

Evaluación del Comportamiento Mecánico de Materiales Granulares Marginales para Uso en
Capas de Subbase Granular en Vías de Bajo Volumen de Tránsito (MGM 5-6-7-8)

Carlos Daniel Martínez Álvarez, Álvaro José Arroyo Arrieta

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Alex Eduardo Álvarez Lugo

Ingeniero civil Ph. D

Codirector:

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Ingeniero civil Ph. D

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánica

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Agradecimientos

Queremos aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que nos han ayudado y nos han apoyado a lo largo de estos años de academia como estudiantes de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander.

En primer lugar, darle gracias a Dios, a nuestras familias por todo el apoyo brindado y a todos nuestros profesores, en especial a Alex Álvarez y Vladimir Merchán, quienes fueron nuestros guías en el desarrollo de este proyecto. Gracias

Contenido

	Pág.
Introducción.....	11
1. Marco Teórico.....	14
1.1 Materiales Granulares Marginales (MGM)	14
1.2 Módulo Resiliente (MR).....	15
1.3 Ensayo Triaxial Dinámico	15
1.4 Gravedad Específica.....	17
1.5 Evaluación de Calidad.....	18
1.5.1 Micro-Deval.....	19
1.5.2 Solidez en Sulfato de Sodio	20
1.5.3 Equivalente de Arena.....	21
1.5.4 Contenido de Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables.....	22
1.6 Curvas de Compactación	23
2. Descripción General.....	23
2.1 Subbase Granular SBG-C1 (Paviandi)	23
2.2 Información General sobre la Distribución de Ensayos de Laboratorio	24
3. Metodología.....	27
3.1 Protocolos de Ensayo	27
3.2 Tamizado de Subbase Granular SBG-C0	27
3.3 Evaluación de Calidad.....	28

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES GRANULARES	4
3.3.1 Equivalente de Arena.....	28
3.3.2 Degradación por Abrasión en el Equipo Micro-Deval.....	28
3.3.3. Solidez en Sulfatos	29
3.3.4 Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables	30
3.4 Medición de Gravedad Específica de Sólidos	30
3.4.1 Gravedad Específica de Gravas.....	31
3.4.2 Gravedad Específica de Arenas.....	32
3.4.3 Gravedad Específica de Finos	33
3.5 Ensayo Triaxial Dinámico y Determinación del Módulo Resiliente	34
4. Análisis y Resultados	35
4.1 Curvas de Compactación	35
4.2 Datos de MGMs Compactados	36
4.3 Módulo Resiliente Después de Compactación	37
4.4 Trayectoria de Secado y Humedecimiento	39
4.5 Módulo Resiliente en Trayectoria de Secado	41
4.6 Ensayos de Calidad	46
4.7 Gravedad Específica	47
5. Conclusiones	48
6. Recomendaciones.....	49
Referencias Bibliográficas.....	50
Apéndices	53

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Equipo para Ensayo Triaxial Dinámico Ubicado en el Centro de Caracterización de Materiales-UIS</i>	17
Figura 2. <i>Muestra Material de Ensayo de Gravedad Específica de Gravas y Finos</i>	17
Figura 3. <i>Equipo Micro-Deval para Ensayo de Degradación por Abrasión INV E-238-13</i>	20
Figura 4. <i>Muestra de Gravas Ensayo Solidez en Sulfato</i>	21
Figura 5. <i>Material Durante Ensayo de Equivalente de Arena</i>	22
Figura 6. <i>Inmersión de Material Grueso y Fino Durante Ensayo de Contenido de Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables</i>	22
Figura 7. <i>Curvas de Compactación de MGM 5 y MGM 6 para la Fabricación de Probetas con Humedad Óptima</i>	23
Figura 8. <i>Granulometría de Control y Variación en Contenido de Finos 21% y 24%</i>	26
Figura 9. <i>Banda Granulométrica de SBG-38 INVIAS y Granulometría de Diseño SBG-C1</i>	26
Figura 10. <i>Preparación de Muestra y Equipo Micro-Deval para Realizar el Ensayo de Degradación por Abrasión</i>	29
Figura 11. <i>Material Fino y Grueso durante Ensayo Solidez en Sulfato de Sodio</i>	29
Figura 12. <i>Lavado del Material sobre Tamiz Especificado en Ensayo de Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables</i>	30
Figura 13. <i>Material de Gravas para Medición Gravedad Específica</i>	32
Figura 14. <i>Material Arenas para Medición Gravedad Específica</i>	33

Figura 15. *Pasa No 200 Medición de Gravedad Específica*.....33

Figura 16. *Montaje de Probeta para Ensayo Triaxial Dinámico*35

Figura 17. *Densidad Seca vs Humedad de MGM 7 y MGM 8*36

Figura 18. *Módulos Resilientes Obtenidos Después de Compactación de MGM 5 y MGM 6. Ambos con 21% de Finos*37

Figura 19. *Módulos Resilientes Obtenidos Después de Compactación de MGM 7 y MGM 8. Ambos con 24% de Finos*38

Figura 20. *Módulos Resilientes Obtenidos Después de Compactación de MGM 5 y MGM 8. Ambos con 12% de IP.*39

Figura 21. *Trayectoria de Secado de MGMs para Alcanzar Humedad Óptima de Compactación Menos dos Puntos Porcentuales*40

Figura 22. *Humedecimiento para Corrección de Humedad Objetivo (Humedad Óptima de Compactación Menos dos Puntos Porcentuales)*41

Figura 23. *Módulos Resilientes Obtenidos Después de Trayectoria de Secado de los Cuatro MGMs en Estudio*42

Figura 24. *Módulos Resilientes Después de Compactación vs Trayectoria de Secado de MGM 5 y MGM 6. Ambos con 21% de Finos*43

Figura 25. *Módulos Resilientes Obtenidos Después de Compactación vs Trayectoria de Secado de MGM 7 y MGM 8. Ambos con 24% de Finos*44

Figura 26. *Módulos Resilientes Obtenidos Después de Compactación vs Trayectoria de Secado de MGM 5 y MGM 8. Ambos con 12% de IP*45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Especificaciones del PG-3 Art. 330 para Uso de Materiales Granulares Marginales...</i>	14
Tabla 2. <i>Requisitos de los Agregados para Subbases Granulares</i>	18
Tabla 3. <i>Distribución Ensayos de Calidad y Respuesta Mecánica de MGMs</i>	24
Tabla 4. <i>Materiales y Porcentajes Respecto a La masa de Fondo de la Granulometría de Diseño para Lograr una Mezcla con IP=15%.....</i>	27
Tabla 5. <i>Contenido de Arenas según Granulometría de Diseño</i>	32
Tabla 6. <i>Información sobre Probetas MGMs Después de Compactación del Material.....</i>	36
Tabla 7. <i>Control de Masa de Probetas de MGMs para Lograr Humedad Objetivo</i>	40
Tabla 8. <i>Módulo Resiliente Promedio Después de Compactación y Después de Trayectoria de Secado</i>	45
Tabla 9. <i>Evaluación de Calidad Material PAVIANDI SBG-C1</i>	46
Tabla 10. <i>Valores de Gravedad Específica Aparente de Sólidos (Gravas, Arenas y Finos)</i>	47
Tabla 11. <i>Gravedad Específica Aparente para Cada Probeta de MGM</i>	47

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. <i>Granulometría de Diseño</i>	53
Apéndice B. <i>Gravedad Específica Aparente de Sólidos</i>	54
Apéndice C. <i>Evaluación de Calidad</i>	57
Apéndice D. <i>Cálculo Módulo Resiliente</i>	60
Apéndice E. <i>Imágenes</i>	68

Resumen

Título: Evaluación del Comportamiento Mecánico de Materiales Granulares Marginales para Uso en Capas de Subbase Granular en Vías de Bajo Volumen de Tránsito (MGM 5-6-7-8)*

Autores: Carlos Daniel Martínez Álvarez, Álvaro José Arroyo Arrieta**

Palabras clave: Módulo resiliente (MR), materiales granulares marginales (MGMs), trayectoria de secado, curva de compactación.

Descripción

El presente proyecto de investigación experimental estudia el comportamiento mecánico de cuatro materiales granulares marginales (MGMs) con índices de plasticidad (IP) del 8%, 12% y 15% y un contenido de finos del 21% y 24%, determinando su respuesta mecánica a través del ensayo triaxial dinámico, para el posible uso de estos materiales en capas de subbase granular en vías de bajo volumen de tránsito. Se estudian estos MGMs para determinar la influencia del IP y porcentaje de finos en el comportamiento mecánico de probetas compactadas de estos materiales. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó la compactación de cada material con el compactador giratorio después de realizada la mezcla de gravas, arenas y finos, con la humedad óptima, en las proporciones definidas por la granulometría de diseño. Por otra parte, se estudió el efecto de una trayectoria de secado (humedad óptima menos dos puntos porcentuales) en la respuesta mecánica de estas probetas. Los resultados sugieren que el módulo resiliente medido en condición inicial (después de compactación), comparado con el estado seco fue inferior, por lo que se concluye que una de las variables que más influyen en el comportamiento mecánico de los materiales granulares es el contenido de humedad, que está asociado a la succión desarrollada por estos MGMs. Para los materiales con el mismo índice de plasticidad, una leve variación en el porcentaje de finos no representó grandes cambios en la respuesta mecánica en condición de humedad óptima.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicomecánica. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Allex Eduardo Álvarez Lugo, Ingeniero civil Ph. D. Codirector: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Ingeniero civil Ph. D

Abstract

Title: Evaluation of the Mechanical Behavior of Marginal Granular Materials for Use in Granular Subbase Layers on Low Traffic Volume Roads (MGM 5-6-7-8)*

Authors: Carlos Daniel Martínez Álvarez, Álvaro José Arroyo Arrieta **

Keywords: Resilient modulus (RM), marginal granular materials (MGMs), drying path, compaction curve.

