presentando un mayor desgaste que el material de control en este mismo ensayo. Posteriormente, se definieron parámetros de compactación de las muestras como la energía de compactación, peso unitario seco máximo, y humedad óptima partiendo de datos ya suministrados por proyectos antecesores en la línea del tiempo del proyecto general en el que se enmarca este trabajo de grado. Para definir dichos parámetros se usó el criterio de locking point. Una vez definidos los parámetros de compactación se procedió a compactar las probetas de desempeño y realizar los ensayos mecánicos como el ensayo triaxial dinámico, tracción indirecta y compresión inconfiada; presentándose que el índice de plasticidad en el módulo resiliente no presenta variaciones considerables pero si cuando hay una variación en el porcentaje de finos y en respuesta a los ensayos mecánicos estáticos reflejan que a mayor índice de plasticidad mejor respuesta a la rotura presentan los MGMs

** Trabajo de Grado

†† Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Ph.D. Ingeniería. Codirector: Alex Eduardo Alvarez Lugo Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Ph.D. Ingeniería.

Abstract

Title: Strength evaluation of compacted samples of marginal granular subbase materials (MGM-1-2-3-4)^{‡‡}

Author(s): Edgar Gonzalo Alvarez Medina, Andrés Felipe Paredes Aranda^{§§}

Key Words: Marginal granular material (MGM), quality test, Compaction parameters, Performance specimens.

Description: This article details the study carried out on marginal granular materials (1-2-3-4), compared with the response of the control material SBG C0, in order to evaluate the potential of its possible use in the construction of granular subbases. for tertiary roads (low traffic volume roads). With this, generating a development impact in the possible intervened areas and reducing their construction cost. Mechanical and quality tests were carried out on the materials to determine their individual response and the comparison between them. It was found that in the quality test carried out on the Micro-Deval machine, the gravel-sized material of the marginal materials (1-2-3-4) complies with the requirements of the National Highway Institute, although presenting greater wear than the control material in this same test. Subsequently, compaction parameters of the samples such as compaction energy, maximum dry unit weight, and optimal humidity were defined based on data already provided by predecessor projects in the timeline of the general project in which this degree work is framed. To define these parameters, the locking point criterion was used. Once the compaction parameters were defined, the performance specimens were compacted and mechanical tests such as the dynamic triaxial test, indirect traction and unconfined compression were carried out; showing that the plasticity index in the resilient module does not present considerable variations, but when there is a variation in the percentage of fines and in response to static mechanical tests, they reflect that the higher the plasticity index, the better the response to breakage the MGMs present.

^{‡‡} Trabajo de Grado

^{§§} Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Ph.D. Ingeniería. Codirector: Alex Eduardo Alvarez Lugo Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Ph.D. Ingeniería.

Introducción

Se En Colombia se cuenta con aproximadamente 204.855 km de carreteras con las que cuenta el territorio colombiano, de las cuales 17.434 km se encuentran debidamente identificados e inventariados como de carácter nacional. A su vez, 142.284 km se constituyen como vías terciarias a cargo en mayor proporción de los entes territoriales (municipios) [1]; cabe resaltar que la relevancia de estas vías es sumamente alta como quiera que posibilita la conectividad entre los centros urbanos y/o las zonas veredales de los municipios, especialmente para aquellos que se encuentran en zonas de periferia o de difícil acceso y que influyen directamente en el desarrollo económico, social y cultural de los moradores de dichas zonas.

Por otro lado, según el informe anual de Competitividad Global del Foro Económico Mundial de 2014 [2], en el cual se valora el crecimiento económico de los países atendiendo diversos criterios como, por ejemplo: la educación, la infraestructura, la salud, y la tecnología, se evidencia que en lo que respecta a infraestructura vial, Colombia cuenta con condiciones deficientes dado el carente valor que se le ha dado a lo largo de la historia a este componente, especialmente a las que componen las vías terciarias. Lo anterior ha limitado el desarrollo y apertura económica a los retos de la globalización; y aunque tras el llamado “posconflicto”, se han planteado proyectos por parte de los gobiernos municipales, departamentales, e inclusive nacional que permitan un entorno favorable para la competitividad económica del país y la mejora de la calidad de vida de los pobladores. Lo cierto es que el presupuesto destinado a estas obras es limitado, siendo necesario entonces identificar alternativas de pavimentación de menor costo bajo el principio de progresividad.[3]

Sin embargo, antes de ahondar en el tema, es necesario precisar la clasificación de los suelos según la vertiente española [4] y la nacional [5], como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1.

Clasificación de suelos para construcción de vías.

PG-3 (normativa española para construcción de carreteras)	Normativa nacional fijada por INVIAS
De conformidad con el artículo 330, los suelos se clasifican en: -Seleccionados -Adecuados -Tolerables -Marginales -Inadecuados	Según el Artículo 320-13, los suelos pueden ser: -Seleccionados -Adecuados -Tolerables -Inadecuados

De lo anterior, se puede deducir que, para nuestro país, los suelos marginales hacen parte de los terrenos inadecuados; lo cual es una limitante de materiales para la construcción de subbases granulares.

Los materiales marginales granulares, en adelante MGM, pueden ser una alternativa para la construcción de subbases granulares en vías terciarias con bajo volumen de tránsito si se logran estabilizar y mejorar su comportamiento mecánico.

Por tal razón, este proyecto de investigación pretende evaluar el comportamiento mecánico en términos de la determinación de la resistencia a la compresión no confinada, la resistencia a la

tracción indirecta y el módulo resiliente de los MGM, generando un aporte para las próximas investigaciones en la materia, y por supuesto frente a la viabilidad de su aplicación.

Adicionalmente, se realizarán algunos ensayos de caracterización como Micro-Deval para sumar a la base de datos del proyecto general de investigación (descrito a continuación) del cual se desprende este proyecto y según su comportamiento generar indicadores para cada muestra marginal según sus características propias que la identifican en su granulometría, índice de plasticidad, y su contenido de finos.

1. Generalidades

1.1 Proyecto general MGM

El proyecto general de investigación en MGMs, tiene por objeto el estudio de diez tipos de MGMs con diferentes índices de plasticidad y contenidos finos.

Así mismo, se analizan las subbases granulares SBG-C0 y SBG-C1 las cuales servirán como material de control para determinar si los MGMs dan resultados satisfactorios para su uso en la construcción de subbases granulares.

En la tabla 2 se relacionan los distintos tipos de MGMs previamente señalados con sus índices de plasticidad y contenido de finos, destacando los MGM del 1 al 4, los cuales son objeto de estudio.

Tabla 2.

Muestra de MGMs objeto de estudio

MATERIAL	% FINOS	% IP
MGM 1	18	8
MGM 2	18	12
MGM 3	18	15
MGM 4	21	8
MGM 5	21	12
MGM 6	21	15
MGM 7	24	8
MGM 8	24	12
MGM 9	24	15
MGM 10	19	11

1.2 Ubicación de la cantera

El material objeto de estudio fue extraído de la cantera ubicada en el Km 4,5 Vía Piedecuesta - Aratoca, Municipio de Piedecuesta, Santander, propiedad de Pavimentos Andinos (PAVIANDI). La locación de esta cantera se puede identificar en la figura 1.

Figura 1.

Ubicación de la cantera; en sentido norte se encuentra el municipio de Bucaramanga.

