

Evaluación Mecánica de Materiales Granulares Marginales Para Uso en CAPAS de Subbase
Granular en Vías de Bajo Volumen de Tránsito (MGM 1-2-3-4)

Edinson Yoander Bautista B y José David Cabrales O.

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Ph.D. Alex Eduardo Alvarez Lugo,

Profesor titular, Escuela de Ingeniería Civil Universidad Industrial de Santander

Codirector

Ph.D. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes,

Profesor asistente, Escuela de Ingeniería Civil Universidad Industrial de Santander

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Agradecimientos

Agradecemos a todas las personas cercanas que nos han ayudado en toda nuestra formación académica, en especial a nuestros padres que nos han apoyado a lo largo del proceso y ahora en esta etapa final para poder culminar la carrera anhelada en la Universidad Industrial De Santander. Gracias a la escuela de ingeniería civil por brindar sus espacios para la realización de los ensayos y toma de datos para este proyecto, ante todo gracias a Dios. Por último, agradecemos al director y codirector de proyecto de grado, el Ing. Alex Eduardo Álvarez Lugo y al Ing. Vladimir Merchán Jaimes respectivamente por brindarnos apoyo y ser nuestros guías en este proyecto de investigación.

Tabla de contenido

Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.2. Objetivo general	13
1.3. Objetivos específicos.....	13
2. Marco Teórico.....	14
2.1. Vías Terciarias.....	14
2.2. Materiales granulares marginales (MGM)	14
2.3. Compactación giratoria	15
2.4. Ensayo triaxial dinámico.....	16
2.5. Módulo resiliente.....	17
2.6. Evaluación de calidad.....	17
2.6.1. <i>Ensayo Micro-Deval</i>	19
2.6.2. <i>Solidez en sulfato de sodio</i>	19
2.6.3. <i>Equivalente de arena</i>	20
2.6.4. <i>Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales</i>	21
2.7. Curvas de compactación.....	22
3. Generalidades	23
3.1. Subbase granular SBG-C0	23
3.2. Subbase granular SBG-C1 (Paviandi).....	24
3.3. Ensayos de laboratorio	24
4. Metodología.....	27
4.1. Medición de succión total	27
4.2. Asignación de fases para cada MGM.....	29
4.3. Protocolos de ensayo.....	31
4.4. Evaluación de calidad.....	31
4.4.1. <i>Equivalente de arena</i>	31
4.4.2. <i>Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval</i>	32
4.4.3. <i>Solidez en sulfatos</i>	33
4.4.4. <i>Terrones de arcilla y partículas deleznales</i>	33

4.5.	Tamizado de la sub-base granular	33
4.6.	Ensayo triaxial dinámico y determinación del módulo resiliente	34
4.7.	Medición de gravedad específica de sólidos	37
5.	Análisis y Resultados.....	39
5.1.	Datos de MGMS compactados	39
5.2.	Módulo resiliente de MGMS 1, 2, 3, y 4-R después de compactar (Fase 1).....	40
5.3.	Trayectoria de secado de MGMS 1, 2, 3, y 4-R.....	41
5.4.	Humedad relativa y temperatura versus tiempo en fase de secado máximo de MGMS.....	45
5.5.	Trayectoria de humedecimiento de la MGM 4-R	47
5.6.	Módulo resiliente en trayectoria de secado	49
5.6.1.	<i>Módulo resiliente de secado máximo (Fase A)</i>	49
5.6.2.	<i>Módulo resiliente de MGM 4 y MGM 4-R en condición de secado del menos dos puntos porcentuales por debajo de la humedad óptima</i>	50
5.6.3.	<i>Módulos resilientes en humedad óptima menos dos por ciento (Fase 2) de MGMS</i> ...	51
5.7.	Módulo resiliente de MGM 4 en sus diferentes fases	52
5.7.1.	<i>Módulo resiliente de los MGMS 1, 2, 3, y 4 Versus SBG-C1 en fase de más un punto porcentual de la humedad óptima (Fase 3)</i>	53
5.8.	Ensayos de calidad	54
5.9.	Gravedad específica	55
6.	Conclusiones.....	57
7.	Sugerencias y Recomendaciones.....	57
	Referencias Bibliográficas	59
	Apéndices.....	63

Lista de Apéndices

Apéndice A. Granulometría de diseño para cada MGMS correspondiente a este proyecto	63
Apéndice B. Análisis y resultados del módulo resiliente de las MGMS:	63
Apéndice B1. Resultado de módulo resiliente de la MGM 1 Fase A (secado máximo)	63
Apéndice B2. Resultado de módulo resiliente de la MGM 2 Fase A (secado máximo)	63
Apéndice B3. Resultado de módulo resiliente de la MGM 3 Fase A (secado máximo)	64
Apéndice B4. Resultado de módulo resiliente de la MGM 4-R Fase 1 (después de compactación).....	64
Apéndice B5. Resultado de módulo resiliente de la MGM 4-R Fase 2.....	65
Apéndice B6. Resultado de módulo resiliente de la MGM 4 Fase 2.....	65
Apéndice B7. Resultado de módulo resiliente de la MGM 4 Fase 3 (más un punto porcentual de su humedad óptima).....	65
Apéndice B8. Resultado de módulo resiliente de la MGM 1 Fase 3.....	66
Apéndice B9. Resultado de módulo resiliente de la MGM 2 en Fase 3.....	66
Apéndice B10. Resultado de módulo resiliente de la MGM 3 en Fase 3.....	66
Apéndice B11. Resultado de módulo resiliente de SBG-C1 en Fase 3	67
Apéndice C. Tablas de resultados de módulo resiliente fase 1(después de compactar) de MGM 1, 2, 3,4-R y de control SBG-C1-1.....	67
Apéndice C1. Módulo resiliente MGM 1 FASE 1	67
Apéndice C2. Módulo resiliente MGM 2 FASE 1	68
Apéndice C3. Módulo resiliente MGM 3 FASE 1	68
Apéndice C4. Módulo resiliente SBG-C1 FASE 1.....	68
Apéndice D. Tablas de resultados de módulo resiliente fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima (fase 2) de MGM 1, 2, 3,4-R y de control SBG-C1.....	69
Apéndice D1. Módulo resiliente de MGM 1 fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima.	69
Apéndice D2. Módulo resiliente MGM 2 fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima.	69
Apéndice D3. Módulo resiliente MGM 3 en fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima	70