Description

This experimental research project studies the mechanical behavior of four marginal granular materials (MGMs) with plasticity indices (PI) of 8%, 12%, and 15% and fines content of 21% and 24%. The mechanical response of these materials was assessed through dynamic triaxial testing for the possible use of these materials as granular subbase layers in low-volume traffic roads. These MGMs are studied to determine the influence of the PI and fines content on the mechanical behavior of compacted specimens. Specimen compaction was performed (using the gyratory compactor) after mixing fractions of gravel, sand, and fines, with the optimum moisture content, in the proportions defined by the design gradation. On the other hand, the effect of a drying trajectory (moisture content two percentage points below the optimum moisture content) on the mechanical response of these specimens was studied. Results suggest that the resilient modulus measured in the initial condition (after compaction) compared to the dry state was lower. These results suggest that one of the variables that most influences the mechanical behavior of granular materials is the moisture content, which is related to the suction developed in these materials. For the same particle size and PI, a slight variation in the fines content did not represent significant changes in the mechanical response of the MGMs evaluated at optimum moisture content.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Alex Eduardo Álvarez Lugo, Civil Engineer Ph. D. Co-director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Civil Engineer Ph. D

Introducción

Se estima que la red vial en Colombia posee aproximadamente 204.855 km, de los cuales 17.434 km constituyen la red nacional y se encuentran debidamente identificados e inventariados. Las vías de bajo volumen de tránsito (o vías terciarias), representan un 69.09% (142.284 km) del total de la infraestructura vial existente; estas en su mayoría se encuentran a cargo de los municipios para su revisión periódica y mantenimiento. En estos tramos de carretera, la mayoría de sus caminos son trochas en tierra o con un inestable afirmado y con insuficiencias en obras de drenajes, por lo que su uso será limitado, ya que sólo serán transitables en temporadas de poca o nula precipitación.

Los entes encargados de estas vías invierten con poca o ninguna frecuencia a los mantenimientos preventivos a los que debe ser sometida la carretera, estos caminos solo se atienden cuando su tránsito se ve afectado por deslizamientos, avenidas torrenciales u otros factores ambientales que afecten su normal desempeño lo cual impedirá la comunicación entre cabeceras municipales con sus veredas o veredas entre sí (López, 2022). Esta problemática conlleva a la desaceleración económica y social del territorio colombiano, ya que estas vías permiten la circulación de personas, transporte de alimentos, y mercancías que impulsan el crecimiento del país.

Como solución a esta problemática el Estado Colombiano ha implementado diferentes iniciativas para realizar mejoras en la infraestructura de vías terciarias, pero en la mayoría de veces prevalece el mismo inconveniente, la carencia de materiales granulares tradicionales de buena calidad que cumplan con las especificaciones técnicas estipuladas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) para su uso en obras viales, comúnmente utilizado por sus características de alta

resistencia a la fricción y drenaje libre. Adicionalmente, el uso de materiales disponibles localmente, que se pueden encontrar en o cerca del sitio de construcción, se está convirtiendo en un tema desafiante para las aplicaciones geotécnicas.

Por estas razones es necesario encontrar soluciones viables, como el hecho de emplear materiales granulares marginales (MGMs), considerados como materiales que no se ajustan totalmente a las especificaciones definidas por una agencia vial para un país o una región, para ser implementados en pavimentación, pero que puede utilizarse con éxito, ya sea en condiciones climáticas especiales o tras el progreso de las técnicas de construcción o el tratamiento para mejorar sus propiedades (Sandoval, y otros, 2019).

Hoy en día, las investigaciones que existen sobre MGMs están enfocadas al aprovechamiento para la construcción de rellenos en terraplén y, aunque son muy pocos los estudios relacionados sobre su uso en estructuras de pavimento de vías de bajo volumen de tránsito, la utilización de materiales marginales se está convirtiendo en algo habitual, y muchas autoridades prefieren estos materiales para poder hacer viable económicamente la construcción o rehabilitación de dichas carreteras (Liebenberg & Visser, 2003).

Este proyecto de investigación está enfocado en evaluar, mediante ensayos realizados en laboratorio, el comportamiento mecánico de MGMs para uso en capas de subbase granular en vías de bajo volumen de tránsito. Debido al papel protagónico que tienen las condiciones ambientales y el cambio de humedad en la rigidez de los materiales de un pavimento, se pretende cuantificar la rigidez de MGMs después de realizar modificaciones en su contenido de humedad, a través de dos ensayos triaxiales dinámicos, uno bajo la condición de compactación y otro después de acondicionamiento en seco. Los resultados obtenidos en laboratorio permitirán conocer más sobre la respuesta mecánica de los MGMs cuando sean usados como subbase granular en

pavimentos de vías de bajo volumen de tránsito, siendo esto un aporte para futuras investigaciones sobre este tipo de materiales y su uso en este tipo de vías.

1. Marco Teórico

A continuación, se definen los aspectos teóricos relevantes para esta investigación.

1.1 Materiales Granulares Marginales (MGM)

La especificación colombiana en su artículo 320-13 (Invias, 2013), clasifica los suelos en cuatro grupos (seleccionados, adecuados, tolerables, e inadecuados), clasificando a los materiales marginales dentro del grupo de suelos inadecuados, provocando menos disponibilidad de materiales para la construcción de vías terciarias. Por otro lado, la normativa española para construcción de carreteras, en el Artículo. 330 del PG-3, clasifica los suelos en cinco grupos específicos (seleccionados, adecuados, tolerables, marginales, e inadecuados) en función de sus características, tales como: plasticidad, contenido de materia orgánica, colapsabilidad, expansividad, y CBR (Cáceres & Rodríguez, 2021, pág. 49). A continuación, en la tabla 1 se presentan las especificaciones del PG-3 para uso de MGMs.

Tabla 1.

Especificaciones del PG-3 Art. 330 para Uso de Materiales Granulares Marginales

Tolerancia	Parámetro
1% <	Asiento en ensayo de colapso
5% >	Contenido de materia orgánica
3% < HL < 5%	Hinchamiento (expansión) libre (HL)
3% ≤	CBR (Relación de soporte de California)

Nota: Cano, H. & Perucho, A. (2015). Spanish experiences with marginal and special materials on the construction of road embankments. *Ingeniería Civil (Madrid)*; CODEN ICIVE7; v. 179; p. 115-130

1.2 Módulo Resiliente (MR)

El módulo resiliente es una medida de la capacidad de un material para almacenar o absorber energía sin que experimente deformación permanente. Este es sometido a un esfuerzo cíclico en diferentes niveles (con una condición particular de humedad y densidad), que simula los estados de esfuerzos que experimenta el material al ser empleado en una capa de base o subbase granular de un pavimento. Típicamente, el módulo resiliente se determina a través de pruebas de laboratorio como el ensayo triaxial dinámico (Múnera & Aguiar, 2020).

Durante pruebas de carga repetida se observa que después de un cierto número de ciclos de carga, el módulo llega a ser aproximadamente constante y la respuesta del suelo puede adoptarse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama módulo resiliente (Moreno Rubio, 2005).

1.3 Ensayo Triaxial Dinámico

El ensayo consiste en la aplicación de cargas de confinamiento y axial, a una muestra cilíndrica de suelo, tratando de simular la frecuencia y magnitud de las cargas que en la vida de servicio podría estar sometida una muestra de material vial (Mamani, 2013). El equipo triaxial dinámico normalmente está dotado de instrumentación electrónica para determinar la deformación, carga axial repetida, y presión de confinamiento de la probeta. En el método A (presión de confinamiento variable) de la norma española UNE-EN 13286-7, se aplica un esfuerzo desviador axial cíclico y una presión de celda (o presión de confinamiento) cíclica variable, que varían en fase. También se puede adoptar un régimen de esfuerzos simplificados, con un esfuerzo desviador axial cíclico y una presión de confinamiento constante, método B (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2008). En este mismo método de ensayo se proponen tres procedimientos para su realización, los cuales se resumen a continuación.

Procedimiento para el estudio del comportamiento elástico: los resultados del ensayo se emplean para determinar valores del módulo resiliente del material para diferentes niveles de esfuerzo, o parámetros de modelos elásticos no lineales, que se puedan utilizar en los procedimientos de diseño analítico y numérico de pavimentos (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2008)..

Procedimiento para el estudio de deformaciones permanentes: este procedimiento se puede utilizar para determinar deformaciones permanentes del material para un nivel de esfuerzo particular, o parámetros de modelos de predicción de deformaciones permanentes, que se puedan usar para el diseño y análisis de pavimentos (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2008).

Procedimiento multietapas: Este procedimiento se puede utilizar para evaluar rápidamente deformaciones permanentes producidas por diferentes niveles de esfuerzo. Consiste en aplicar sucesivamente a la misma probeta, varias secuencias de carga, con niveles de esfuerzos que van aumentando, hasta que la deformación axial permanente acumulada supera un límite especificado (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2008). .

En la figura 1 se presenta el equipo para el ensayo triaxial dinámico para la determinación del módulo resiliente de las probetas de estudio, el cual se encuentra en el Centro de caracterización de materiales de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Figura 1.

Equipo para Ensayo Triaxial Dinámico Ubicado en el Centro de Caracterización de Materiales-UIS

**1.4 Gravedad Específica**

La gravedad específica se conoce como la relación entre la densidad de un material y la densidad del agua a una temperatura indicada. Su valor es adimensional (Invias, 2013).

Esta propiedad de los materiales es en general la más utilizada para determinar el volumen ocupado por los sólidos que conforman suelos.

Los valores de gravedad específica obtenidos en esta investigación corresponden a la gravedad específica aparente. En la figura 2 se presentan algunas muestras de materiales durante los ensayos de gravedad específica correspondientes.

Figura 2.

Muestra Material de Ensayo de Gravedad Específica de Gravas y Finos



1.5 Evaluación de Calidad

Para evaluar la calidad de una subbase granular, es necesario disponer de un referente con el cual comparar. En este proyecto se utilizó la norma INVIAS en su Artículo 320-13 (Invias, 2013), donde se especifican las condiciones dadas que debe tener un material para su uso como subbase granular dependiendo del nivel de tránsito al que será sometido durante su vida útil. En la tabla 2 se muestran los requisitos de calidad que deben satisfacer los agregados ensayados para desempeñarse adecuadamente como material tipo subbase granular.

Tabla 2.

Requisitos de los Agregados para Subbases Granulares

Característica	Norma de Ensayo INV	Sub-Basegranular		
		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
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	E-220			
- Sulfato de sodio		12	12	12
- Sulfato de magnesio		18	18	18
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	25	25
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	25	25	25

Característica	Norma de Ensayo INV	Sub-Basegranular		
		Clase	Clase	Clase
		C	B	A
Contenido de terrones de arcilla y partículas delezna- bles, máximo (%)	E-211	2	2	2
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo.	E-148	30	30	40

Nota: Invias (2013). Capítulo 3. Afirmados subbases y bases. Art 320.

1.5.1 Micro-Deval

El equipo utilizado para realizar este ensayo corresponde al presentado en la figura 3.

Este ensayo de calidad es una medida de la resistencia a la abrasión y de la durabilidad de agregados pétreos, como resultado de una acción combinada de abrasión y molienda con esferas de acero en presencia de agua. Los resultados del ensayo son útiles para juzgar la resistencia (tenacidad/abrasión) de agregados sujetos a abrasión, cuando no existe información adecuada sobre este tipo de comportamiento (Invias, 2013).

Figura 3.