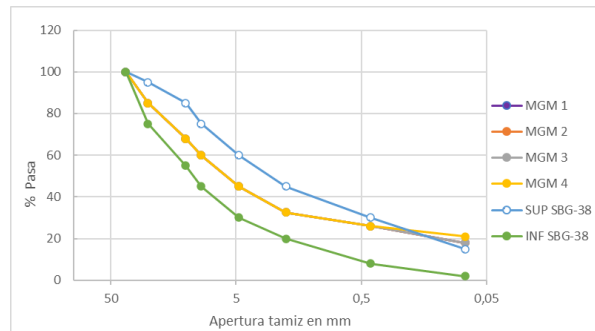


1.3 Granulometría

La granulometría de los MGMs a estudiar, es definida en el intermedio de la franja granulométrica entre los límites superior e inferior del SBG-38 estipulado por INVIAS [5]. A causa de ello, se determina que los MGMs (1-2-3) presentan la misma curva granulométrica, diferenciándose entre sí por su %IP; mientras que el MGM 4 exhibe una curva granulométrica diferente a las demás, tal como se ve en la figura 2.

Figura 2.

Curvas granulométricas de los MGM (1-2-3-4) y los límites inferior y superior de la franja granular SBG-38



1.4 Diseño de las probetas

El diseño de las probetas surge de la curva de compactación obtenida a partir de datos recolectados a lo largo del proyecto general; así mismo se aportó un dato más para construir la curva de compactación de cada muestra marginal, obteniendo el peso unitario seco máximo y la humedad óptima de compactación; con estos parámetros se fabricaron las probetas para evaluar el desempeño de los materiales

2. Metodología

Para el desarrollo del objetivo planteado, se realizó revisión de literatura y protocolo de ensayos; posteriormente se efectuó la preparación de probetas para dar aplicación de los ensayos.

A continuación, se representa en la figura 3, el proceso metodológico

Figura 3.

Metodología.



2.1 Compactación de probetas de desempeño

Para llevar a cabo la compactación de las probetas de desempeño, se definen los diferentes parámetros tales como humedad óptima y energía de compactación en la curva de compactación, es decir, normalizar la compactación para el proceso de construcción de las probetas; tal como se describe en los siguientes numerales.

2.1.1 Curvas de compactación

Para obtener la curva de compactación, se compactan réplicas con diferentes humedades para cada MGM, por medio del compactador giratorio. De este equipo se recopila la información de compactación, dando por resultado la variación en altura por cada giro.

Ahora bien, se hace necesario precisar que se atiende la metodología locking point, entendida esta como una metodología desarrollada como alternativa para prevenir la sobre

compactación en el método de compactación giratoria. En palabras de Vavrik y Carpenter [6], el locking point se constituye como el primer giro de tres con la misma altura, precedidos por dos giros con la misma altura; en otras palabras, se busca el giro de compactación en el que empieza a mostrar una secuencia repetitiva en su altura y por ende en su densidad. La secuencia a buscar es que se repitan dos datos consecutivos en altura, seguido a esto, presenta una variación en la altura y se empieza a repetir tres datos consecutivos de la misma. Al encontrar este patrón se define el locking point en el primer giro donde inicia esta secuencia.

Una vez definido el locking point para cada probeta compactada a diferente humedad, se construye la curva de compactación con los datos recopilados para cada MGM y así obtener el máximo de la curva. Dicha curva, define la humedad óptima de compactación y el peso unitario seco máximo que logra el material compactado a dicha humedad.

2.1.2 Energía de compactación.

Para definir la energía de compactación se realizó una campaña de compactación de probetas, estableciéndose una energía base de 220 giros en el compactador giratorio para cada MGM. A partir de las curvas de densidad obtenidas y usando el criterio de locking point, se normaliza la energía de compactación con 130 giros para todas las probetas de desempeño, obteniéndose el promedio de giros que se definieron como locking point para cada MGM.

2.1.3 Compactación de probetas

Una vez definida la granulometría, humedad óptima de compactación, y la energía de compactación, se debe adelantar un proceso de tamizado del material traído de cantera para preparar las probetas según la curva granulométrica para cada MGM [7].

Tras separar el material en diferentes tamaños, una muestra del material húmedo es llevada al horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) para obtener un secado de una masa constante. Se destaca, que de conformidad a la normativa INVIAS [8], “la masa perdida a causa del secado es agua y que la masa remanente corresponde a la muestra seca”. Así mismo, el contenido de agua se computa comparando la masa de agua en la muestra seca con la masa de la muestra húmeda.

Acto seguido, y tras considerar la humedad óptima y teniendo un material secado en horno, se comienza a mezclar según granulometría y cantidad de agua necesaria por medio de la mezcladora y posteriormente se deja en curado por un mínimo de 24 horas.

Finalmente, terminado el tiempo de curado, la muestra es apta para su debida compactación en el compactador giratorio con una energía de 130 giros.

2.2 Ensayo de calidad

Con la intención de definir la calidad de los materiales e identificar el deterioro mecánico y por abrasión; se realiza el ensayo de degradación por abrasión con el aparato Micro-deval sobre el material objeto de estudio, como a continuación se presenta.

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

Se realiza el ensayo de calidad con el aparato MICRO- DEVAL para agregados grueso y fino en la sede de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander, atendiendo las disposiciones dadas en la norma INV E 238-13 [9] e INV E 245-13 [10] para determinar la

resistencia del agregado grueso y fino a la abrasión respectivamente. En la figura 4 se observa la máquina utilizada para el fin descrito.

Figura 4.

Máquina Micro-Deval



2.3 Ensayos mecánicos

2.3.1 Ensayo triaxial dinámico

Para el desarrollo de este ensayo se aplicó la metodología descrita en la norma AASHTO T307-99 [11]. Para esto se prepararon probetas de desempeño de cada material y se realizó el ensayo sobre el material recién compactado (i.e., después de dejar reposar una hora la probeta antes de iniciar el montaje del ensayo). Para cada material se realizaron tres réplicas para observar si hubo variaciones entre ellas por algún factor o variable. En la figura 5 se visualiza ya montada la probeta en la máquina, preparada para ejecutar el ensayo triaxial dinámico y así poder calcular el módulo resiliente de la muestra. Ver figura 5.

Figura 5.

Montaje de probeta en equipo triaxial dinámico



2.3.2 Ensayo de tracción indirecta

En el desarrollo de este proceso se adecuó un cabezal transmisor de carga con las dimensiones apropiadas, que garantiza la aplicación de carga en toda la longitud diametral de las probetas de desempeño. Así mismo, se hizo uso de una máquina Controls multi loader con control de desplazamiento para la ejecución del ensayo. La velocidad de carga seleccionada se estandarizó en 3 milímetros por minuto (toda vez que la norma ASTM D8225-19 [12] describe una metodología conducente a las muestras asfálticas y no para muestras de suelos). Así mismo, al utilizar esta velocidad de aplicación de carga, se pretende observar el comportamiento de cada MGM en las curvas de carga contra desplazamiento de este ensayo con respecto al ensayo de compresión no confinada.

Figura 6.

Imagen 2D de probeta post ensayo de tracción indirecta.



El montaje de las probetas para la realización del ensayo según la norma ASTM D8225-19 [12] se efectuó con base en los protocolos de laboratorio establecidos en el proyecto general que antecede a este estudio.

2.3.3 Ensayo de compresión inconfiada

Atendiendo la norma INV E 152-13 [13] y de los protocolos de uso y montaje del ensayo, se recolectaron los datos conducentes para la ilustración de las gráficas carga contra desplazamiento de los materiales en análisis. Es entonces que, para las probetas formadas se tiene una longitud de 200 milímetros aproximadamente, se seleccionó una velocidad intermedia entre los valores especificados por la norma, la cual produce un 1.5% de deformación axial. En consecuencia, la velocidad de aplicación de ensayo de compresión no confinada para los materiales marginales de este proyecto es de 3 milímetros por minuto. Ver figura 7

Figura 7.

Ensayo de compresión inconfiada.

**2.3.4 Toma de imágenes 2D y 3D**

Siguiendo los protocolos de toma de imágenes en 2D y 3D establecidos para esta investigación, se tomó el registro fotográfico antes y después de la aplicación del ensayo, para identificar las características físicas de los materiales a estudiar.