Apéndice D4. Módulo resiliente SBG-C1 en fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima	70
Apéndice E. Tablas de resultados de ensayos de calidad de SBG-C0	70
Apéndice E1. Ensayo de equivalente de Arenas de material SBG-C0	70
Apéndice E2. Ensayo de degradación por abrasión en equipo Micro-Deval de SBG-C0.....	71
Apéndice E3. Ensayo de solidos por sulfatos en material SBG-C0	71
Apéndice E4. Ensayo de contenido de terrones de arcillas y partículas deleznable de material SBG-C0	71
Apéndice F. Tablas de resultados de gravedad especifica de SBG-C0	72
Apéndice F1. Gravedad especifica aparente de gravas	72
Apéndice F2. Gravedad especifica aparente de Arenas.....	72
Apéndice F3. Gravedad especifica aparente de finos.....	72
Apéndice F4. Gravedad especifica aparente ponderada.....	72
Apéndice F5 Gravedad especifica general de gravas, arenas y finos	73
Apéndice G. Tablas de control de fase de secado maximo (fase a) de MGM 1, 2 Y 3	73
Apéndice G1 tabla de control de fase de secado máximo de MGM 1	73
Apéndice G 2. Tabla de control de fase de secado máximo de MGM 2	74
Apéndice G3. Tabla de control de fase de secado máximo de MGM 3	74
Apéndice H. IMÁGENES	75
Apéndice H1. Probeta MGM 1	75
Apéndice H2. Probeta MGM 2.....	76
Apéndice H3. Probeta MGM 3.....	76
Apéndice H4. Probeta MGM 4.....	76
Apéndice H5. Probeta MGM 4-R.....	77
Apéndice H6. Probeta MGM 3 dentro del box con sal	77
Apéndice H7. Probeta MGM 3 con mezcla salina	77
Apéndice H8. Cavas utilizadas para almacenar las probetas.....	78

Lista de Tablas

Tabla 1. Requisitos de los agregados para subbases granulares	18
Tabla 2. Franjas granulométricas SBG-38	18
Tabla 3. Asignaciones y obtención de ensayos para las probetas MGMS 1-2-3-4.....	25
Tabla 4. Distribuciones de ensayos de calidad y gravedad específica de SBG-C0.	25
Tabla 5. Porcentajes de material que pasa el tamiz número 200 para lograr una mezcla con IP=12%.	27
Tabla 6. Asignaciones de fase para cada MGM'S para este proyecto.	30
Tabla 7. Asignaciones realizadas de fases para cada MGM de este proyecto	30
Tabla 8. Resultados de la probeta MGM 4-R después de compactar.....	39
Tabla 9. Resultado de masas y humedades de los MGMS en su trayectoria de secado máximo ..	43
Tabla 10. Datos iniciales de equilibrio y masa de probeta antes de Modulo Resiliente en Fase dos	44
Tabla 11. Control de masa de trayectoria de secado menos dos por ciento de la humedad óptima de la MGM4-R Fase 2.....	45
Tabla 12. Control de masa de trayectoria de humedecimiento al más un punto porcentual de la humedad óptima de la MGM4 R fase tres.	48
Tabla 13. Control de calidad de material SBG-C0.	55
Tabla 14. Valores de gravedad específica aparente de SBG-C0 (gravas, arenas, y finos).....	55
Tabla 15. Gravedad específica de probetas MGM 1, 2, 3, y 4.....	56

Lista de Figuras

Figura 1. Compactador giratorio.....	15
Figura 2. Equipo de Ensayo Triaxial.....	16
Figura 3. Equipo Micro-Deval para ensayo de degradación por abrasión INV E-238-13.....	19
Figura 4. Gravas al inicio del primer ciclo del ensayo de solides en sulfato de sodio.	20
Figura 5. Material fino de SBG-C0 durante el ensayo de equivalente de arena.	21
Figura 6. Lavado del material luego de estar sumergido en agua.....	22
Figura 7. Curvas de compactación para MGMS 1, 2, 3, 4 y SBG-C1.....	23
Figura 8. Granulometría de control y de MGMS.	26
Figura 9. Probeta de MGM con sistema de succión.	29
Figura 10. Medición de la altura en pulgadas de la arena durante el ensayo.....	32
Figura 11. Recipientes utilizados para el ensayo de desgaste por maquina Micro-Deval	33
Figura 12. Montaje de probeta de MGM'S para ensayo triaxial dinámico	35
Figura 13. Pesaje y control de probeta MGM secada al aire libre.....	36
Figura 14. Humedecimiento de MGMS con la ayuda de equipo humificador.....	37
Figura 15. Módulo resiliente de MGMS después de compactación Vs SBG-C1.....	41
Figura 16. Trayectoria de secado de los MGMS 1, 2, y 3 (secado al aire-Fase A).	42
Figura 17. Grado de saturación (Sr) Vs tiempo del MGM 4-R (Fase 2)	44
Figura 18. Humedad relativa y temperatura Vs tiempo en fase de secado máximo (Fase A) de MGM 1.....	46
Figura 19. Humedad relativa y temperatura Vs tiempo en fase de secado máximo (Fase A) de MGM 2.....	46
Figura 20. Humedad relativa y temperatura Vs tiempo en fase de secado máximo (Fase A) de MGM 3.....	47
Figura 21. Grado de saturación Vs tiempo para el MGM 4-R (más un punto porcentual de la humedad óptima)	48
Figura 22. Módulo resiliente de la MGMS 1, 2, 3 en Fase A secado máximo versus material de control después de compactar.	49
Figura 23. Módulo resiliente de las MGMS 1, 2,3 después de compactar.....	50
Figura 24. Módulo resiliente del material MGM 4 y material de control SBG-C1 en fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima (Fase 2).	51
Figura 25. Módulo resiliente de MGMS Vs material de Control SBG-C1, en fase dos.	52
Figura 26. Módulo resiliente de MGM 4 en diferentes fases versus material de control.	53
Figura 27. Módulo resiliente de MGM 1-2-3 VS SBG-C1 (Fase 3).	54