Equipo Micro-Deval para Ensayo de Degradación por Abrasión INV E-238-13

**1.5.2 Solidez en Sulfato de Sodio**

Cuando no se tienen datos del comportamiento de los materiales a utilizar sometidos a las condiciones climatológicas de servicio, es posible obtener información relevante a través de este ensayo para evaluar la resistencia que tienen los agregados ante tales condiciones.

A partir de este método se proporciona un procedimiento para la evaluación preliminar de la solidez de los agregados utilizados para la elaboración de concretos y para otros fines. Los valores obtenidos se pueden comparar con los indicados en las especificaciones para determinar la idoneidad del agregado para un uso determinado. Debido a la baja precisión de este método de ensayo, no es posible rechazar agregados que no cumplan con las especificaciones sin antes confirmar los resultados de otros ensayos que son más relevantes para el uso previsto del material (Invias, 2013).

En la figura 4 se presenta una muestra de grava utilizada para este ensayo de calidad.

Figura 4.

Muestra de Gravas Ensayo Solidez en Sulfato

**1.5.3 Equivalente de Arena**

El procedimiento a seguir para ejecutar este ensayo de calidad se encuentra en la norma INV E-133-13 (Invias, 2013). El propósito de este ensayo es determinar las proporciones relativas de polvo y material arcilloso o finos plásticos presentes en suelos o agregados finos menores a 4.75 mm bajo condiciones estandarizadas, y de esta forma, caracterizar el material usado para construcción de carreteras.

El término “equivalente de arena” expresa el concepto de que la mayoría de los suelos granulares y los agregados finos son mezclas de arena y partículas gruesas deseables, y de polvo y finos arcillosos o plásticos indeseables (Invias, 2013) .

A continuación, en la figura 5 se presenta el material sumergido en la solución de trabajo como parte del proceso en la realización de este ensayo.

Figura 5.

Material Durante Ensayo de Equivalente de Arena

**1.5.4 Contenido de Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables**

Los agregados podrían contener elementos que pueden ser perjudiciales al incrementar los requerimientos de ligantes en las mezclas asfálticas y en una subbase granular los finos promueven el transporte de humedad debido a la ascensión capilar, además de que al recubrir las partículas de agregado reducen la fricción que podrían desarrollar las fracciones de grava y arena. Este ensayo de calidad se refiere a la determinación aproximada de los terrones de arcilla y de las partículas deleznables (friables) en los agregados según la norma INV E-211-13 (Invias, 2013). En la figura 6 se muestra el proceso de inmersión del material requerido para este ensayo.

Figura 6.

Inmersión de Material Grueso y Fino Durante Ensayo de Contenido de Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables

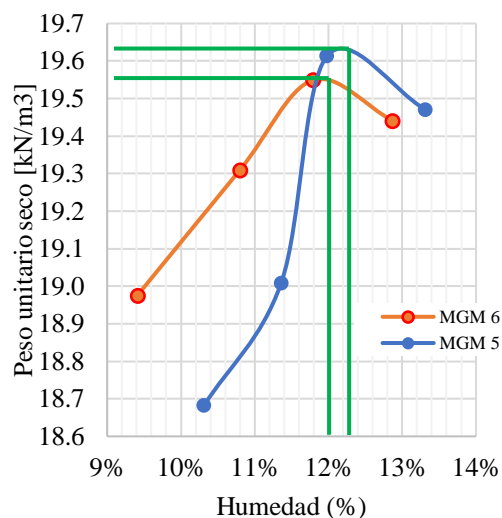


1.6 Curvas de Compactación

Las curvas de compactación muestran la relación entre el peso unitario seco y el contenido de humedad de un suelo compactado. En la figura 7 se presentan las curvas de compactación de los MGMs 5 y 6 obtenida por otros autores (Angarita & Acevedo, 2022).

Figura 7.

Curvas de Compactación de MGM 5 y MGM 6 para la Fabricación de Probetas con Humedad Óptima



2. Descripción General

2.1 Subbase Granular SBG-C1 (Paviandi)

Las probetas de MGMs 5, 6, 7, y 8 están compuestas por partículas sólidas de gravas y arenas que en su totalidad son agregados proveniente de la cantera Paviandi (ubicada en la vía Piedecuesta-Aratoca en Santander), mientras que el contenido de finos presente en ellas son una combinación entre material paviandi y otro tipo de materiales. Este material (SBG-C1) presenta

una característica particular, y es el hecho de superar el porcentaje de desgaste máximo (i.e 50%) en la máquina de los Ángeles definido por el INVIAS (ver tabla 2).

2.2 Información General sobre la Distribución de Ensayos de Laboratorio

Teniendo en cuenta que para esta investigación se tienen como referente dos materiales de control provenientes de diferente cantera, SBG-C1 (Paviandi) y SBG-C0 (Construcciones Sánchez), se requiere evaluar la calidad del material empleado para la preparación de las probetas en estudio (SBG-C1). El material de control SBG-C0, a diferencia del material Paviandi, cumple con todos los ensayos de calidad para subbases granulares, incluyendo el desgaste en la máquina de los ángeles.

La tabla 3 muestra que este proyecto de investigación experimental contempla el estudio de cuatro probetas de MGMs con diferentes IP y contenido de finos, y además la evaluación de calidad y gravedad específica del material de cantera de paviandi (SBG-C1). Cabe mencionar que antes de realizar los ensayos en el laboratorio se tamiza el material de cantera SBG-C1 y se recombina según la granulometría de diseño para fabricar las probetas de MGMs en estudio.

A continuación, se presenta la distribución de los ensayos realizados en laboratorio para la evaluación de calidad del material SBG-C1 (cantera Paviandi), así como también los ensayos para la evaluación de la respuesta mecánica de los MGMs 5,6,7 y 8.

Tabla 3.

Distribución Ensayos de Calidad y Respuesta Mecánica de MGMs

	Código del material			
	MGM 5	MGM 6	MGM 7	MGM 8
Índice de plasticidad	8%		X	
	12%	X		X
	15%		X	

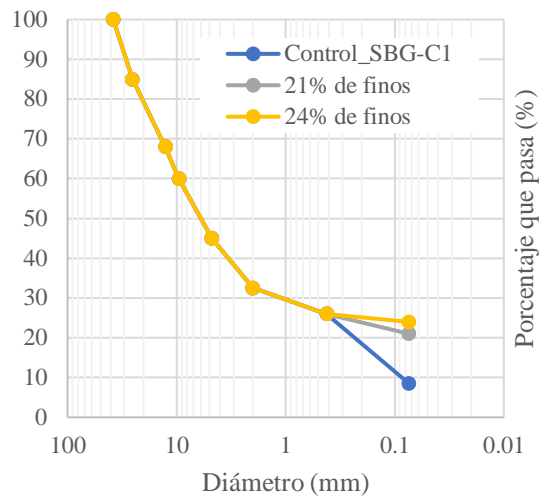
		Código del material			
		MGM 5	MGM 6	MGM 7	MGM 8
Contenido de finos	21%	X	X		
	24%			X	X
Curvas de compactación				1	1
Evaluación de calidad		Micro-Deval, equivalente de arena, contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, solidez en sulfatos.			
Gravedad específica		Cantera (pasa tamiz #200 SBG-C1), caolinita, bentonita, triturado, material pasa tamiz #200 de SBG-C0			
Ensayo triaxial dinámico		2	2	2	2

En esta investigación no se incluyen todos los ensayos de calidad para el material de cantera SBG-C1, ya que existen otros proyectos que asumen dicha labor.

La granulometría de diseño empleada para determinar las proporciones con las cuales se va a realizar la probeta a ensayar de cada MGM presenta una alteración intencional en el contenido de finos como se muestra en la figura 8, superando el máximo valor contemplado en las especificaciones de la norma INVIAS para subbases granulares SBG-38 (Invias, 2013) y así poder estudiar la influencia de la fracción fina en la respuesta mecánica de los materiales.

Figura 8.

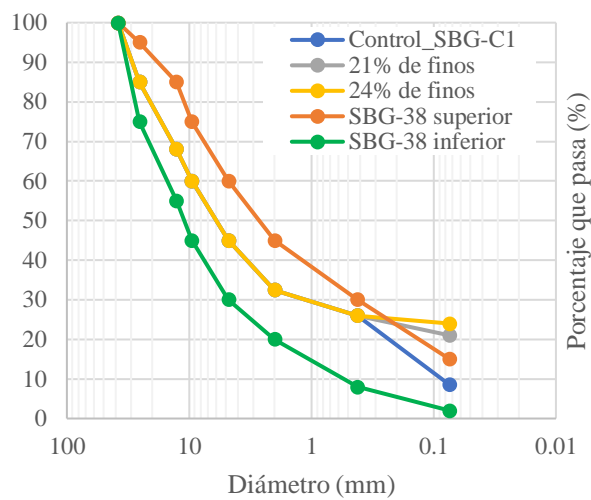
Granulometría de Control y Variación en Contenido de Finos 21% y 24%



En la figura 9 se presenta la banda granulométrica para subbase granular SBG-38 y la granulometría de diseño para el material de control SBG-C1.

Figura 9.

Banda Granulométrica de SBG-38 INVIAS y Granulometría de Diseño SBG-C1.



3. Metodología

Con el fin de lograr los objetivos planteados en este trabajo de grado, se presenta a continuación la metodología empleada durante el desarrollo de esta investigación.

Teniendo en cuenta los antecedentes suministrados en el proyecto de investigación realizado por Martínez. J & Vargas. J (2022), se identificó y siguió esta metodología que proporciona información sobre el contenido de finos necesarios para alcanzar una mezcla con índice de plasticidad (IP) del 15% haciendo uso del material que pasa el tamiz No 200 de cantera paviandi estudiado en este trabajo junto a material pasa tamiz No 200 de caolinita y bentonita, que una vez combinados en las fracciones de la tabla 4 cumplirán la condición deseada $IP=15\%$.

Tabla 4.

Materiales y Porcentajes Respecto a La masa de Fondo de la Granulometría de Diseño para Lograr una Mezcla con $IP=15\%$

Fondo	IP	Bentonita	Cantera paviandi	Caolinita
Porcentaje respecto a masa de fondo (pasa No.200)	[%]	[%]	[%]	[%]
	15	2,34	48,83	48,83

Nota: Martínez, J. & Vargas, J. (2022)

3.1 Protocolos de Ensayo

Para realizar los ensayos de calidad del material SBG-C1 (Paviandi) se estudiaron los procedimientos teniendo en cuenta su respectiva norma de ensayo INVIAS.