A continuación, se presenta un paralelo entre las tomas de imágenes 2D y 3D (ver tabla 3), e imagen de fotografía en 2D (ver figura 8)

Tabla 3.

Captura de imágenes en 2D y 3D

Imágenes 2D	Imágenes 3D
<p>Para la toma de imágenes 2D se usó una cámara de 20.1 megapíxeles, a efectos de mostrar la superficie frontal y superior de las probetas, antes de los ensayos de compresión no confinada y tracción indirecta.</p> <p>Con el anterior registro se aprecian las características propias de cada ejemplar, como imperfecciones, colores o rasgos.</p>	<p>Una Kinect Xbox 360 controlado por el software SDK versión 1.8 [14], fue la herramienta utilizada para la captura de imágenes en 3D.</p> <p>Dicho registro fue tomado con posterioridad al ensayo de tracción indirecta, como quiera que a partir de este se obtiene una división de la probeta en dos partes.</p>

Figura 8.

Fotografía 2D, probeta post ensayo de compresión inconfiada.



3. Análisis de resultados

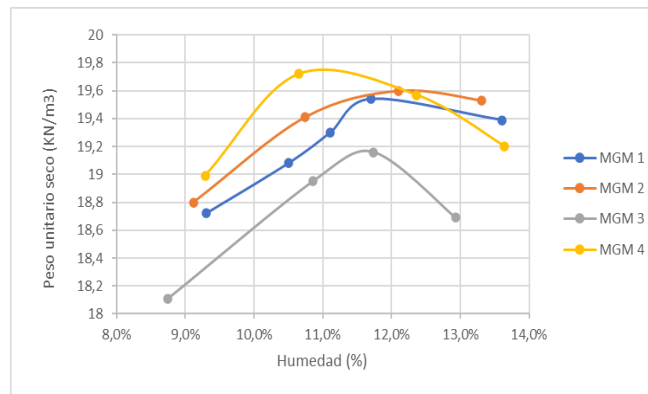
3.1 Compactación

3.1.1 Curvas de compactación

Las curvas de compactación construidas partiendo de los datos obtenidos de la compactación de las probetas con diferentes humedades y aplicando el criterio de locking point se representan en la figura 9.

Figura 9.

Curvas de compactación.



Partiendo de estas curvas se identifica el peso unitario seco máximo y con ella la humedad óptima de compactación para cada MGM. Los valores de estos parámetros, para cada MGM, se presentan en la tabla 4.

Tabla 4.

Humedades y pesos unitarios secos máximos de los MGMs 1-2-3-4.

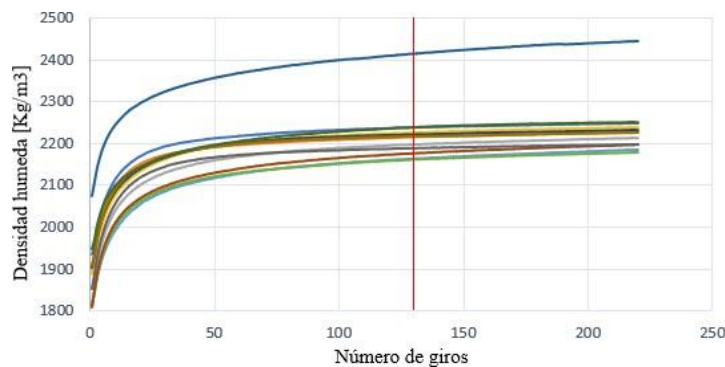
MGM	Peso unitario seco max [KN/m³]	Humedad óptima
1	19,58	11,50%
2	19,64	12,30%
3	19,2	11,70%
4	19,81	11,50%

3.1.2 Energía de compactación

En la figura 10 se presentan las curvas de densidad contra número de giros obtenidas a partir de compactador giratorio; en la cual, utilizando el criterio de locking point se ubica el número de giro para el que se encuentra este en cada MGM y se define como promedio que la energía a normalizar en este proyecto general es de 130 giros.

Figura 10.

Curva densidad contra Número de giros.



3.2 Ensayo de calidad

3.2.1. Resistencia a la degradación por abrasión con el aparato micro-deval

Se realizó el ensayo de resistencia a la degradación por abrasión en el aparato MICRO-DEVAL para el agregado fino de la cantera de paviandi y para el agregado grueso y fino para el material de control con tres réplicas para cada agregado de los materiales. Dando como resultado el porcentaje de pérdida de masa debido al desgaste mecánico al que se expone el material.

En la tabla 5 se presentan los datos obtenidos en el ensayo realizado en el aparato MICRO-DEVAL para los agregados finos del material extraído de la cantera de Paviandi.

Tabla 5.

Porcentaje de pérdidas del agregado fino Paviandi.

Réplica	MASA A (g)	MASA B (g)	MASA A-MASA B (g)	% Pérdidas
1	500,6	369,3	131,3	26%
2	499,8	362	137,8	28%
3	500,6	373,4	127,2	25%

En la tabla 6 se presentan los datos obtenidos en el ensayo realizado en el aparato MICRO DEVAL para los agregados gruesos del material de control.

Tabla 6.

Porcentaje de pérdidas del agregado grueso del material de control.

Réplica	Masa A (g)	Masa B (g)	Masa A-Masa B (g)	% Pérdidas
1	1500,9	1369	131,9	9%
2	1499,5	1373	126,5	8%
3	1500,4	1365	135,4	9%

En la tabla 7 se presentan los datos obtenidos en el ensayo realizado en el aparato MICRO-DEVAL para los agregados finos del material de control.

Tabla 7.

Porcentaje de pérdidas del agregado fino del material de control.

Réplica	Masa A (g)	Masa B (g)	Masa A-Masa B (g)	% Pérdidas
1	500,1	413	87,1	17%
2	499,8	417	82,8	17%
3	500,4	405	95,4	19%

Ahora bien, en la tabla 8, se trae a colación, los requisitos de los agregados para subbases granulares dispuestos por INVIAS, [5].

Tabla 8.

Requisito de agregados establecidos por INVIAS [5].

Característica	Norma de ensayo INV	Sub-base granular		
		Clase C	Clase B	Clase A
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de los ángeles (gradación A), máximo (%) -500 revoluciones (%)	E-218	50	50	50
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	-	35	30

Comparando los resultados de las muestras del material de control y de la cantera Paviandi con los requisitos de calidad indicados en la tabla 8, se concluye que están dentro del margen de degradación por abrasión en el equipo Micro-deval.

3.3 Módulo resiliente

En la tabla 9 se presentan los datos reales de las probetas de desempeño compactadas para realizar el ensayo triaxial dinámico para el cálculo del módulo resiliente.

Tabla 9.

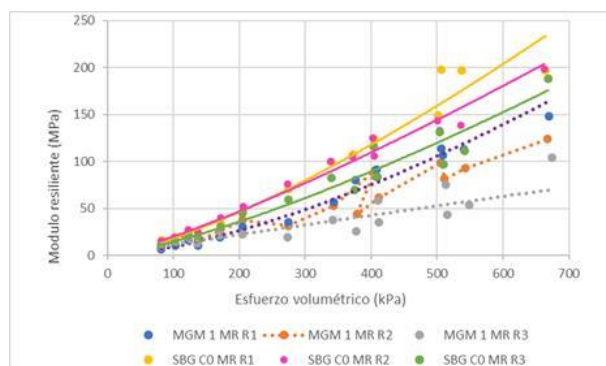
Resumen de datos reales de las probetas de desempeño.