Resumen

Título: Evaluación mecánica de materiales granulares marginales para uso en capas de subbase granular en vías de bajo volumen de tránsito (MGM 1-2-3-4). *

Autor: Yoander Bautista y José David Cabrales. **

Palabras Clave: material granular marginal (MGM), índice de plasticidad (IP), compactación giratoria, ensayo triaxial dinámico, módulo resiliente, pavimentos.

Descripción:

Los materiales granulares marginales (MGM) pueden convertirse en una solución alternativa para las estructuras de pavimento aplicadas a las carreteras. El objetivo principal de este proyecto es analizar y caracterizar el comportamiento mecánico de cuatro MGM (MGM1, MGM2, MGM3, y MGM4), que no cumplen con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) relacionadas con el contenido de finos e índices de plasticidad requeridos para una subbase granular SBG-38. Para ello, se comparó el módulo resiliente determinado con el ensayo triaxial dinámico sobre MGM compactadas recientemente y para diferentes condiciones de humedad. Las condiciones de humedad evaluadas corresponden a (i) el contenido óptimo de humedad de compactación, (ii) la humedad alcanzada después de un proceso de secado, y la medida después de un ciclo de secado hasta un porcentaje deseado y (iii) la humedad alcanzada después de un proceso de secado extremo. (Fase A).

Además, el proyecto estableció la influencia del contenido de finos (18% y 21%) y del índice de plasticidad (8%, 12%, y 15%) sobre el módulo resiliente de MGM y los compararlo con la respuesta del material de referencia (SBG-CO) que cumple con los requerimientos de la especificación INVIAS para materiales granulares de subbase. Además, los materiales fueron caracterizados en términos de índice de calidad y gravedad específica de sus sólidos. Adicionalmente se puede observar que los materiales MGM 1, 2, y 3 al ser sometidos al máximo modulo resiliente del proceso de secado (Fase A) incrementaron su módulo con un aproximado de 135%, 85% y 900% respectivamente comparado con el determinado luego se su compactación. Estos resultados proporcionan una primera cuantificación del efecto en los cambios de humedad en respuesta de los MGMS evaluados.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Programa de Ingeniería Civil. Director: Allex Eduardo Alvarez Lugo, Ph.D. Profesor titular, Escuela de Ingeniería Civil Universidad Industrial de Santander. Codirector: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Ph.D. Profesor asistente, Escuela de Ingeniería Civil Universidad Industrial de Santander

Abstract

Title: Mechanical evaluation of marginal granular materials for use in granular subbase layers on low volume traffic roads (MGM 1-2-3-4). *

Author(s): Yoander Bautista y José David Cabrales. **

Key Words: marginal granular material (MGM), plasticity index, gyratory compaction, dynamic triaxial test, resilient modulus, pavements.

Description:

Marginal granular materials (MGMs) may become an alternative solution for developing pavement structures applied to low-volume roads. The main objective of this project is to analyze and characterize the mechanical behavior of four MGMs (MGM1, MGM2, MGM3, and MGM4), which do not meet the specifications of the Instituto Nacional de Vías (INVIAS) related to the content of fines and plasticity indices required for a granular subbase SBG-38. For this purpose, the resilient modulus determined with the dynamic triaxial test on gyratory compacted MGMs was compared for different moisture conditions. The moisture conditions assessed correspond to the (i) optimum compaction moisture content, (ii) moisture achieved after a drying process, and (iii) moisture achieved after an extreme drying process (Phase A).

Additionally, the project established the influence of the fines content (18% and 21%) and the plasticity index (8%, 12%, and 15%) on the resilient modulus of MGMs and compared them with the responses of two reference materials (SBG-CO) and (SBG-C1) that meet the requirements of the INVIAS specification for granular subbase materials. In addition, the materials were characterized in terms of their solids' specific gravity and quality indices. Additionally, it can be observed that the MGM 1, 2, and 3 materials, when subjected to the maximum drying process (Phase A) increased their resilient modulus compared to the one determined after their compaction. These results provide a first quantification of the effect of moisture changes on the response of the MGMs evaluate

*Degree work

**Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. DIRECTOR Allex Eduardo Álvarez Lugo, PhD. Full Professor, School of Civil Engineering Universidad Industrial de Santander. CODIRECTOR: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, PhD. Assistant Professor, School of Civil Engineering Universidad Industrial de Santander

Introducción

La red vial terciaria del país cuenta con una extensión estimada de 142.844 km y se encuentra a cargo principalmente de las entidades territoriales, municipios, y departamentos representando casi un 70% del total de la infraestructura vial existente. (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INVIAS), 2019). En buena parte, estas vías son apenas trochas en tierra o con un precario afirmado y sin obras de drenaje adecuado, sólo transitables en las temporadas secas. No obstante, el Gobierno a lo largo de la historia ha llevado a cabo diferentes iniciativas para realizar mejoras sobre esta infraestructura ya que solo el 6% se encuentra en buen estado (Moreno, 2019).