3.2 Tamizado de Subbase Granular SBG-C0

Para el tamizado de este material traído al laboratorio (SBG-C0), desde la cantera “Sánchez Construcciones” en la vía a Curos, se repartió el material en sacos para posteriormente ser tamizado

de forma manual en cantidades comprendidas entre 700 g y 1000 g, usando los tamices 1 ½”, 1”, ½”, 3/8”, y No. 4. El material que pasa este último tamiz se recogió en una bandeja metálica y haciendo uso de la tamizadora y los tamices No. 10, No. 40, No. 200 y fondo, se obtuvo el material retenido en cada fracción, almacenándolos por separado en sacos.

3.3 Evaluación de Calidad

Para contar con una evaluación de calidad del material SBG-C1 (Paviandi) se realizaron ensayos de evaluación de calidad tales como Micro-Deval, solidez en sulfatos, equivalente de arena, contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable. Los resultados obtenidos en los ensayos realizados fueron comparados con los requisitos de los agregados para subbases granulares consignados en el artículo 320 de las especificaciones INVIAS (Invias, 2013).

3.3.1 Equivalente de Arena

En el desarrollo de este ensayo, se tuvo en cuenta la metodología descrita en la norma INV E – 133-13 (Invias, 2013). Para la muestra a ensayar, se deben obtener las proporciones indicadas por la norma teniendo en cuenta la granulometría de diseño del material de control SBG-C1. Cabe mencionar que este ensayo tuvo 3 réplicas con el fin de cuantificar la variabilidad entre ellos y poder tener mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.

3.3.2 Degradación por Abrasión en el Equipo Micro-Deval

Después de la revisión y comprensión de las normas INV E-238-13 (Invias, 2013) e INV E-245-13 (Invias, 2013) para gravas y arenas respectivamente, se siguió la metodología sugerida por estas para el desarrollo del ensayo, teniendo en cuenta cada una de las solicitudes y requerimientos allí descritos. Se utilizó el equipo micro-deval ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará, en Piedecuesta, para llevar a cabo la prueba. (ver figura 3).

En la figura 10 se presenta la preparación de la muestra en el cilindro del equipo micro-deval para realizar el ensayo.

Figura 10.

Preparación de Muestra y Equipo Micro-Deval para Realizar el Ensayo de Degradación por Abrasión



3.3.3. Solidez en Sulfatos

En la metodología utilizada para este ensayo, se inició con la revisión y comprensión de la norma INV E-220-13 (Invias, 2013), siguiendo paso a paso sus solicitudes y requerimientos. En este ensayo, realizado al material de gravas y finos se utilizó sulfato de sodio.

Figura 11.

Material Fino y Grueso durante Ensayo Solidez en Sulfato de Sodio



3.3.4 Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables

Empleando como referencia el método descrito en la norma INV E-211-13 (Invias, 2013), se comprendió y siguió la metodología suministrada para llevar a cabo este proceso de caracterización del material gravas y finos PAVIANDI, logrando cuantificar este parámetro en cada una de las fracciones que en la norma se describe.

El lavado del material sobre tamiz como parte del procedimiento de ensayo se muestra en la figura 12.

Figura 12.

Lavado del Material sobre Tamiz Especificado en Ensayo de Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables



3.4 Medición de Gravedad Específica de Sólidos

Para alcanzar un IP del 15% fue necesario el uso de material pasa tamiz No. 200 de la subbase granular SBG-C1, junto con caolinita y bentonita, y para cada uno de ellos se realizaron ensayos de gravedad específica de finos (INV E-128-13). (Invias, 2013) (ver anexo 2.3). También, bajo esta misma norma, se obtuvieron valores de gravedad específica (Gs) del material pasa tamiz No. 200 de la subbase granular SBG-C0.

Para determinar valores de G_s de las gravas y arenas de la subbase granular SBG-C1 que componen a los MGMs 5,6,7 y 8 se siguieron las normas de ensayo INV E-223-13 (Invias, 2013). e INV E-222-13 (Invias, 2013) respectivamente. (ver anexos 2.1 y 2.2).

Los valores obtenidos de gravedad específica de gravas, arenas y finos determinados como se mencionó anteriormente serán usados para calcular la gravedad específica del agregado combinado de cada probeta de MGM en estudio a través de la ecuación (López, 2022).

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_n}{\frac{P_1}{G_{sb1}} + \frac{P_2}{G_{sb2}} + \frac{P_n}{G_{sbn}}} \text{ (López, 2022)}$$

G_{sb} = Gravedad específica aparente del agregado combinado

P_i = Porcentaje de cada fracción i respecto a la masa total del agregado

G_{s_i} = Gravedad específica aparente de la fracción de agregado i

Los resultados de gravedad específica aparente del agregado combinado para cada MGM se muestran en el anexo 2.3.6.

3.4.1 Gravedad Específica de Gravass

La norma INV E-223-13 (Invias, 2013). describe el procedimiento que se debe seguir para obtener el valor experimental de gravedad específica de las gravas para el material de subbase SBG-C1. Dentro de la granulometría empleada en este material, las gravas se componen por las partículas comprendidas entre los tamices 1" (25.0 mm), 1/2" (12.5 mm), 3/8" (9.5 mm), hasta el tamiz retenido No. 4 (4.75 mm) de su composición de diseño. En la figura 13, se observa el material utilizado en la obtención de la masa mínima requerida por la norma para la realización del ensayo, teniendo en cuenta la granulometría de diseño del material SBG-C1.

Figura 13.*Material de Gravas para Medición Gravedad Específica***3.4.2 Gravedad Específica de Arenas**

Este ensayo de caracterización de material se le aplicará al material de cantera PAVIANDI, con la intención de cuantificar la gravedad específica del material utilizado en esta investigación. Para llevar a cabo este ensayo se tomó como referencia la norma INV E-222-13 (Invias, 2013), usando la granulometría de diseño para las fracciones de muestra necesarias para la evaluación, en la tabla 5 se observa el contenido de arenas para cada una de las probetas en estudio.

Tabla 5.*Contenido de Arenas según Granulometría de Diseño*

Material	Arenas
	Fracción [%]
MGM5	24
MGM6	24
MGM7	21
MGM8	21

Figura 14.

Material Arenas para Medición Gravedad Específica

**3.4.3 Gravedad Específica de Finos**

Bajo la revisión, comprensión y aplicación de la norma INV E-128-13 (Invias, 2013), se logró obtener la gravedad específica de partículas finas, la cual está comprendida por la granulometría de diseño del material SBG-C1, siendo este el material que pasa el tamiz No 200 (0.074mm). Adicionalmente, se les determinó este parámetro a los materiales denominados bentonita, caolinita y triturado, los cuales son usados para la obtención de IP requeridos en los MGMs de estudio. Este ensayo tuvo tres réplicas por cada uno de los finos de ensayo, con el fin de comparar la variabilidad entre resultados y aceptarlos.

Figura 15.

Pasa No 200 Medición de Gravedad Específica



3.5 Ensayo Triaxial Dinámico y Determinación del Módulo Resiliente

El ensayo triaxial dinámico se ejecutó para las cuatro probetas de MGMs de este proyecto de investigación, tanto en condición después de compactación como en trayectoria de secado (humedad óptima menos dos puntos porcentuales). Una vez se compacta el material para fabricar cada probeta en el compactador giratorio con su respectiva granulometría de diseño y humedad óptima, se procedió a realizar la medición del módulo resiliente en esta condición. El montaje de la probeta y la configuración utilizada para este ensayo se estableció por la metodología mencionada en la norma (AASHTO T 307-99, 2007).

Una vez finalizó el ensayo triaxial dinámico para cada probeta se procedió a llevarlas a una trayectoria de secado, es decir, alterar la humedad presente en la probeta, con el fin de conocer cómo se comportaba mecánicamente ante tal situación. Para lograrlo se dejaron las cuatro probetas (MGM 5,6,7 y 8) al ambiente apoyadas sobre bandejas metálicas. El objetivo fue disminuir dos puntos porcentuales el contenido de humedad inicial de cada probeta teniendo como punto de partida la humedad de compactación. Se llevó el control del peso de las probetas para garantizar la humedad objetivo. Una vez que las probetas llegaron a la humedad deseada se envolvieron en varias capas de papel vinipel y se almacenaron en cavas de forma individual por aproximadamente 10 días para lograr una humedad homogénea en toda la probeta, ya que en el proceso de secado las caras externas de estas son las que pierden más rápido la humedad.

Al cumplirse el tiempo de equilibrio (humedad homogénea) se procede a realizar el montaje de la probeta como se muestra en la figura 16, y la medición de módulo resiliente según la norma de ensayo AASHTO T307-99 del 2007 (AASHTO T 307-99, 2007).

Finalmente se procede a determinar el comportamiento mecánico para cada probeta de MGMs en las dos condiciones de ensayo, después de compactación y después de una trayectoria de secado.

Figura 16.

Montaje de Probeta para Ensayo Triaxial Dinámico



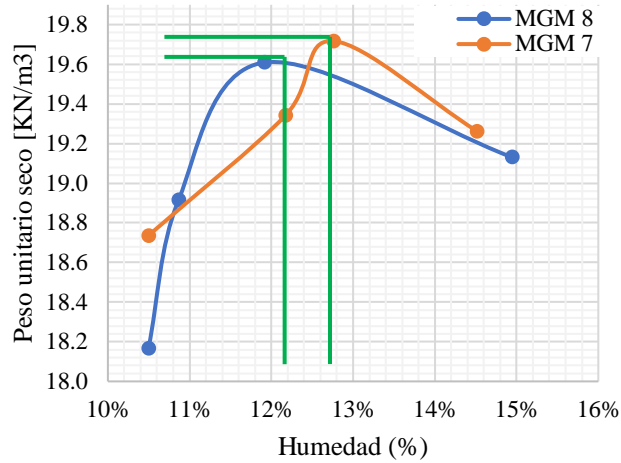
4. Análisis y Resultados

4.1 Curvas de Compactación

En la figura 17, se presenta la curva de compactación obtenida a partir de probetas generadas por compactación giratoria de los MGMs 7 y 8.

Figura 17.

Densidad Seca vs Humedad de MGM 7 y MGM 8



4.2 Datos de MGMs Compactados

En la tabla 6 se presenta información relevante sobre los MGMs después de compactación.

Tabla 6.