MATERIAL	Humedad	Densidad de compactación	Masa
		[kg/m ³]	[g]
MGM 1 R1	11,62%	2203,65	7704
MGM 1 R2	11,48%	2194,42	7705
MGM 1 R3	11,96%	2207,43	7701
MGM 2 R1	12,42%	2183,43	7781
MGM 2 R2	12,36%	2191,8	7785
MGM 2 R3	12,16%	2181,46	7782
MGM 3 R1	12,03%	2190,4	7574
MGM 3 R2	11,76%	2166,48	7569
MGM 3 R3	11,92%	2201,86	7566
MGM 4 R1	11,63%	2159,89	7796
MGM 4 R2	11,70%	2160,25	7800
MGM 4 R3	11,16%	2162,67	7794,5

De acuerdo a los datos registrados en la tabla 9 y la figura 11, los resultados sugieren que la respuesta del material de control es mayor al MGM1, observándose mayor diferencia de comportamiento a mayor esfuerzo volumétrico. En este sentido, los resultados de rigidez de las muestras MGM1 muestran una dispersión importante, que se puede asociar a las variaciones de contenido de humedad. Se debe resaltar que la réplica 3 está 0,46% por encima de la humedad óptima de compactación.

Figura 11.

Módulo resiliente de materiales MGM 1 y SBG C0.

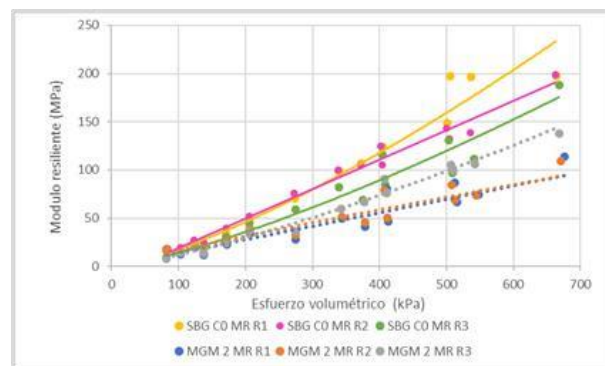


Los resultados del módulo resiliente para el material MGM 2 representados en la Figura 12 indican nuevamente diferencias importantes con el material de control a partir de los 200 kPa de esfuerzo volumétrico.

Entre las réplicas del MGM 2, la réplica 3 presenta dispersión desde los 300 kPa de esfuerzo volumétrico respecto a la réplica 1 y 2, asociándose a la diferencia de humedad presentada en la réplica 3 que se aprecia en la tabla 9.

Figura 12

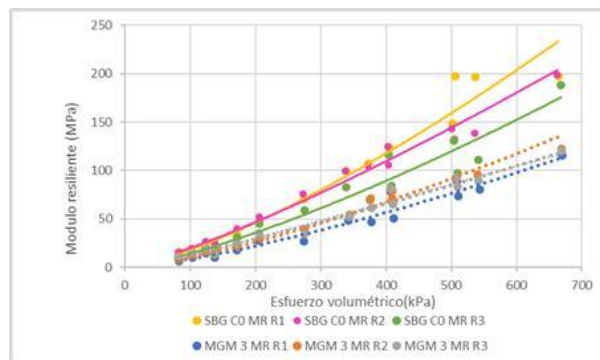
Módulo resiliente de materiales MGM 2 y SBG C0.



Según la figura 13, plasma los resultados del módulo resiliente para el material MGM 3, presentando diferencias considerables a partir de los 200 kPa de esfuerzo volumétrico con el material de control y una baja dispersión entre las réplicas.

Figura 13

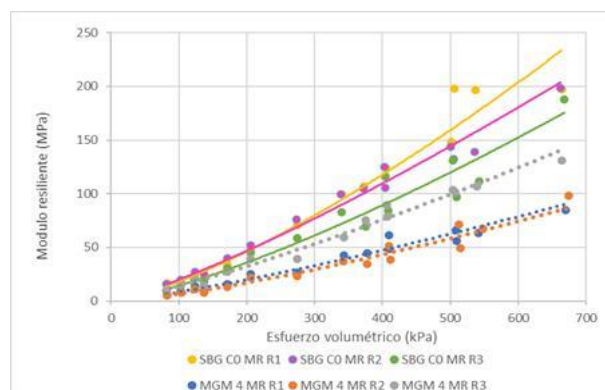
Módulo resiliente de materiales MGM 3 y SBG C0.



Como se evidencia en la figura 14, los resultados sugieren que la respuesta del material de control es mayor al MGM 4, observándose mayor diferencia de comportamiento a mayor esfuerzo volumétrico. En este sentido, los resultados de rigidez de las muestras MGM 4 muestran una dispersión importante, asociada a las variaciones de contenido de humedad. Se debe resaltar que la réplica con mayor dispersión es la réplica 3 con un 0,34% por debajo de la humedad óptima de compactación.

Figura 14.

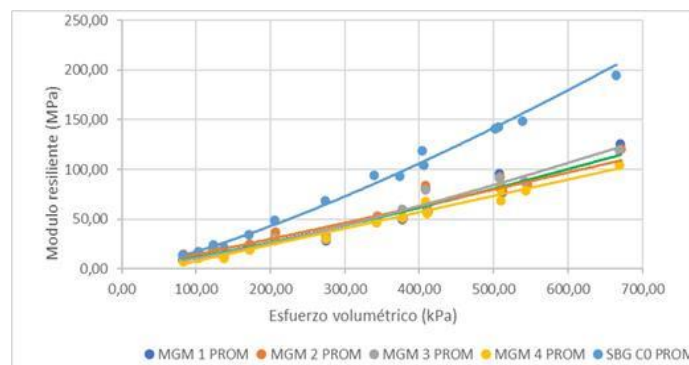
Módulo resiliente de materiales MGM 4 y SBG C0.



Se evidencia en la figura 15 que el comportamiento promedio de los MGM (1-2-3) presenta una tendencia similar, con una ligera dispersión en el material MGM 4. Partiendo de esto, se acota que el índice de plasticidad no genera diferencias apreciables en el comportamiento del material, pero si la diferencia en la cantidad de finos.

Figura 15.

Módulo resiliente promedio de los MGMs y material de control.



3.4 Ensayo de tracción indirecta

Las probetas de desempeño MGM (1-2-3-4), que cuentan con las características de la tabla 10 se someten a ensayo de tracción indirecta y se determina su respuesta esfuerzo-deformación. Ver figura 16.

Tabla 10.

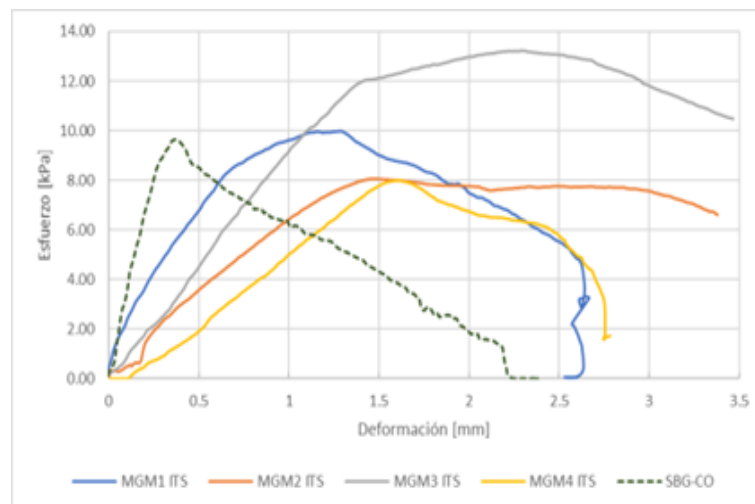
Características de las probetas.