La red vial terciaria debe funcionar como un sistema articulado, fundamental para el desarrollo del país, ya que de él depende la movilidad de carga y pasajeros, esencial para la integración del mercado nacional y de las regiones aisladas del país, así como para impulsar el mercado internacional (López, 2019). En los últimos años se ha visto la necesidad de la implementación de materiales granulares de menor calidad a los que se acostumbra a emplear para la construcción de pavimentos debido a los altos costos de transporte de material granular óptimo, así como los costos de disposición final de estos materiales marginales (Cáceres y Rodríguez, 2021, p. 14-15)

Debido a la problemática planteada, surge la necesidad de implementar soluciones innovadoras. Una de ellas es la incorporación de materiales granulares marginales (MGM) en la construcción, mantenimiento, y sustitución de vías terciarias, sobre todo en aquellas zonas en las que, debido a las condiciones geológicas y climáticas peculiares, son los materiales más abundantes y es difícil y económicamente costoso encontrar otros de mayor calidad. (Cano y Perucho, 2015, p. 115-130).

Se propone en este proyecto de investigación evaluar la respuesta mecánica de varios MGMS mediante el ensayo triaxial dinámico, para así obtener como resultado sus módulos resilientes y cuantificar su modificación al aplicar un ciclo de secado. La finalidad será obtener una caracterización sobre cómo se comportan los MGMS con diferentes combinaciones de fracciones de finos con índices de plasticidad controlados, para al final compararlos con materiales granulares estándar. De esta forma, se busca realizar validaciones preliminares sobre la posible utilidad en capas de subbase granular para la conformación de una estructura vial que cumpla los estándares de calidad y funcionalidad, bajo el efecto de cargas vehiculares y factores ambientales que se presenten.

1. Objetivos

1.2. Objetivo general

- Comparar el módulo resiliente determinado sobre MGMS (caracterizados por tener diferentes combinaciones de fracciones de finos (material pasa tamiz No. 200) e índices de plasticidad) recién compactados y el medido luego de un ciclo de secado, usando probetas compactadas a través del método giratorio.

1.3. Objetivos específicos

- Establecer la influencia del contenido de finos (18% y 21%) y del índice de plasticidad (8%, 12%, y 15%) en el módulo resiliente de MGMS y compararlos con las respuestas de dos materiales de referencia (SBG-CO) y (SBG-C1) que cumplen con los requerimientos de la especificación INVIAS para materiales de subbase granular.
- Determinar la curva de mezclado de finos para índice de plasticidad (IP) del doce por ciento.

2. Marco Teórico

2.1. Vías Terciarias.

INVIAS (2016), las define como vías que unen las cabeceras municipales con sus veredas o unen veredas entre sí. La mayoría se encuentran en afirmado. Si se pavimentan, estas vías deben cumplir con las condiciones geométricas fijadas para las vías secundarias. A su vez, el Departamento Nacional de Planeación, (DNP)(2018) expone que “las vías terciarias son la gran apuesta de infraestructura para el desarrollo del campo y la consolidación de la paz, dado que se ejecutan en las zonas más vulnerables y con mayor impacto en la generación de economías locales”.

La red vial terciaria corresponde al 67 % de la malla vial total de Colombia, el 19 % corresponde a red secundaria a cargo de los departamentos, 8 % es red nacional a cargo de la Nación, y 6 % son vías privadas afirma Correa (2017). Actualmente, la red terciaria tiene una extensión de 142.284 kilómetros, de los cuales 27.577 están a cargo del INVIAS, 100.748 a cargo de los municipios, y 13.959 a cargo de los departamentos.

2.2. Materiales granulares marginales (MGM)

Para el presente estudio y análisis, en base a Sánchez (2016) un MGM se define como todo aquel material granular o suelo que no cumple parcialmente con las especificaciones promulgadas por el INVIAS para la evaluación de calidad de materiales tipo subbase o base granular, pero que podrían ser utilizados después de experimentación de laboratorio y análisis. Los MGMs pueden ser naturales, subproductos industriales, o materiales de desecho.

2.3. Compactación giratoria

Este método consiste en la “aplicación de acciones simultáneas que incluyen esfuerzo vertical y acción giratoria con un ángulo de inclinación respecto al eje vertical, ejercidas por el compactador giratorio para asemejar los procesos constructivos en obra”. (Camacho et al., 2007, p. 67-81). Entre las ventajas atribuidas a la producción de especímenes con el compactador giratorio se puede indicar que es un ensayo controlado y preciso, ya que en cada giro el equipo arroja valores de densidad. Adicionalmente, debido a la acción de amasado, este método de compactación simula mejor las condiciones del campo que el compactador de impacto. (Pérez et al., 2017, p. 264).

El equipo utilizado para realizar la compactación de las probetas de MGMS con los diferentes IP y contenidos de finos y humedad, se encuentra ubicado en el edificio que corresponde al Laboratorio de Caracterización de Materiales en la Universidad Industrial de Santander.

Figura 1

Compactador giratorio.



Nota: La figura muestra el compactador giratorio. Autores, 2023.

2.4. Ensayo triaxial dinámico

Tomando como referencia la norma American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2007), el ensayo triaxial dinámico, consiste en someter una probeta cilíndrica de material granular sin ligante (i.e., granular simple) a esfuerzos cíclicos, simulando el rango de esfuerzos a los que está sometida una capa de material granular simple en una estructura de pavimento, para medir posteriormente la deformación axial de la probeta. En el método A (presión de confinamiento variable), se aplica un esfuerzo desviador axial cíclico y una presión de celda (o presión de confinamiento) cíclica variable, que varían en fase.

El equipo utilizado para realizar los ensayos en las diferentes fases asignadas a las probetas de MGM'S, con la cual se determina su módulo resiliente, se encuentra ubicado en el edificio que corresponde al Laboratorio de Caracterización de Materiales en la Universidad Industrial de Santander.

Figura 2

Equipo de Ensayo Triaxial



Nota. La figura visualiza el equipo de ensayo triaxial de la Universidad Industrial de Santander.

Autores, 2023.

2.5. Módulo resiliente

Se define como la energía máxima que se puede absorber por unidad de volumen sin crear distorsión permanente con una condición particular de humedad y densidad; el módulo resiliente se expresa como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable. (Herrera-Montealegre, 2014).