Información sobre Probetas MGMs Después de Compactación del Material

Material	Masa (kg)	H. opt (%)	H. probeta (%)	Ws (kg)	Ww (kg)	ρ_d (Kg/m³)
MGM 5	7,735	12,20	12,36	6,884	0,85	1947,8
MGM 6	7,662	11,91	11,73	6,857	0,80	1940,3
MGM 7	7,845	12,7	13,48	6,913	0,93	1956,1
MGM 8	7,720	12	12,71	6,849	0,87	1938,0

H. opt: Humedad óptima

H. probeta: Humedad óptima de la probeta compactada

Ws: Peso seco de la probeta

Ww: Contenido de agua de la probeta

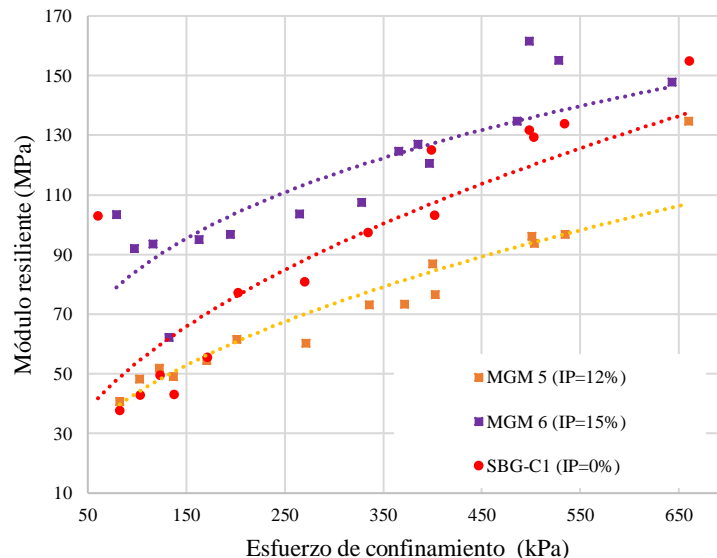
ρ_d : Peso específico seco

4.3 Módulo Resiliente Después de Compactación

En la Figura 18, se comparan los MR en condición después de compactación para las probetas de MGM5 (IP=12%) y MGM6 (IP=15%) preparadas ambas con un porcentaje de finos del 21%. Incluso, teniendo en cuenta que la densidad seca de MGM6 ($\rho_d = 1,940 \text{ kN/m}^3$) es ligeramente inferior que la densidad seca de MGM5 ($\rho_d = 1,947 \text{ kN/m}^3$), los resultados sugieren en este caso que un mayor índice de plasticidad puede influir positivamente en el MR. Comparativamente con el material de control SBG-C1 con densidad seca ($\rho_d = 1,966 \text{ kN/m}^3$), IP= 0% y % finos =8,5%, se obtuvo un MR ligeramente superior en la MGM6 asociado a un mayor IP. Sin embargo, el MGM 5, presentó un MR inferior al material de control, incluso teniendo un mayor IP, esto podría estar asociado a que la densidad seca del material de control es superior.

Figura 18.

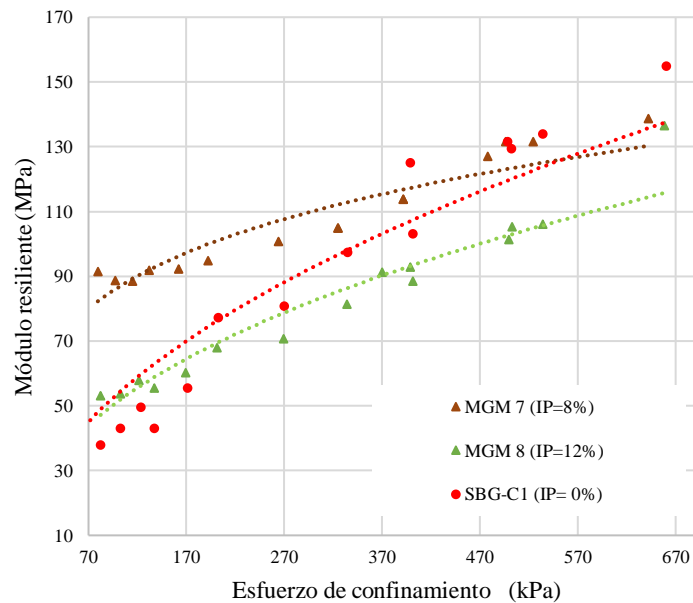
Módulos Resilientes Obtenidos Después de Compactación de MGM 5 y MGM 6. Ambos con 21% de Finos



En la figura 19 se observa que el MGM 8 a pesar de tener mayor IP presenta menor MR en comparación con el MGM 7 y el material de control SBG-C1. Este comportamiento estaría asociado a que el MGM8 posee menor densidad seca. Este resultado sugiere que una mayor densidad influye positivamente en el MR.

Figura 19.

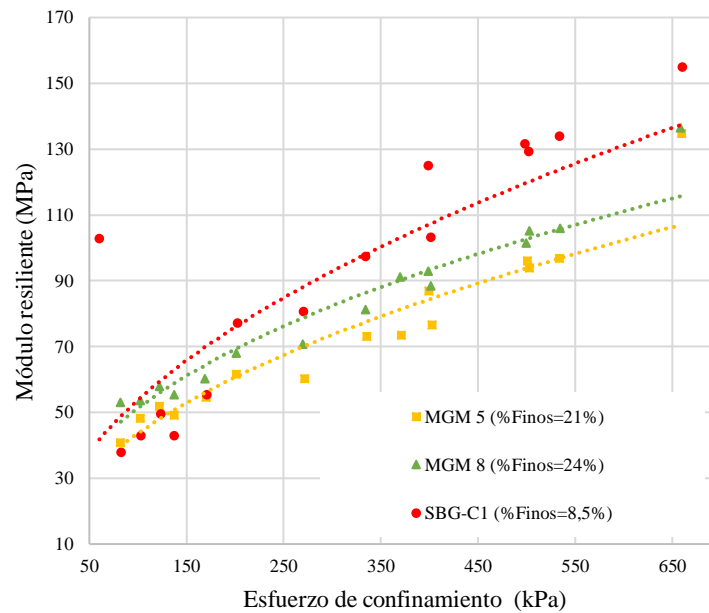
Módulos Resilientes Obtenidos Después de Compactación de MGM 7 y MGM 8. Ambos con 24% de Finos



Comparando las muestras MGM5 (21% de finos) y MGM8 (24% de finos) y preparadas a un mismo IP=12% presentes en la figura 20, se puede observar que la muestra con mayor porcentaje de finos presenta ligeramente un mayor MR. En comparativa con el material de control SBG C1, este presenta un MR ligeramente superior a ambos MGMs teniendo un IP inferior, esto sumando a que posee una densidad significativamente mayor.

Figura 20.

Módulos Resilientes Obtenidos Después de Compactación de MGM 5 y MGM 8. Ambos con 12% de IP.



4.4 Trayectoria de Secado y Humedecimiento

Para conocer el comportamiento del material a una variación de humedad, se sometieron las probetas de MGM a una trayectoria de secado al ambiente con el objetivo de reducir dos puntos porcentuales su humedad óptima. En la figura 21 se presenta la trayectoria de secado por cada material para lograr la masa objetivo presentada en la tabla 7.

Figura 21.

Trayectoria de Secado de MGMs para Alcanzar Humedad Óptima de Compactación Menos dos Puntos Porcentuales

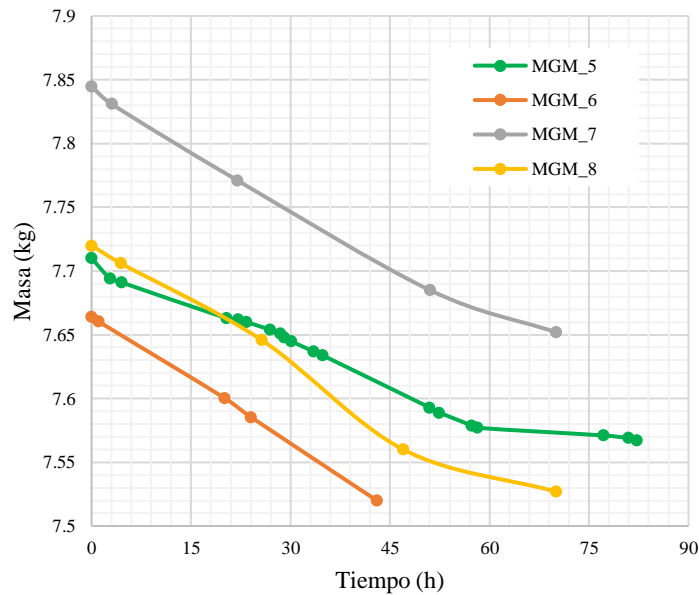


Tabla 7.

Control de Masa de Probetas de MGMs para Lograr Humedad Objetivo

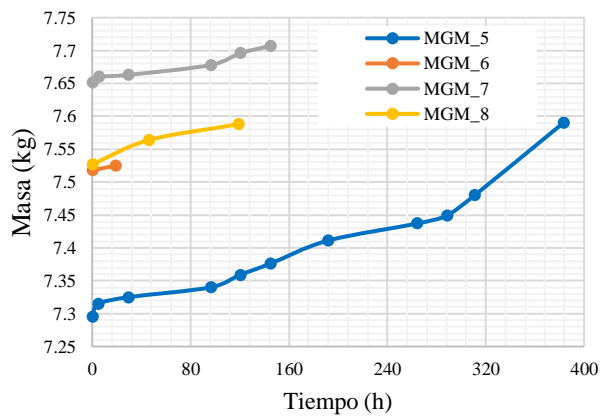
	Masa	Masa	Humedad
Material	inicial	objetivo	objetivo
	(Kg)	(Kg)	(%)
MGM 5	7.735	7.597	10.36
MGM 6	7.662	7.525	9.73
MGM 7	7.845	7.706	11.48
MGM 8	7.720	7.583	10.71

Si bien se realizó un secado ambiente de las probetas, la humedad objetivo, en este caso dos puntos porcentuales por debajo de la humedad óptima de compactación, no estaba bien controlada, en especial la humedad de la MGM 5. En la figura 22 se observa la trayectoria de humedecimiento que

siguieron las probetas de MGM para llegar a su masa objetivo. Cabe aclarar que las probetas tuvieron un tiempo de mínimo una semana guardadas en cavas individuales y envueltas en vinipel luego de lograr la humedad objetivo, para lograr que esta se redistribuya homogéneamente en toda la probeta.

Figura 22.