MGM	Densidad de compactación (kg/m ³)	altura (mm)	Diámetro (mm)	Masa (g)
1	2204,33	198,08	150	7716
2	2196,81	200,79	150	7795
3	2160,64	198,55	150	7580
4	2190,13	201,72	150	7807

En Figura 16, se observa el buen comportamiento del MGM 3, siendo el material que soporta mayor cantidad de esfuerzo con mayor índice de plasticidad y menor porcentaje de finos. Caso contrario del MGM 4 que brinda una respuesta deficiente, con el menor índice de plasticidad y mayor porcentaje de finos. Por su parte, el MGM1 como material con el menor porcentaje de finos y menor índice de plasticidad, presenta una menor deformación antes de llegar al punto de rotura y soporta un esfuerzo similar al esfuerzo que soporta el material de control SBG-C0.

Figura 16.

Resultados de ensayos tracción indirecta.



3.5 Ensayo de compresión inconfiada

Las probetas de desempeño MGM (1-2-3-4), que cuentan con las características de la tabla 12 se sometieron a ensayo de compresión inconfiada y se determinó su respuesta esfuerzo-deformación. Ver figura 17.

Tabla 11.

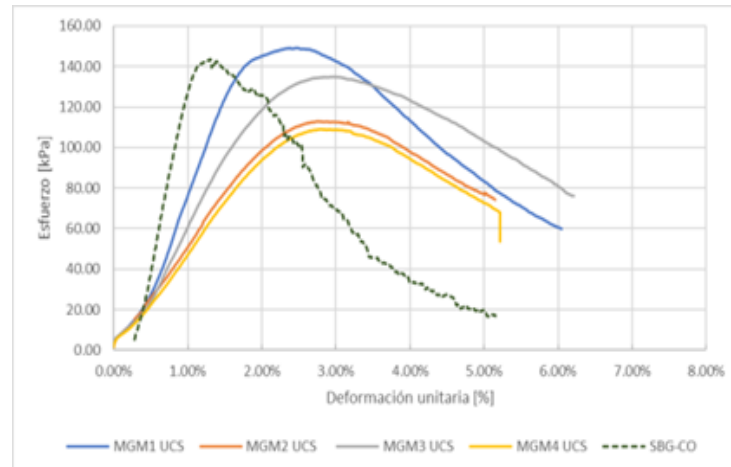
Características de las probetas.

MGM	Densidad de compactación (kg/m ³)	altura (mm)	Diámetro (mm)	Masa (g)
1	2236,77	195,21	150	771 6
2	2233,13	197,53	150	779 5
3	2210,92	194,04	150	758 1
4	2190,13	201,72	150	780 7

En la figura 17, se evidencia como el MGM1 con menor porcentaje de finos (18%) y menor índice de plasticidad (8%), soporta más esfuerzo y menor deformación antes de llegar al punto de rotura; dato que destaca que este material marginal soporta más esfuerzo que el MGM4 material con mayor cantidad de finos (21%) e igual índice de plasticidad y es el que presenta la menor capacidad de carga.

Figura 17.

Resultados de ensayos de compresión inconfiada Fuente, elaboración propia.



Para los materiales probados, los resultados de compresión inconfiada reflejan que no hay una influencia significativa del índice de plasticidad; ya que el material que menos esfuerzo soporta y el que mayor esfuerzo soporta tienen el mismo índice de plasticidad.

4 Conclusiones

Como resultado de la actividad investigativa realizada, se obtienen las siguientes conclusiones:

- a) En el presente estudio se nota un comportamiento estable en el promedio del módulo resiliente de los MGMs (1-2-3) y una disminución en el MGM 4. Partiendo de esto, se acota que el índice de plasticidad no genera diferencias apreciables en el comportamiento del material, pero si la diferencia en la cantidad de finos.
- b) Los resultados de resistencia a la compresión inconfiada revelaron que el material MGM1 exhibe una resistencia similar a la del material de control SBG-C 0 siendo el material que muestra una mayor capacidad para soportar esfuerzo y presenta una

menor deformación antes de llegar al punto de rotura, el peor comportamiento lo obtuvo el MGM 4 siendo el material con mayor porcentaje de finos, e igual índice de plasticidad que el MGM1 demostrando que no existe una correlación entre el índice de plasticidad y la compresión inconfiada

- c) El resultado del ensayo de tracción indirecta muestra un mejor comportamiento por parte del MGM 3 material con el índice de plasticidad más alto, y el MGM1 con el índice de plasticidad más bajo los dos materiales se comportan mejor que el material de control SBG-CO demostrando que no existe una correlación entre el índice de plasticidad y la tracción indirecta.
- d) Se concluye que el MGM1 tiene el mejor comportamiento mostrado en el presente estudio, ya que presenta mejores respuestas mecánicas en los ensayos de tracción indirecta, compresión inconfiada y un mayor módulo resiliente respecto a los demás MGMs y el material de control.

5 Agradecimientos

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a todas las personas que formaron parte de este proceso de formación, tanto como estudiantes de ingeniería civil, individuos y profesionales. En especial, extendemos nuestro agradecimiento a nuestras familias por su apoyo incondicional a lo largo de este proyecto. También agradecemos a la escuela de ingeniería civil por proporcionarnos los espacios necesarios para el desarrollo experimental de nuestras investigaciones.

No podemos pasar por alto la contribución invaluable de los profesores, en particular al Ing. Alex Eduardo Álvarez Lugo y al Ing. Vladimir Merchán Jaimes, director y codirector de este

proyecto, respectivamente. Su dedicación, tiempo y apoyo han sido fundamentales para nuestro crecimiento académico y profesional. Estamos profundamente agradecidos por su guía y liderazgo a lo largo de este viaje educativo.

Este trabajo se desarrolló en el marco del proyecto de investigación VIE 3717 “Caracterización de materiales granulares marginales para pavimentos considerando cambios hidro-mecánicos asociados a ciclos de humedecimiento y secado”. Muchas gracias.

6 Referencias

- [1] L. Narvaez, L. Narvaez, “VÍAS TERCARIAS: motor del desarrollo económico rural”, Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes., N° 45, pp. 80-87, 2017.
- [2] World Economic Forum., “Competitiveness Report 2014-2015”, Geneva, Suiza., 2014.
- [3] M. A. Acosta Ariza y P. A. Alarcón Romero, «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.» (Trabajo de grado) Universidad Católica de Colombia, 2017.
- [4] Ministerio de Obras Públicas, “Especificaciones Técnicas Generales en Construcción de Carreteras (PG- 3)”, Madrid, España: Gobierno de España.
- [5] INVIAS , Capítulo 3 - “Afirmados, Subbases y Bases, de Especificaciones generales de construcción de carreteras”, 2013.
- [6] W. R. Vavrik y S. H. Carpenter, “Calculating Air Voids at Specified Numbers of Gyration in Superpave Gyrotory Compactor”. In: Transportation Research Record 1630: Asphalt Mixtures: Stiffness Characterization, Variables, and Performance Transportation Research Board, National Research Council”, Washington, D.C., EUA. , 1998.

[7] J. J. Martínez Chinchilla y J. C. Vargas Prada, “Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase granular identificados como MGM-1” (trabajo de grado) UIS Ingenierías, 2022.

[8] INVIAS, “Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo -agregado INV E – 122 – 13”, 2013.

[9] INVIAS, “Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval, INV E-238-13,” 2013

[10] INVIAS, “Degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval, INV E – 245 – 13”, 2013.

[11] Determinación del módulo resiliente de suelos y materiales agregados, AASHTO T 307-99, 2007.

[12] Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature, ASTM D8225-19, 2019.

[13] INVIAS, Compresión inconfiada en muestras de suelos, INV E-152-13, 2013.

[14] 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/>.

Apéndices

Apéndice A: *Toma de imágenes en 2D (ITS) (UCS)*

Figura 1.

MGM1 ITS Superior



Figura 2.