2.6. 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 especificación INVIAS en su Artículo 320-13. INVIAS (2013) define “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”. Los agregados para la construcción de la subbase granular deberán satisfacer los requisitos de calidad indicados en la Tabla 1. Además, se deberán ajustar a alguna de las franjas granulométricas que se muestran en la Tabla 2. La evaluación de calidad se hace al material de control obtenido de la cantera de Sánchez Construcciones el cual se denomina SBG-C0.

Tabla 1*Requisitos de los agregados para subbases granulares*

Característica	Norma de ensayo INV	Subbase granular		
		Clase A	Clase B	Clase C
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de Los Ángeles (Granulometría A), máximo (%): - 500 revoluciones	E-218	50	50	50
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%).	E-238	30	35	-
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota): - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18	12 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
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, 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 (4 d) de inmersión, mínimo.	E-148	40	30	30

Nota. Información tomada del INVIAS (2022). Capítulo 3. Afirmados subbases y bases. Art 320-22.

Tabla 2*Franjas granulométricas SBG-38*

Tipo de gradación	Tamiz (mm / U.S. Standard)								
	50,0	37,5	25,0	12,5	9,5	4,75	2,00	0,425	0,075
	2 Pulgadas	1 ½ Pulgadas	1 Pulgada	1/2 Pulgada	3/8 Pulgada	Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200
Pasa tamiz (%)									
SBG-50 (Nota)	100	70 – 95	60 – 90	45 – 75	40 – 70	25 – 55	15 – 40	6 – 25	2 – 15
SBG-38 (Nota)	-	100	75 – 95	55 – 85	45 – 75	30 – 60	20 – 45	8 – 30	2 – 15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %			6 %			3 %	

Nota. Información tomada del INVIAS (2022). Capítulo 3. Afirmados subbases y bases. Art 320-22.

2.6.1. Ensayo Micro-Deval

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. (INVIAS, 2013). 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.

Figura 3

Equipo Micro-Deval para ensayo de degradación por abrasión INV E-238-13.



Nota. En la figura 3 se observa la máquina utilizada para este ensayo, el cual se dividió por un lado en gravas y por otro en finos en base a la norma INV E-238-13. Autores, 2023.

2.6.2. Solidez en sulfato de sodio

En este ensayo se busca observar y analizar cómo afecta el sulfato de sodio al material, lo cual ejemplifica el efecto que tiene las condiciones climatológicas como el hielo y deshielo afectando la resistencia y dureza de las gravas y arenas.

Figura 4

Gravas al inicio del primer ciclo del ensayo de solidos en sulfato de sodio.



Nota. En la figura 4 se muestra el inicio de la aplicación del sulfato de sodio para su primer ciclo. Autores, 2023.

2.6.3. Equivalente de arena

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).

Figura 5

Material fino de SBG-C0 durante el ensayo de equivalente de arena.



Nota. La figura presenta el material fino sumergido en la solución de trabajo. Autores, 2023.

2.6.4. Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales

Los agregados podrían contener elementos que pueden ser perjudiciales 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 deleznales (friables) en los agregados según la norma INV E-211-13. (INVIAS, 2013)

Figura 6

Lavado del material luego de estar sumergido en agua.



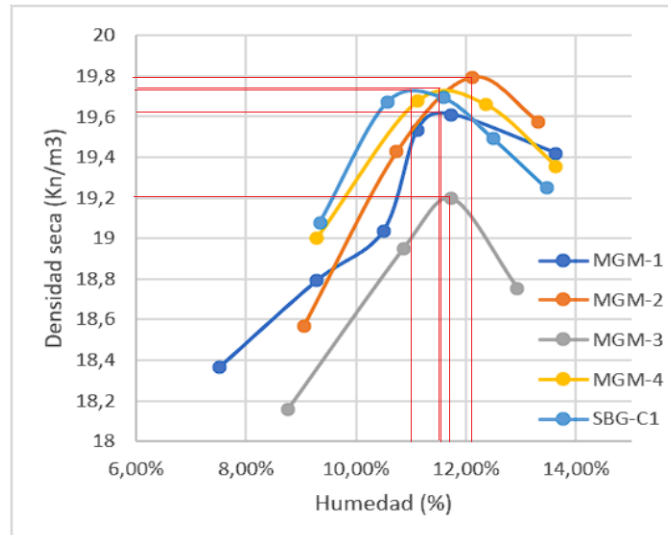
Nota. En la imagen se muestra el proceso de lavado con agua del material, después de estar sumergido en agua durante 24 horas. Autores, 2023.

2.7. Curvas de compactación

La curva de compactación es la relación entre la densidad seca y la humedad de las muestras de suelo compactadas con una cierta energía, y que presentan un límite máximo, según su naturaleza. (Yépez, 2013).

Figura 7

Curvas de compactación para MGMs 1, 2, 3, 4 y SBG-C1.



Nota. El gráfico presenta las curvas de compactación de los MGM evaluados. Los pesos unitarios secos máximos oscilan entre 19.2 y 19.8 N/m³. Autores, 2023.

3. Generalidades

3.1. Subbase granular SBG-C0

Es un material granular grueso compuesto por triturados, arena y material grueso (gravas) que provienen de la cantera Construcciones Sánchez (ubicada en la zona aledaña a Curos, Santander). Este material cumple con todos los ensayos de calidad para subbases granulares (ver Tabla 1, material clase C).

3.2. Subbase granular SBG-C1 (Paviandi)

Es un material compuesto por partículas sólidas de gravas y arenas. Son agregados provenientes de la cantera Paviandi (ubicada en la vía Piedecuesta-Aratoca en Santander). Las probetas MGMS 1-2-3-4 están compuestas de este material, partículas de arena y gravas mientras que el contenido de finos presente en ellas son una combinación entre material Paviandi y otro tipo de materiales como bentonita, caolinita y material de cantera.