Humedecimiento para Corrección de Humedad Objetivo (Humedad Óptima de Compactación Menos dos Puntos Porcentuales)

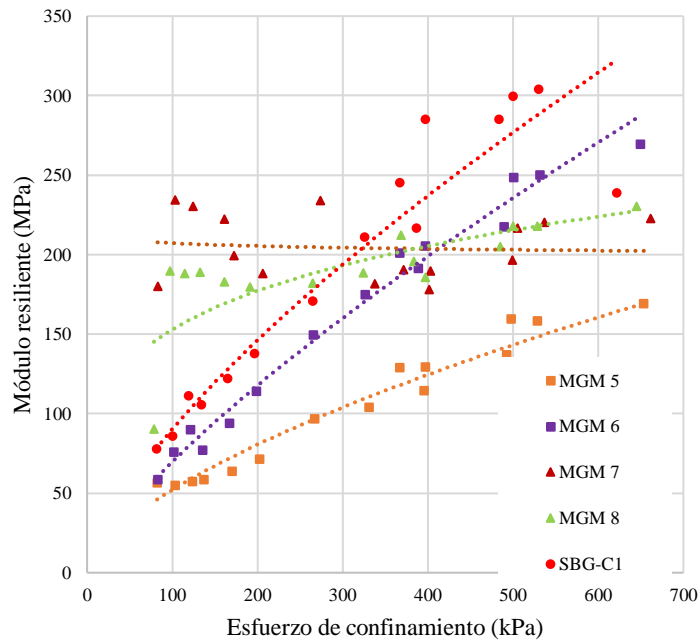


4.5 Módulo Resiliente en Trayectoria de Secado

En la figura 23 se presentan los resultados de módulo de resiliencia obtenidos a través del ensayo triaxial dinámico al variar los contenidos de humedad en dos puntos porcentuales abajo de la óptima de compactación de las probetas de MGMs en estudio.

Figura 23.

Módulos Resilientes Obtenidos Después de Trayectoria de Secado de los Cuatro MGMs en Estudio

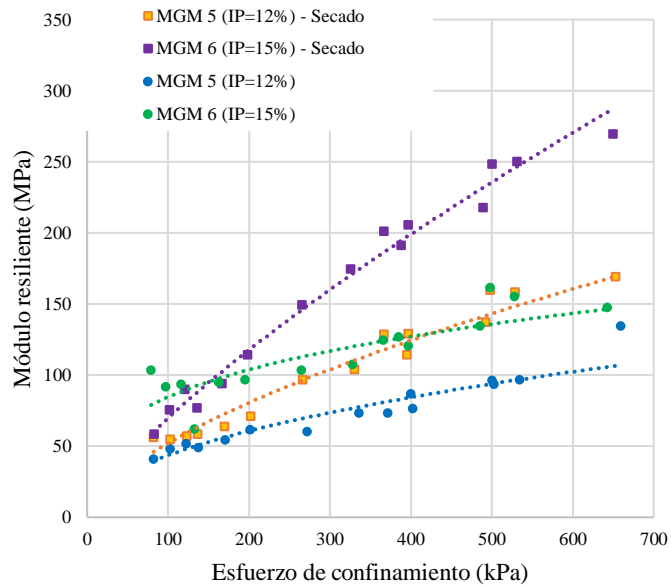


En la figura 24, se comparan los MR en condición después de secado para las probetas de MGM5 (IP=12%) y MGM6 (IP=15%) preparadas ambas con un porcentaje de finos del 21%. Ambos MGMs tuvieron un incremento de MR al reducir su contenido de agua en fase de secado. En comparación con el material de control SBG-C1, este obtuvo un mayor MR que los MGM 5 y 6.

Figura 24.

Módulos Resilientes Después de Compactación vs Trayectoria de Secado de MGM 5 y MGM 6.

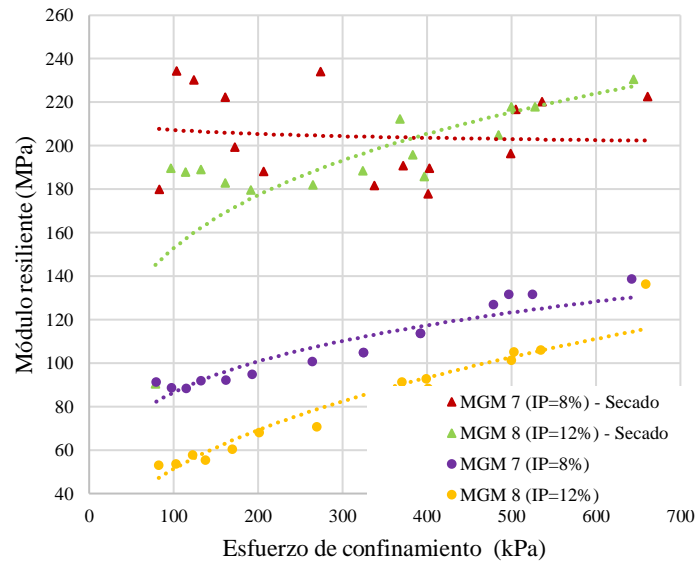
Ambos con 21% de Finos



En la figura 25 se comparan los MR del MGM 7 y MGM 8 en fase de secado, ambos con 24% de contenido de finos. Se observa un incremento del MR en ambos materiales comparado con la fase post compactación. Además, el MGM 7 presentó mayor MR en comparación con el MGM 8, tal y como sucedió en la fase post compactación. En comparación con el material de control SBG-C1 en fase de secado, el MGM 7 presenta un mayor MR asociado a un mayor contenido de finos.

Figura 25.

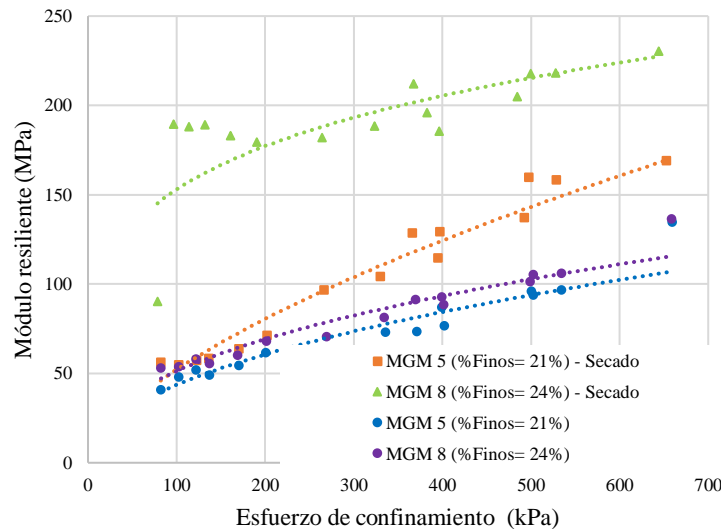
Módulos Resilientes Obtenidos Después de Compactación vs Trayectoria de Secado de MGM 7 y MGM 8. Ambos con 24% de Finos



En la figura 26 se observa que en condición de secado la diferencia de MR entre MGM8 (% finos=24%) y MGM5 (% finos=21%) se hace más notoria, donde el MGM 8 presenta mayor MR asociado a la succión que desarrolla por poseer mayor porcentaje de finos. El MGM 8 en esta fase logró un MR similar al del material de control SBG-C1, siendo el MGM que más incrementó su respuesta mecánica en comparación con la fase de compactación.

Figura 26.

Módulos Resilientes Obtenidos Después de Compactación vs Trayectoria de Secado de MGM 5 y MGM 8. Ambos con 12% de IP



En la tabla 8 se observa que los MGMs 7 y 8 fueron los que lograron un mayor incremento en el módulo resiliente debido a la fase de secado en comparación con el obtenido después de compactación. Esto puede estar asociado a su alto contenido de finos (24%). A continuación, se plasman los valores de módulo resiliente promedio en ambos casos de estudio.

Tabla 8.

Módulo Resiliente Promedio Después de Compactación y Después de Trayectoria de Secado

	<i>Después de compactación</i>	<i>Después de secado</i>	<i>Ganancia MR (%)</i>
Material	Módulo resiliente [MPa]	Módulo resiliente [MPa]	Ganancia efecto de secado
<i>MGM 5</i>	73	104	42%
<i>MGM 6</i>	115	161	40%
<i>MGM 7</i>	108	205	90%
<i>MGM 8</i>	81	190	135%
<i>SBG-C1</i>	91	193	112%

Los resultados de los módulos resilientes en ambas condiciones para cada probeta se encuentran tabulados en el anexo 4.

4.6 Ensayos de Calidad

Tal como se mencionó anteriormente, el MGM es aquel que no se ajusta totalmente a las especificaciones dadas por una agencia vial. Para fines de este proyecto de investigación realizado en Colombia se tomó como referencia las especificaciones del INVIAS (Invias, 2013). En la tabla 9, se observa la comparación de los ensayos obtenidos sobre el material SBG-C1 de cantera PAVIANDI con las especificaciones dadas por la norma INVIAS en su Artículo 320-13.

Tabla 9.

Evaluación de Calidad Material PAVIANDI SBG-C1

Característica	Norma de Ensayo INV	Obtenidos sobre Material SBG-C1		Criterio
		Gravas	Finos	
Dereza [O]				
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo [35%]	E-238	61	41	No cumple
Durabilidad [O]				
Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo [12%] Sulfato de sodio	E-220	11,34	6,23	Cumple
Limpieza [F]				
Equivalente de arena, mínimo [25%]	E-133	-	40	Cumple
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo [2%]	E-211	10	20	No cumple

4.7 Gravedad Específica

En la tabla 10 se presentan los valores de gravedad específica de gravas, arenas y finos utilizados para la elaboración de las probetas de MGMs de estudio.

Tabla 10.

Valores de Gravedad Específica Aparente de Sólidos (Gravas, Arenas y Finos)

Partícula	Gs Promedio
Gravas	2,607
Arenas	2,624
Pasa No. 200 Paviandi	2,684
Pasa No. 200 Sanchez	2,701
Triturado	2,655
Caolinita	2,664
Bentonita	2,492

Determinados estos valores de gravedad específica de las partículas que componen la masa de cada probeta compactada de MGM, por medio de la ecuación 1 se calcula la gravedad específica aparente del agregado combinado para cada uno de los materiales en estudio como se evidencia en la tabla 11.

Tabla 11.

Gravedad Específica Aparente para Cada Probeta de MGM

Material	Gravedad específica [Gs]
MGM5	2,625
MGM6	2,624
MGM7	2,639
MGM8	2,626

5. Conclusiones

Una vez finalizada la trayectoria de secado de cada probeta se evidenció un aumento del valor de módulo resiliente en comparación a la condición de post compactación. En razón de lo anterior, se concluye que una de las variables que más influye en el comportamiento mecánico de los materiales granulares es el contenido de humedad, asociado a la succión que pueden desarrollar los MGMs estudiados.

Tras la comparación de la respuesta mecánica después de compactación de las probetas de MGM 5 y MGM 8 (ambas con IP de 12%), se logró determinar en esta fase, que una variación de tres puntos porcentuales en el contenido de finos no representó un cambio drástico en el módulo resiliente.

El módulo resiliente en fase de secado de MGM7 y MGM8, con 24% en contenido de finos, fue mayor en comparación a MGM5 y MGM6, con finos del 21%. Los resultados sugieren que un porcentaje de finos mayor en presencia de bajo contenido de agua incrementa el valor del módulo resiliente del MGM. Esto se justifica por el efecto ligante de los finos dentro de las agregaciones de materiales con los granulares.