MGM1 ITS frontal



Figura 3.

MGMI ITS frontal post ensayo

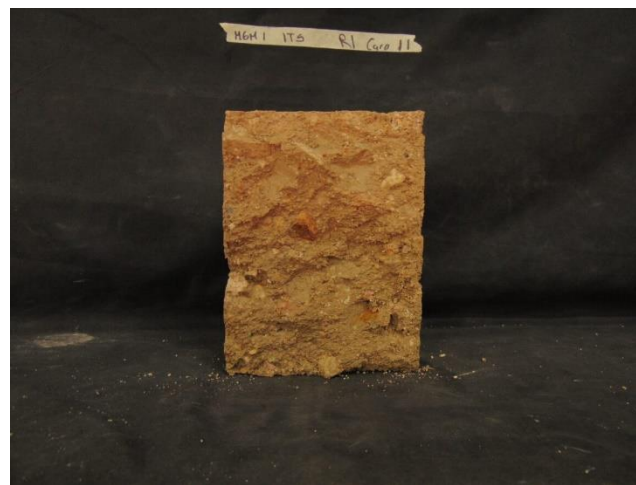


Figura 4.

MGMI ITS superior post ensayo

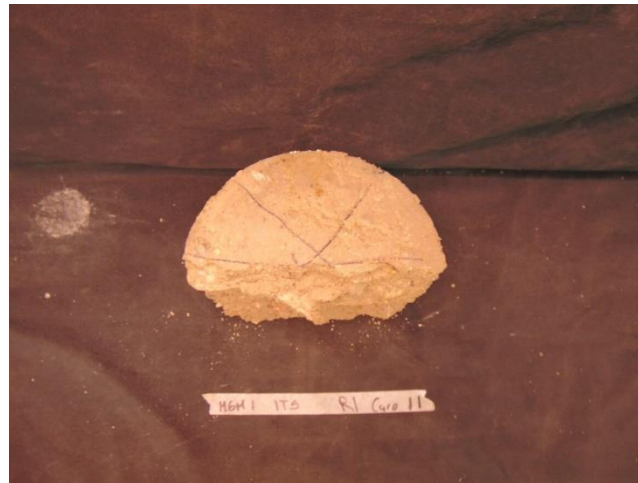


Figura 5.

MGM2 ITS frontal

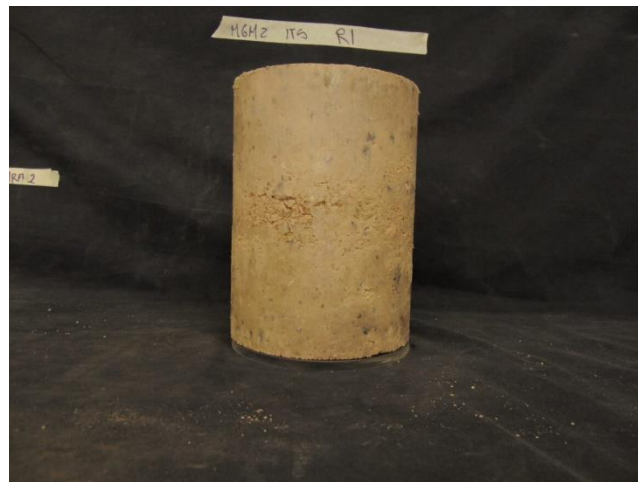


Figura 6.

MGM2 ITS Superior

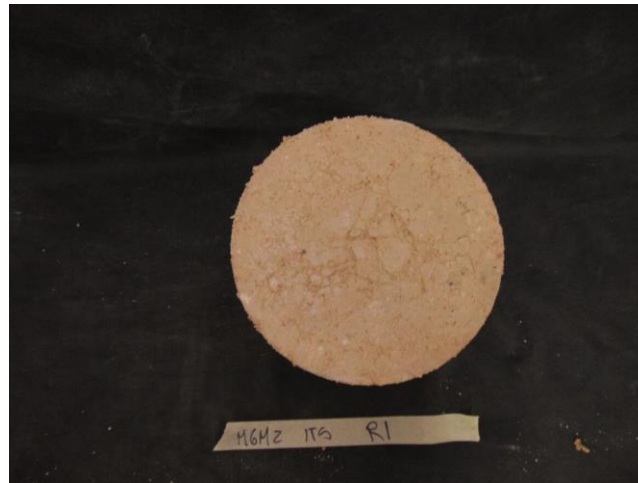


Figura 7

MGM2 ITS frontal post ensayo



Figura 8.

MGM3 ITS Superior

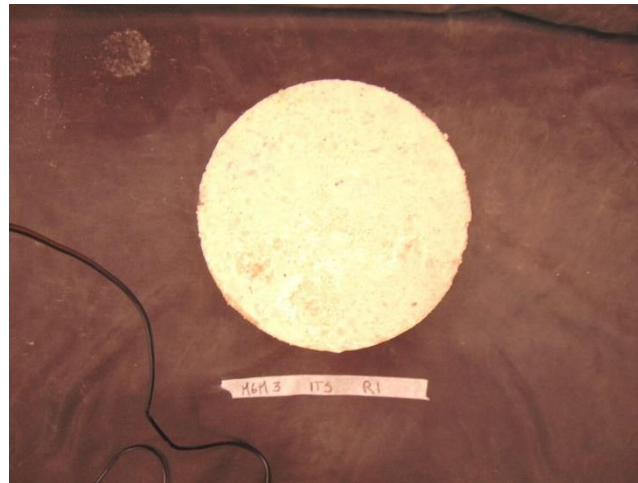


Figura 9.

MGM3 ITS frontal

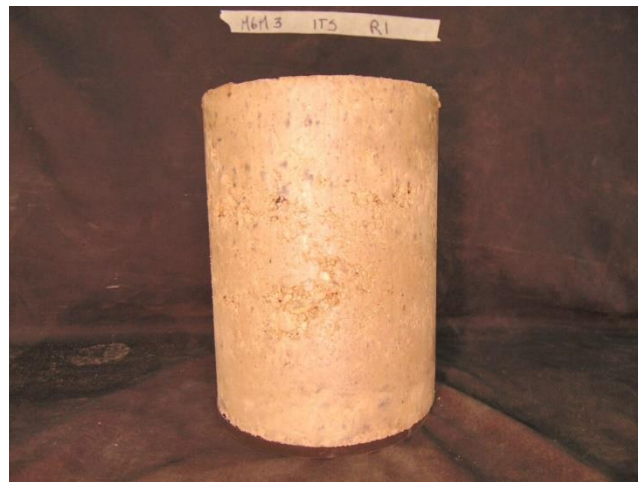


Figura 10.

MGM3 ITS frontal post ensayo

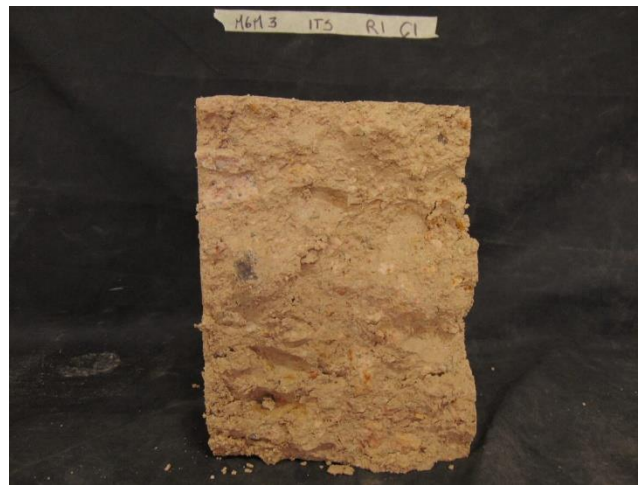


Figura 11.