3.3. Ensayos de laboratorio

Se requiere evaluar la calidad de los materiales empleados para la preparación de las probetas en estudio: MGM'S 1-2-3-4. Para la comparación se tienen en cuenta dos materiales de diferentes canteras SBG-C0 (Sánchez) y SBG-C1 (Paviandi), el material de control SBG-C0, a diferencia del material Paviandi SBG-C1, cumple con todos los ensayos de calidad para subbases granulares.

Para este proyecto de investigación se realizará el estudio a cuatro probetas con diferentes IP y contenidos de finos, También se hará la evaluación de calidad y gravedad específica de los materiales provenientes de las canteras de Sánchez (SBG-C0) y Paviandi (SBG-C1). el material empleado para la realización de las probetas proviene de la cantera Paviandi, a la cual se le realizó su respectiva granulometría, tamizado, lavado y secado para luego ser mezclada con su humedad óptima y posteriormente compactada con el compactador giratorio y luego ser estudiados y ensayados.

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

Tabla 3

Asignaciones y obtención de ensayos para las probetas MGMS 1-2-3-4.

MATERIAL	% FINOS	% IP	ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO	FASES
MGM1	18	8	4	1-2-3-A
MGM2	18	12	4	1-2-3-A
MGM3	18	15	4	1-2-3-A
MGM4	21	8	2	2 y 3
MGM4-R	21	8	2	1 y 2

Nota. La tabla 3, presenta los resultados para las cinco probetas. Autores, 2023.

Tabla 4

Distribuciones de ensayos de calidad y gravedad específica de SBG-C0.

Evaluación de calidad	Micro-Deval, equivalente de arena, contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, solidez en sulfatos.
Gravedad específica	Cantera Sánchez construcciones (Grava, arenas y pasa tamiz #200 de SBG-C0)

Nota. En la tabla se muestra las distribuciones de ensayos de calidad y gravedad específica de SBG-C0. Autores, 2023.

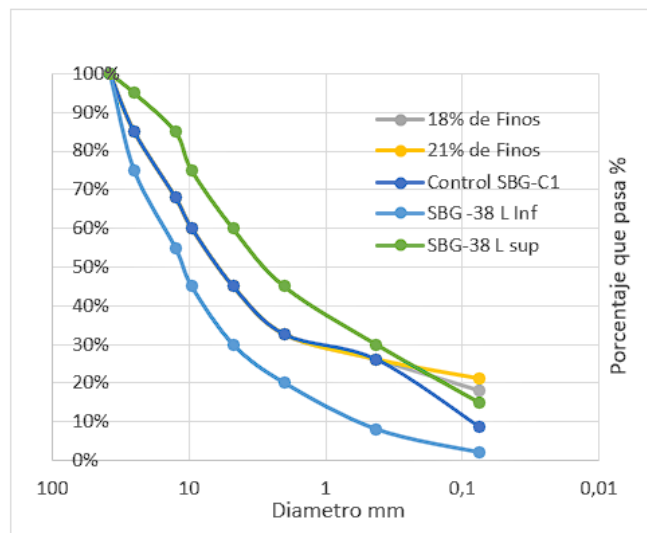
La granulometría de diseño empleada para determinar las proporciones con las cuales fabricar las probetas a ensayar de cada MGM presentan una alteración intencional en el contenido de finos

como se muestra en la figura 8, superando el máximo valor contemplado en las especificaciones de la norma INVIAS para subbases granulares SBG-38 (ver Tabla 2) (INVIAS, 2013), y así poder estudiar la influencia de la fracción fina en la respuesta mecánica de los materiales.

Para determinar las proporciones de la granulometría de cada MGM, se alterarán las muestras intencionalmente en sus porcentajes de finos de 18 y 21% para su estudio, el objetivo es evaluar la influencia del porcentaje finos e índice de plasticidad que no cumplen las especificaciones sobre la respuesta mecánica, para compararlos con la respuesta de materiales que cumplen en su totalidad o parcialmente las especificaciones INVIAS (Véase la Tabla 2).

Figura 8

Granulometría de control y de MGMS.



Nota. El gráfico presenta la curva granulométrica que se empleará para cada MGM, en las cuales se evidencia la marginalidad de los MGM'S al no cumplir con las especificaciones establecidas por el INVIAS para el contenido de finos, superando el límite superior (i.e., SBG-38 L Sup). Autores, 2023.

4. Metodología

Para poder determinar las proporciones de mezclado de finos para generar un índice de plasticidad (definido en este texto con el acrónimo IP) del doce por ciento, es necesario realizar ensayos de límite líquido (INV 125-13) y límite plástico (INV 126-13) establecidos en la norma (INVIAS 2013).

Para este propósito se utiliza una mezcla con material fino de cantera, caolinita, y bentonita. Esta información fue tomada de los registros del proyecto de investigación de otros autores, Martínez y Vargas (2022), en la cual se identificó y siguió esta metodología que proporciona información útil sobre el contenido de finos que es necesario para lograr una mezcla de finos con índice de plasticidad (IP) del 12% empleando los materiales ya mencionados que una vez combinados en las fracciones de la tabla 5 cumplirán la condición deseada $IP=12\%$.

Tabla 5

Porcentajes de material que pasa el tamiz número 200 para lograr una mezcla con $IP=12\%$.

% IP	Tamiz fondo	% Cantera	% Caolinita	% Bentonita
12	(pasa No.200)	49,43	49,43	1,14

Nota. Información tomada de Otros autores, Martínez, J. & Vargas. (2022).