Se puede afirmar sobre los resultados obtenidos de los ensayos de calidad que el material solo cumple dos de los cuatro ensayos realizados. Las comparaciones confirman que el material SBG-C1 (cantera Paviandi) evaluado corresponde a un material granular marginal ya que no cumple con las especificaciones del artículo 320-13 de la norma INVIAS para uso en subbase granular.

6. Recomendaciones

En futuras investigaciones para la continuidad de este proyecto sobre MGMs, se sugiere:

Evaluar nuevas probetas con el material SBG-C1 paviandi con diferentes combinaciones de agregado para tener una mayor gama de resultados de módulo resiliente y esclarecer la influencia en el contenido de finos e índice de plasticidad en la respuesta mecánica de los MGM.

Para lograr mayor precisión en la dosificación de los materiales en cada probeta, se recomienda después de tamizado, lavar y secar el material para evitar que las partículas finas adheridas en los agregados gruesos intervengan en los resultados obtenidos.

Referencias Bibliográficas

- AASHTO T 307-99. (2007). *Determinación del módulo resiliente de suelos y materiales agregados*.
- Angarita, A., & Acevedo, Y. (2022). *Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como MGM-2*. . (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (2008). *Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico, Parte 7: Ensayo triaxial con carga cíclica para mezclas sin ligante. UNE-EN 13286-7, p.1-38*.
- Cáceres, O., & Rodríguez, A. (2021). *Estimación de la resistencia monotónica en materiales granulares marginales como alternativa para la construcción de vías*. Bogotá D.C, Colombia: Universidad militar nueva granada. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.
- Invias. (2013). *Capítulo 3. Afirmados subbases y bases. Art 320*.
- Invias. (2013). *Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino. norma de ensayos de materiales para carreteras e-222-13*.
- Invias. (2013). *Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso. norma de ensayos de materiales para carreteras e-223-13*.
- Invias. (2013). *INV E-128-13 determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua. norma de ensayos de materiales para carreteras e-128-13*.
- Invias. (2013). *INV E-133-13. Equivalente de arenas de suelos y agregados finos*.

- Invias. (2013). *INV E-211-13. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznableles en los agregados.*
- Invias. (2013). *INV E-220-13. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.*
- Invias. (2013). *INV E-238-13. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval.*
- Invias. (2013). *INV E-245-13. Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval.*
- Liebenberg, J., & Visser, A. (2003). *Estabilización y diseño estructural de materiales marginales para uso en vías de bajo volumen.* . Registro de investigación de transporte, 1819 (1), 166–172.
- López, S. (6 de mayo de 2022). *Las vías terciarias en Colombia - SAI. Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos.* . Obtenido de <https://sai.org.co/las-vias-terciarias-en-colombia-sai/>
- Mamani, R. (2013). *Ensayo- triaxial cíclico para suelos granulares finos-granulares. Ensayo Triaxial Cíclico.* . Obtenido de <https://es.slideshare.net/RobertAlatrísticaMamani/64402979/ensayotriaxialciclicopar asuelosgranularesyfinosgranulares>
- Martínez, J., & Vargas, J. (2022). *Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales identificados como MGM-1.* . (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander.
- Moreno Rubio, J. (2005). *Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas.*

Múnera, J., & Aguiar, J. (2020). Estimación del módulo resiliente para materiales granulares de Costa Rica. *Revista Infraestructura Vial*, Vol. 21, 12 -20.

Sandoval, ,, Goolam, L., Lappe, I., Pérez N, Mittiga, E., Perucho, A., . . . Boman, M. (2019).

Review of practices using marginal and secondary material in rural and industrial areas.

World Road Association (PIARC).

Apéndices

Apéndice A. Granulometría de Diseño

1.1 Granulometría diseño probetas MGM

Material	Gravas		Arenas		Finos		Masa Total [g]
	Fracción [%]	Masa [g]	Fracción [%]	Masa [g]	Fracción [%]	Masa [g]	
MGM5	55	3927,55	24	1713,84	21	1499,61	7141
MGM6	55	3912,15	24	1707,12	21	1493,73	7113
MGM7	55	3939,65	21	1504,23	24	1719,12	7163
MGM8	55	3919,85	21	1496,67	24	1710,48	7127

Nota: La masa total incluye 200 gr adicionales para medición de humedades

1.2 Fracciones de material pasa 200, granulometría de diseño

Material	Finos [%]	Composición [%]			
		PasaN°200	Caolinita	Bentonita	Triturado
MGM5	21	10,38	10,38	0,24	-
MGM6	21	10,25	10,25	0,49	-
MGM7	24	20,28	-	-	3,72
MGM8	24	11,86	11,86	0,27	-

Apéndice B. Gravedad Específica Aparente de Sólidos

2.1 Gravas

Gravedad especifica aparente - Gravas				Promedio Gs
Peso [g] / Muestra	1	2	3	
A	3932,1	3964,6	3877,6	
B	4204,7	4229,1	4132,7	
C	2423,8	2443,1	2391,6	
Gs	2,607	2,606	2,609	2,607

2.2 Arenas

Gravedad especifica aparente - Arenas				Promedio Gs
Peso [g] / Muestra	1	2	3	
A	95,6	95,1	95,6	
B	623,1	621,6	623	
S	100	100	100	
C	682,3	680,6	682	
Gs	2,626	2,634	2,612	2,624

2.3 Finos

2.3.1 Cantera pasa No 200 SBG-C1

Peso [g] / Muestra	1	2	3	Promedio Gs
Ms	38,90	39,30	37,70	
Mpw,t	339,81	339,82	339,84	
Mpws,t	364,20	364,50	363,50	
Gs	2,681	2,688	2,685	2,684

2.3.2 Cantera pasa No 200 SBG-C0

Peso [g] / Muestra	1	2	3	Promedio Gs
Ms	39,80	40,10	39,70	
Mpw,t	339,82	339,76	339,50	
Mpws,t	364,90	365,00	364,50	
Gs	2,704	2,699	2,702	2,701

2.3.3 Caolinita

Peso [g] / Muestra	1	2	3	Promedio Gs
Ms	39,50	39,50	38,90	
Mpw,t	348,01	347,95	347,89	
Mpws,t	372,70	372,60	372,20	
Gs	2,668	2,660	2,666	2,664

2.3.4 Triturado

Peso [g] / Muestra	1	2	3	Promedio Gs
Ms	39,40	39,70	39,50	
Mpw,t	339,85	339,82	339,80	
Mpws,t	364,40	364,60	364,40	
Gs	2,653	2,661	2,652	2,655

2.3.5 Bentonita

Peso [g] / Muestra	1	2	3	Promedio Gs
Ms	16,90	17,00	16,90	
Mpw,t	339,88	339,90	339,90	
Mpws,t	350,00	350,10	350,00	
Gs	2,493	2,498	2,484	2,492

2.3.6 Gravedad específica aparente del agregado combinado.

Material	Finos [%]	Composición [%]				Gravedad específica [Gs]
		PasaN°200	Caolinita	Bentonita	Triturado	
MGM5	21	10,38	10,38	0,24	-	2,625
MGM6	21	10,25	10,25	0,49	-	2,624
MGM7	24	20,28	-	-	3,72	2,639
MGM8	24	11,86	11,86	0,27	-	2,626
Promedio Gs						2,628

Apéndice C. Evaluación de Calidad

3.1 Solidez en sulfatos

SOLUCIÓN UTILIZADA SULFATO DE:	SODIO
---	--------------

CICLOS	5
---------------	----------

Tamiz		Gradación de la muestra original [% retenido]	Peso fracciones antes del ensayo [g]	Peso fracciones después del ensayo [g]	Pérdida real [(B-C)/B]*100 [%]	Pérdida corregida (A x D) / 100 [%]
PASA	Retiene	[A]	[B]	[C]	[D]	[C]
Agregados Finos						
3/8"	N°4	15,00	100,2	88,2	11,98	1,80
N°4	N°10	12,50	100,2	85,4	14,77	1,85
N°10	N°40	6,50	100,2	83,8	16,37	1,06
N°40	N°200	8,00	100	81	19,00	1,52
Totales			400,6			6,23
ESPECIFICACIONES MÁXIMO = 12%					Cumplimiento	CUMPLE
AGREGADOS GRUESOS						
1 1/2"	1	7,50	751	600,7	20,01	1,50
1	3/4"	7,50	750,3	590,5	21,30	1,60
3/4"	1/2"	17,00	501	380,6	24,03	4,09
1/2"	3/8"	8,00	500,7	340,5	32,00	2,56
3/8"	N°4	15,00	300,7	268,7	10,64	1,60
TOTALES			2803,7			11,34
ESPECIFICACIONES MÁXIMO = 12%					Cumplimiento	CUMPLE

3.2 Equivalente de Arenas

EQUIVALENTE DE ARENA	1	2	3	PROMEDIO
Lectura nivel de arena A [cm]	6,35	6,35	6,1	6,27
Lectura nivel de arcilla B [cm]	15,75	15,75	15,5	15,67
Equivalente de arena (A*100/B) [%]	40,32	40,32	39,34	40,00
VALOR MÍNIMO ESPECIFICADO DE EQUIVALENTE DE ARENA => 25			Cumplimiento	CUMPLE

3.3 Degradación por abrasión en el equipo Micro-deval

Tamiz		Peso inicial fracciones [g]	Peso total muestra [g] [M]	Peso tara [g]	Muestra + tara [g]	Peso final muestra [g] [R]	P [%] [(M- R)/M]*100	Promedio [%]
Pasa	Retenido							
AGREGADOS GRUESOS								
3/4"	1/2"	750	1503	26,5	620	593,5	61%	61%
1/2"	3/8"	750						
Cumplimiento							Gravas (máx = 30%)	NO CUMPLE
AGREGADOS FINOS								
N°4	N°8	50	501	10,8	308,1	297,3	41%	41%
N°8	N°16	125						
N°16	N°30	125						
N°30	N°50	100						
N°50	N°100	75						
N°100	N°200	25						
Cumplimiento							Arenas (máx= 30%)	NO CUMPLE

3.2 Terrones de arcilla y partículas deleznales

TAMIZ		Peso inicial [g]	Peso final [g]	P [%] [(M-R)/M]*100	%Pérdida promedio Ponderado
PASA	RETENIDO	[M]	[R]		
AGREGADOS GRUESOS					
1"	3/4"	3009	2785	7,44 %	9,52%
3/4"	3/8"	2008	1755	12,60%	
3/8"	Nº4	1003	909	9,37%	
Cumplimiento				Gravas (<= 2%)	NO CUMPLE
AGREGADOS FINOS					
Agregado fino retenido en	Nº16	30	24	20%	20%
Cumplimiento				Arenas (<= 1%)	NO CUMPLE