MGM4 ITS Superior

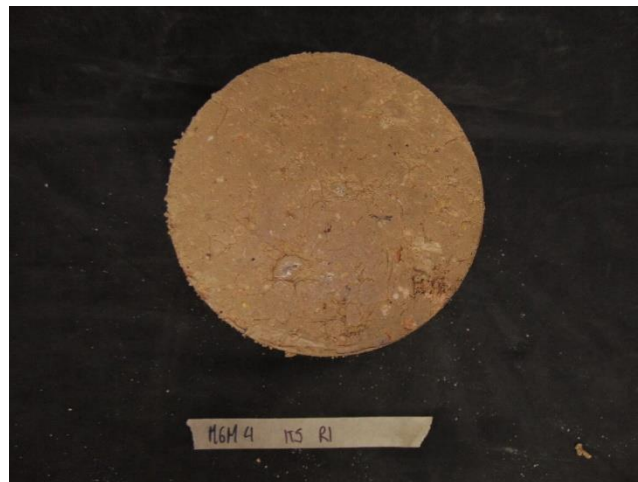


Figura 12.

MGM4 ITS frontal



Figura 13

MGM4 ITS frontal post ensayo

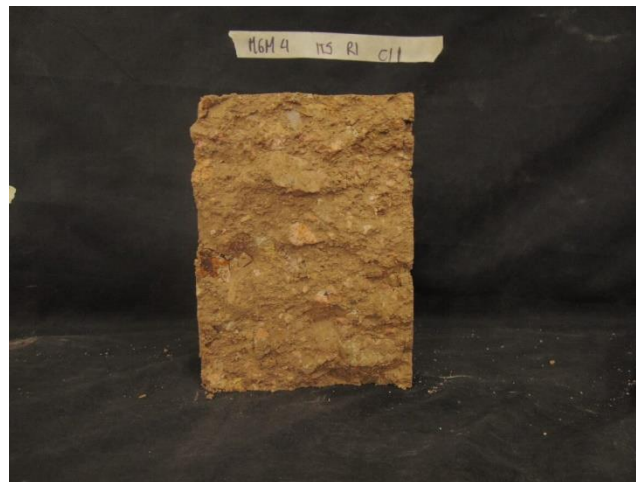


Figura 14

MGM1 UCS superior



Figura 15

MGMI UCS Frontal



Figura 16

MGM1 Post ensayo superior



Figura 17

MGM1 Post ensayo frontal



Figura 18.

MGM3 UCS superior

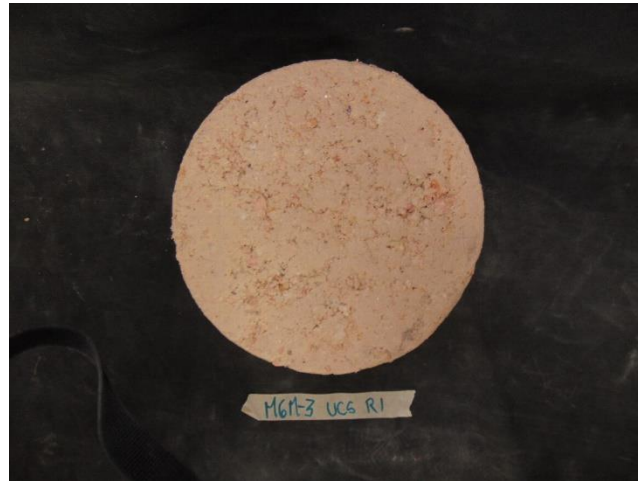


Figura 19.

MGM3 UCS frontal

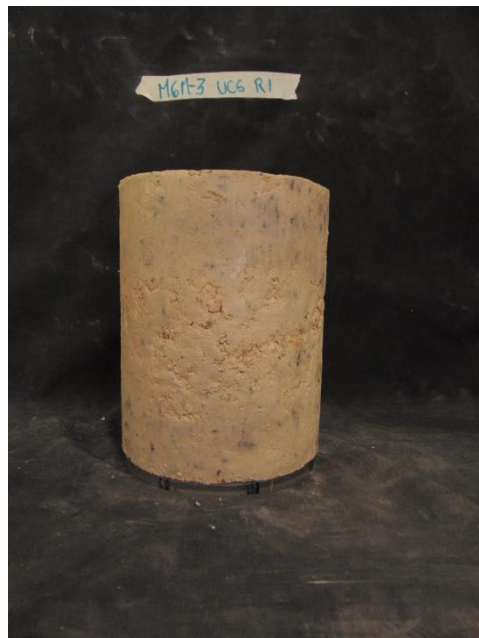


Figura 20.

MGM3 Post ensayo superior

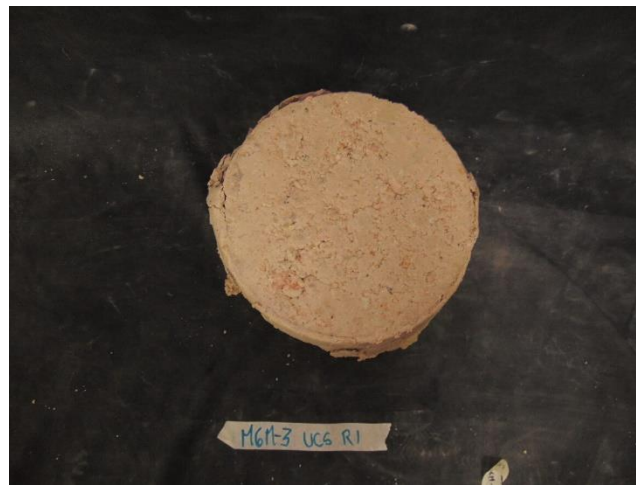


Figura 21.

MGM3 Post ensayo frontal

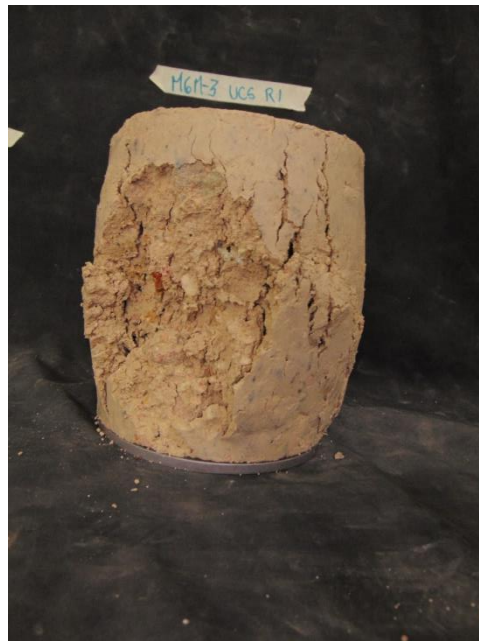


Figura 22.

MGM4 UCS superior.



Figura 23.