4.1. Medición de succión total

Con este ensayo se determinó la succión total para cada una de las probetas de MGMS en cada una de las fases. se tomó como referencia la norma de ensayo INV E-159-13 (INVIAS, 2013). Inicialmente, se secaron los papeles de filtro en un horno dos veces por cada medición durante

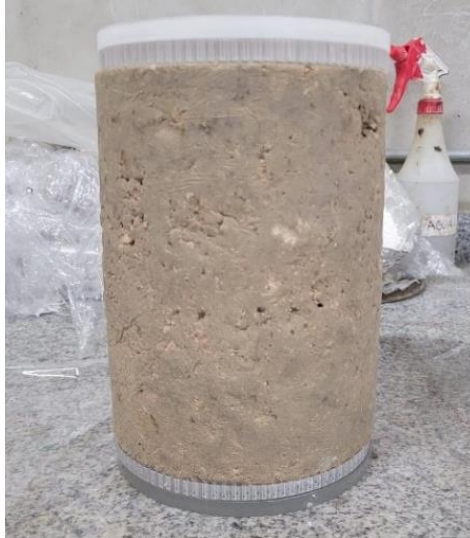
todas las fases, a una temperatura de 110 °C en un determinado tiempo que oscila entre 16- y 24 horas para posteriormente almacenarlo en una bolsa hermética hasta la ejecución del ensayo; esto con el fin de garantizar una humedad inicial del 0 %.

Sobre las probetas de suelo se colocó un disco de acrílico perforado de 6 cm de diámetro y 0.5 cm de espesor. Luego, se retiró de la bolsa hermética 2 papeles filtro e inmediatamente se colocaron sobre el disco acrílico perforado; seguido, se colocó un disco acrílico sin perforar (estilo sándwich). Dando continuidad al proceso se cerró el recipiente con vinipel asegurándose con cinta adhesiva y se guardó en una cava durante siete días aproximadamente para evitar variaciones externas de temperatura y humedad hasta llegar a su equilibrio de masa, para posteriormente determinar la succión y realizar el ensayo triaxial dinámico que determina el módulo resiliente de cada probeta. Al terminar el periodo de equilibrio, se realizó la toma de datos para la determinación de la succión total.

Para ello, se extrajo el papel de filtro y se colocó inmediatamente en una bolsa hermética la cual se debió pesar previamente (T_c). Seguidamente, se pesó la bolsa hermética con el papel de filtro (M_1) en una balanza con precisión de 0.0001 g; posteriormente, se sacó el papel de filtro, se secó en horno a 110°C durante dos horas, se volvió a pesar dentro de la bolsa hermética (M_2), se separó el papel de filtro de la bolsa hermética y se determinó su masa final (T_h).

Figura 9

Probeta de MGM con sistema de succión.



Nota. En la imagen se muestra la instalación tipo sándwich del sistema de succión. Autores, 2023.

4.2. Asignación de fases para cada MGM

Este proyecto de investigación evalúa los materiales MGM 1-2-3-4 en cada una de las fases con el orden que se describe a continuación: Fase 1 se determina después de ser compactada cada MGMs por el método giratorio; Fase 2, se determina al secado del menos dos por ciento de la humedad óptima. Fase 3, corresponde a una fase de humedecimiento en la cual se lleva la probeta a un contenido de humedad del uno por ciento por encima del contenido de humedad óptimo.

Fase A, en el cual la muestra se somete a condiciones de secado en el ambiente del laboratorio. Se van tomando los pesos y dimensiones, graficando la curva de secado hasta establecer un valor residual de contenido de agua o grado de saturación. Fase B, se somete la muestra a humedecimiento con ayuda del equipo humificador, estando la muestra dentro del box hasta

alcanzar una saturación total y su masa ya no adquiriera más agua y su valor sea constante, para ello se tomó como referencia la norma de ensayo INV E-159-13 (Martínez y Vargas, 2022).

Tabla 6

Asignaciones de fase para cada MGM'S para este proyecto.

MGMs	FASE A	FASE B	FASE 1-2-3-4-5
MGM 1	X	X	-
MGM 2	X	X	-
MGM 3	X	X	-
MGM 4-R	-	-	X

Nota. La tabla muestra la asignación de las fases de este proyecto para cada MGM Autores, 2023.

Con el fin de lograr los objetivos planeados se logró llevar a cabo las siguientes fases para cada probeta ya que ciertas fases no se terminaron. Cabe mencionar que a la MGM 4 se le realizó una réplica la MGM 4-R debido a que no se contaba con información de dicha probeta después de ser compactada; el procedimiento llevado a cabo fue la compactación de la réplica MGM 4-R a la cual se le realizaron las fases asignadas de la MGM 4 (ver Tabla 6). Se resalta que a esta no se le realizó módulo resiliente para la fase 3, ya que será realizada en la siguiente fase de continuidad del proyecto de investigación.

Tabla 7

Asignaciones realizadas de fases para cada MGM de este proyecto

MGM	FASE A	FASE B	FASE 1-2-3-4-5
MGM 1	Ok	LISTA PARA FASE B	-
MGM 2	Ok	LISTA PARA FASE B	-

MGM 3	Ok	LISTA PARA FASE B	-
MGM 4-R	-	-	LISTA PARA ENSAYO TRIAXIAL EN FASE 3

Nota: En la tabla se indican las fases realizadas a cada MGM y su realización a proceder a la siguiente Fase. Autores, 2023.

4.3. Protocolos de ensayo

Se determinarán los procedimientos para ejecutar los ensayos de laboratorio teniendo en cuenta su respectiva normativa, la cual contiene las características de los materiales objeto de ensayo, su ejecución, las cantidades, disponibilidad de personal, y el equipo necesario para ejecutar los ensayos con sus respectivos resultados a analizar.

4.4. Evaluación de calidad

Se desarrollaron ensayos de: Micro-Deval, solidez en sulfatos, equivalente de arena, contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales. Los anteriores ensayos se le aplicaron al material de control de subbase granular denominado (SBG-CO).

4.4.1. Equivalente de arena

Se tuvo en cuenta la metodología descrita en la norma INV E – 133-13, INVIAS (2013), para aplicar este ensayo al material SBG-C0. Se realizó para este ensayo 6 réplicas con el fin de cuantificar la variabilidad de un solo operador (d2s) y poder tener mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.