Apéndice D. Cálculo Módulo Resiliente

4.1 Módulo resiliente material MGM5 Fase después de compactación

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo Bulk (kPa)
1	20,7	20,2358	18,2084	0,0004	40,73	82,3
2	20,7	40,4079	36,4669	0,0008	48,16	102,5
3	20,7	60,3221	54,3468	0,0010	51,87	122,4
4	34,5	33,5675	30,1717	0,0006	49,06	137,1
5	34,5	67,0089	60,2652	0,0011	54,52	170,5
6	27,6	97,6648	87,7022	0,0014	61,56	180,5
7	68,9	64,8310	58,1072	0,0010	60,15	271,5
8	68,9	129,1669	115,5533	0,0016	73,14	335,9
9	68,9	192,9829	172,7384	0,0020	86,89	399,7
10	103,4	61,1606	54,3916	0,0007	73,35	371,4
11	103,4	92,3031	82,2470	0,0011	76,61	402,5
12	103,4	190,5103	170,1235	0,0018	96,10	500,7
13	137,9	89,3100	79,1674	0,0008	93,78	503,0
14	137,9	120,5303	107,0554	0,0011	96,74	534,2
15	137,9	245,8855	218,7035	0,0016	134,62	659,6

Módulo resiliente promedio [Mpa]	73
---	----

4.2 Módulo resiliente material MGM6 Fase después de compactación

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo Bulk (kPa)
1	20,7	16,9004	14,8751	0,0001	103,30	79,0
2	20,7	35,1933	31,1634	0,0003	91,94	97,3
3	20,7	53,6793	47,5424	0,0005	93,42	115,8
4	34,5	28,8079	25,3421	0,0001	62,27	132,3
5	34,5	59,5599	52,6351	0,0006	94,96	163,1
6	34,5	91,2584	81,0021	0,0008	96,61	194,8
7	68,9	58,1074	51,2236	0,0005	103,63	264,8
8	68,9	121,2577	107,4877	0,0010	107,44	328,0
9	68,9	178,1569	157,4610	0,0012	126,94	384,9
10	103,4	55,6421	48,7748	0,0004	124,63	365,8
11	103,4	86,3296	76,1523	0,0006	120,56	396,5
12	103,4	175,4956	154,9649	0,0012	134,63	485,7
13	137,9	84,5635	74,3669	0,0005	161,44	498,3
14	137,9	114,3368	100,6905	0,0006	155,16	528,0
15	137,9	229,1902	201,7734	0,0014	147,71	642,9

Módulo resiliente promedio [Mpa]	115
----------------------------------	-----

4.3 Módulo resiliente material MGM7 Fase después de compactación

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo Bulk (kPa)
1	20,7	17,387352	15,1781664	0,0001661	91,37	79,487352
2	20,7	35,149392	30,8903774	0,00034875	88,57	97,249392
3	20,7	52,99736	46,5696762	0,00052665	88,42	115,09736
4	34,5	28,601364	25,0779632	0,00027295	91,87	132,101364
5	34,5	58,546364	51,5159126	0,00055905	92,14	162,046364
6	34,5	89,081902	78,778036	0,0008317	94,71	192,581902
7	68,9	57,387918	50,3967462	0,0005002	100,75	264,087918
8	68,9	118,2018	104,509302	0,0009974	104,78	324,9018
9	68,9	118,2018	104,509302	0,0009974	104,78	324,9018
10	103,4	81,831906	71,60451	0,0006294	113,76	392,031906
11	103,4	81,831906	71,60451	0,0006294	113,76	392,031906
12	103,4	167,98134	147,394044	0,0011604	127,02	478,18134
13	137,9	82,648688	72,443212	0,0005507	131,54	496,348688
14	137,9	110,67912	97,043646	0,0007379	131,51	524,37912
15	137,9	228,4983	201,266536	0,00145245	138,56	642,1983

Modulo resiliente Promedio [MPa]	108
---	-----

4.4 Módulo resiliente material MGM8 Fase después de compactación

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo Bulk (kPa)
1	20,7	20,244948	18,1354772	0,00034215	53	82,344948
2	20,7	40,303986	36,1560504	0,0006744	53,61	102,403986
3	20,7	59,893784	53,6356972	0,00092705	57,85	121,993784
4	34,5	33,693854	30,1315464	0,00054355	55,44	137,193854
5	34,5	65,72303	58,7335176	0,0009748	60,25	169,22303
6	34,5	97,727668	87,405354	0,0012862	67,95	201,227668
7	68,9	62,779608	55,8406564	0,0007893	70,74	269,479608
8	68,9	127,72116	113,960774	0,0014024	81,26	334,42116
9	68,9	192,42726	171,730162	0,0018486	92,89	399,12726
10	103,4	59,91038	52,9877292	0,000581	91,20	370,11038
11	103,4	91,239816	80,948948	0,0009155	88,42	401,439816
12	103,4	189,20044	168,572846	0,00166235	101,40	499,40044
13	137,9	89,132356	78,731464	0,00074815	105,23	502,832356
14	137,9	120,9515	107,10662	0,00101065	105,97	534,6515
15	137,9	244,88432	217,281822	0,0015928	136,41	658,58432

Módulo resiliente promedio [MPa]	81
---	----

4.5 Módulo resiliente material MGM5 Fase después de secado

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo Bulk (kPa)
1	20,7	19,964632	17,7182842	0,00031455	56,32	82,064632
2	20,7	40,641128	36,3558452	0,00066355	54,78	102,741128
3	20,7	61,017872	54,4929876	0,0009516	57,26	123,117872
4	34,5	33,213832	29,4675434	0,0005043	58,43	136,713832
5	34,5	66,687272	58,6655876	0,000919	63,84	170,187272
6	34,5	99,025972	88,657904	0,00124455	71,24	202,525972
7	68,9	59,837526	51,3991754	0,00053145	96,71	266,537526
8	68,9	123,71264	107,530464	0,001033	104,09	330,41264
9	68,9	188,34034	166,011214	0,00145015	114,49	395,04034
10	103,4	56,29921	48,800627	0,00037905	128,75	366,49921
11	103,4	86,756648	73,749818	0,0005707	129,23	396,956648
12	103,4	182,25498	156,983378	0,0011448	137,14	492,45498
13	137,9	84,005178	70,229222	0,00043995	159,63	497,705178
14	137,9	114,89704	96,577344	0,0006099	158,35	528,59704
15	137,9	239,64798	211,331438	0,00124975	169,09	653,34798

Módulo resiliente promedio [MPa]	104
---	-----

4.6 Módulo resiliente material MGM6 Fase después de secado

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo Bulk (kPa)
1	20,7	20,429878	18,3241442	0,0003133	58,48	82,529878
2	20,7	39,70457	34,3121104	0,00045345	75,67	101,80457
3	20,7	58,591948	50,627998	0,00056365	89,82	120,691948
4	34,5	32,080014	28,3483484	0,0003679	77,05	135,580014
5	34,5	63,38644	56,3573284	0,0005993	94,04	166,88644
6	34,5	94,83733	83,561334	0,0007326	114,06	198,33733
7	68,9	58,427212	51,304209	0,00034345	149,41	265,127212
8	68,9	119,15996	104,11513	0,000596	174,69	325,85996
9	68,9	181,71128	157,981328	0,00082595	191,30	388,41128
10	103,4	56,834022	48,2774646	0,0002401	201,07	367,034022
11	103,4	86,24891	71,51599	0,0003479	205,56	396,44891
12	103,4	178,8271	153,02766	0,0007032	217,62	489,0271
13	137,9	86,574908	65,783124	0,0002647	248,51	500,274908
14	137,9	117,48306	99,372264	0,00039725	250,23	531,18306
15	137,9	235,90222	192,482528	0,0007144	269,46	649,60222

Módulo resiliente promedio [MPa]	161
---	-----

4.7 Modulo resiliente material MGM7 Fase después de secado

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo Bulk (kPa)
1	20,7	20,555514	3,139922	1,775E-05	180,04	82,655514
2	20,7	41,121814	4,93557	-1,105E-05	234,33	103,221814
3	20,7	61,69133	12,15755	5,42E-05	230,29	123,79133
4	34,5	68,576928	13,441536	0,00006835	199,36	172,076928
5	34,5	57,637344	35,563336	0,00016	222,31	161,137344
6	34,5	102,7132	34,262662	0,00018225	188,07	206,2132
7	68,9	66,888346	15,962294	6,845E-05	233,98	273,588346
8	68,9	130,96358	60,922262	0,0003356	181,79	337,66358
9	68,9	194,4369	116,770994	0,0006565	177,88	401,1369
10	103,4	61,315716	21,27509	0,0001116	190,71	371,515716
11	103,4	92,413374	36,976204	0,00019525	189,77	402,613374
12	103,4	188,58224	115,078814	0,00058615	196,39	498,78224
13	137,9	91,574862	40,895346	0,0001888	216,71	505,274862
14	137,9	122,62148	65,474642	0,0002975	220,10	536,32148
15	137,9	247,19758	163,165892	0,0007331	222,56	660,89758

Módulo resiliente promedio [MPa]	205
---	-----

4.8 Módulo resiliente material MGM8 Fase después de secado

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo Bulk (kPa)
1	20,7	16,3285	13,48763	0,00016	90,32	78,4285
2	20,7	34,827484	29,640864	0,0001564	189,52	96,927484
3	20,7	52,283258	43,8319098	0,00023325	187,93	114,383258
4	34,5	28,569206	26,566159	0,0001406	189,03	132,069206
5	34,5	57,637344	51,6210862	0,0002824	182,91	161,137344
6	34,5	87,549432	76,244692	0,00042445	179,63	191,049432
7	68,9	57,84654	49,0121752	0,0002692	182,06	264,54654
8	68,9	117,26424	100,69974	0,0005345	188,41	323,96424
9	68,9	176,50708	151,002386	0,0007709	195,88	383,20708
10	103,4	57,651664	46,374068	0,00021855	212,21	367,851664
11	103,4	86,664048	89,915763	0,0004843	185,67	396,864048
12	103,4	174,40728	148,586932	0,00072535	204,84	484,60728
13	137,9	86,209886	76,9371436	0,0003532	217,86	499,909886
14	137,9	114,28472	96,955108	0,00044475	218,02	527,98472
15	137,9	230,87076	195,905908	0,00085015	230,45	644,57076

Módulo resiliente promedio [MPa]	190
---	-----

Apéndice E. *Imágenes*

5.1 Probeta MGM5



5.2 Probeta MGM6



5.3 Probeta MGM7



5.4 Probeta MGM8



5.5 Equipo para humedecimiento



5.6 Material PAVIANDI