MGM4 UCS frontal



Figura 24

MGM4 Post ensayo superior

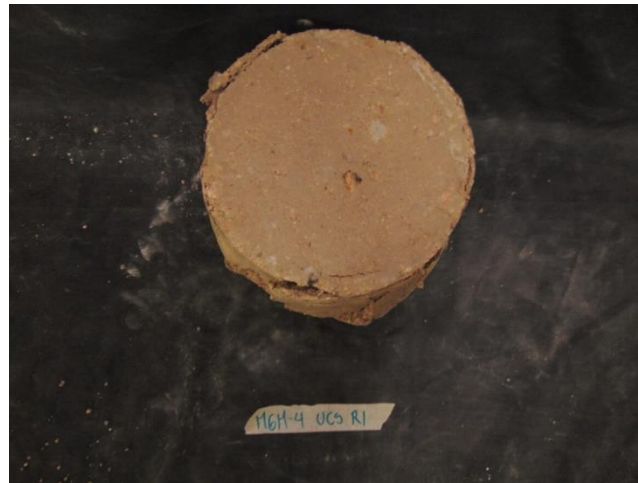
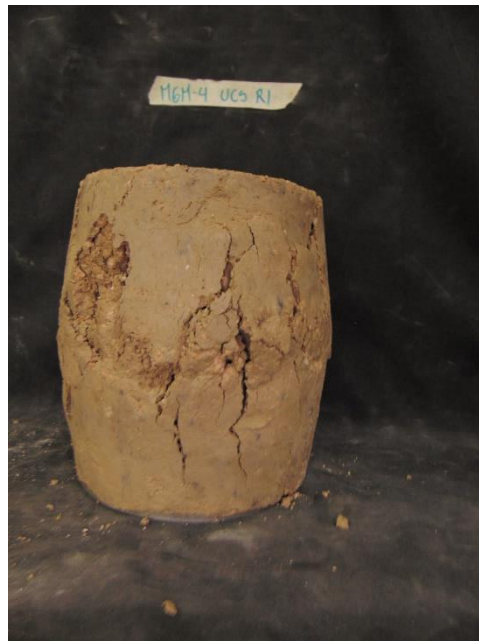


Figura 25

MGM4 Post ensayo frontal



Apéndice B. Toma de imágenes en 3D (ITS)

Figura 26.

MGM1 Cara1



Figura 26.

MGM1 Cara2

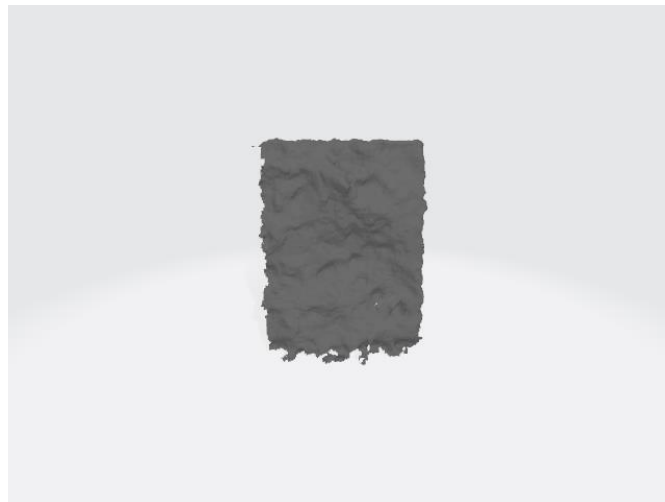


Figura 28.

MGM2 Cara1

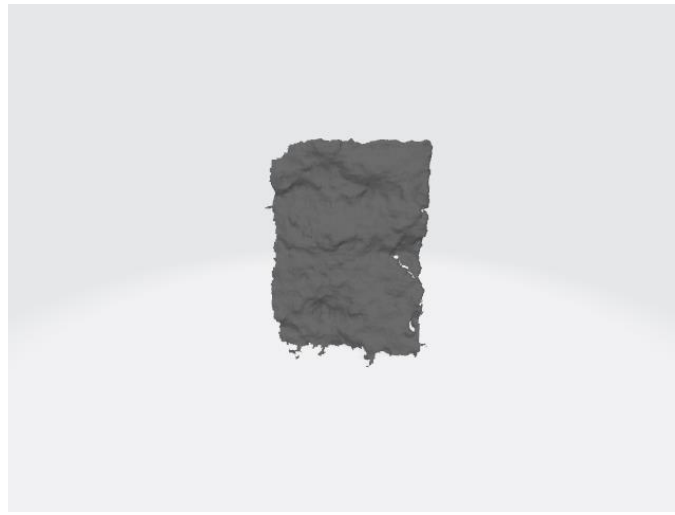


Figura 29.

MGM2 Cara2

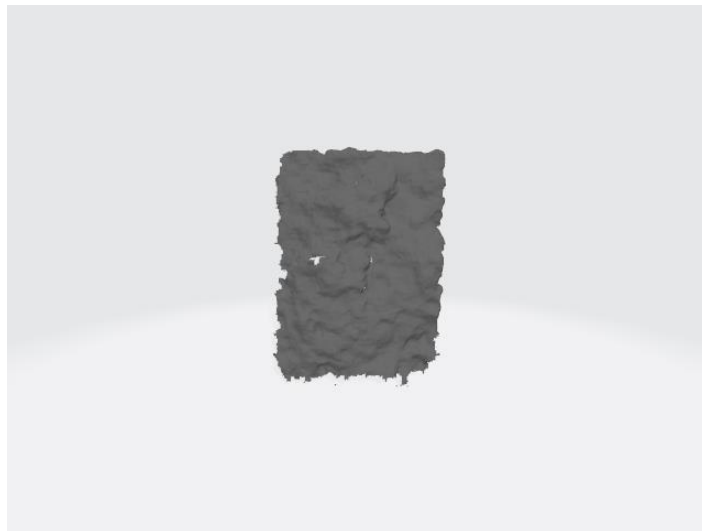


Figura 30.

MGM3 Cara1



Figura 31.

MGM3 Cara2

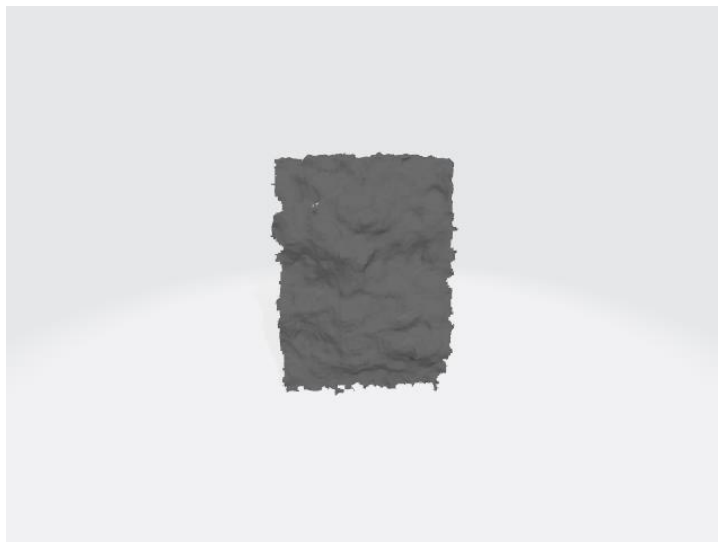


Figura 32.

MGM4 Cara1

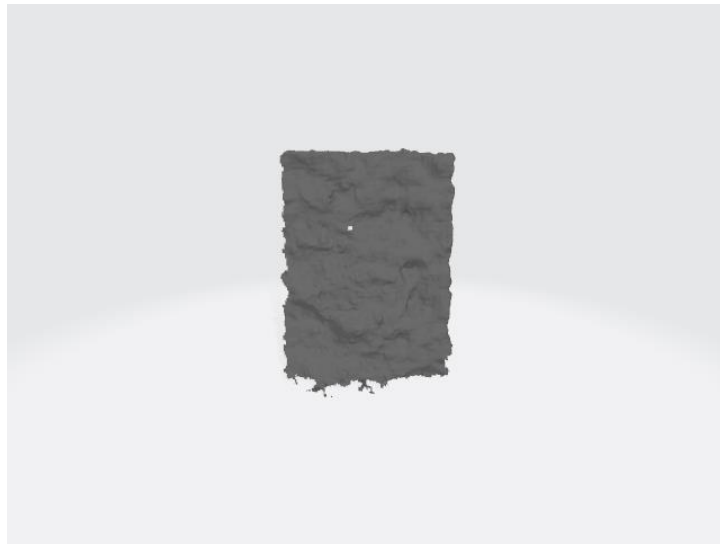


Figura 33.

MGM4 Cara2