Figura 10

Medición de la altura en pulgadas de la arena durante el ensayo.



Nota. En la imagen se observa la primera réplica realizada para la medición de altura de la arena del ensayo. Autores, 2023.

4.4.2. Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval

Después de la revisión y comprensión de las normas INV E-238-13 e INV E-245-13 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. (INVIAS, 2013) Cada cilindro contenía esferas y agua, con cantidades dadas por las normas de ensayo.

Figura 11

Recipientes utilizados para el ensayo de desgaste por maquina Micro-Deval



Nota. En la imagen se exhiben los cilindros del equipo micro-Deval usados para realizar el ensayo. Autores, 2023.

4.4.3. Solidez en sulfatos

Se utilizó la metodología de la norma INV E-220-13, siguiendo paso a paso sus solicitudes y requerimientos. (INVIAS, 2013). En este ensayo realizado al material de gravas y finos se utilizó un tipo de sulfato de sodio denominado Anhídrido y se desarrolló en cinco ciclos para este ensayo. La cantidad utilizada fue de 350 gramos de sulfato de sodio por litro de agua.

4.4.4. Terrones de arcilla y partículas deleznales

Empleando 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 SBG-C0 (Sánchez Construcciones), logrando cuantificar este parámetro en cada una de las fracciones dadas por la norma. En este caso 3 fracciones para gravas y una para finos.

4.5. Tamizado de la sub-base granular

Para el tamizado de los materiales traídos al laboratorio de las canteras (SBG-C0) y (SBG-C1), 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. Para los finos se utilizó el material que pasa este último tamiz, haciendo uso de la tamizadora y los tamices No. 10, No. 40, No. 200, y fondo.

El material retenido en cada fracción se separó en sacos, almacenándolo por separado, para luego ser utilizados en la realización de cada probeta. En el presente proyecto de investigación las probetas a estudiar ya estaban creadas, pero se realizó la réplica a la probeta MGM4 ya que faltaba un dato de dicha probeta (Fase 1). Con la realización de la MGM 4-R se obtuvo el dato faltante.

4.6. Ensayo triaxial dinámico y determinación del módulo resiliente

El ensayo triaxial dinámico se realizó para obtener el módulo resiliente de las cuatro probetas de MGMS asignadas a este proyecto de investigación en sus diferentes condiciones; después de la compactación como en trayectoria de secado (humedad óptima menos dos puntos porcentuales) y humedecimiento (humedad óptima más un punto porcentual), cada vez que se terminó una fase para los MGM o una probeta nueva compactada de MGM, se procedió a realizar la medición de módulo resiliente con la ayuda del equipo triaxial dinámico (figura 12). La guía que se siguió para la utilización del equipo, manejo de la probeta y la configuración utilizada para este ensayo se estableció por la metodología mencionada en la norma AASHTO T307-99 del 2007 (AASHTO, 2007).

Figura 12

Montaje de probeta de MGM'S para ensayo triaxial dinámico



Nota. La imagen presenta el montaje de la probeta MGM'S en el equipo triaxial para el ensayo triaxial dinámico, logrando de esa manera la medición de módulo resiliente. Autores, 2023.

Para el caso de las probetas MGMS 1-2-3 ya habían terminado su fase de más un punto porcentual de su humedad óptima (fase 3); este acondicionamiento fue realizado por otros autores del actual proyecto de investigación. Estas probetas entrarían a fases de secado máximo y humedad máxima (Fase A-B), esto con el fin de conocer cómo se comporta mecánicamente simulando el material en campo, ya que se enfrentará a lluvias en invierno y pérdida de humedad en temporadas de verano.

Cada probeta fue pesada y medida antes de iniciar el estudio, como se requería llevar a secado máximo las probetas, primeramente, se procedió a introducir la probeta MGM 3 dentro de un box sellado con vinipel y cinta de papel con un hidrómetro para medir HR (humedad relativa) y T (temperatura ambiente), mientras que las probetas de MGMS 1 y 2 se encontraban en secado a ambiente. Luego, dentro de una tara se aplicó agua con sal con una mezcla compuesta por 1 litro de agua para 100 gramos de sal, lo que simula un ambiente controlado para inducir un secado más rápido la muestra (en comparación con la condición ambiental del laboratorio).

Posteriormente, se llenó la tara a su totalidad de solo sal y simultáneamente las probetas de MGMS 1 y 2, que se encontraban en secado máximo al aire, perdían más humedad en comparación con la probeta de MGM 3. Por lo anterior, se optó por llevar el secado máximo al aire libre en el entorno del laboratorio y tomando la masa cada cierto periodo de tiempo para determinar si ya se encontraba en su secado máximo, por lo cual tendría poca humedad aproximándose a cero. Una vez terminada la fase A (secado máximo), (ver figura 12), se procedió a tomar el peso de las probetas para continuar con la fase B. Figura 13.

Figura 13

Pesaje y control de probeta MGM secada al aire libre



Nota. La imagen evidencia la toma del peso con la balanza de una de las probetas en la Fase A. Autores, 2023.

La probeta MGM 4 se encontraba en fase 1 recién compactada, pero sin datos de módulo resiliente y peso después de ser compactada, se optó por aplicar el método de secado al aire libre para llegar por debajo de dos puntos porcentuales de su humedad óptima (Fase 2). Luego, para lograr la humedad al más uno por ciento de su humedad óptima, se procedió a introducir dentro de

un box para aplicarle vapor de agua con la ayuda de un equipo que vaporiza el agua. Véase figura 14.

Con la ayuda de este equipo y la toma de datos en intervalos diferentes de tiempo durante los días de la semana, se determinó cuando la muestra estaba en el rango necesario para proceder a estabilizar con su sistema de succión dentro de una cava y continuar con la puesta en marcha del ensayo triaxial dinámico la determinación de su módulo resiliente.

Figura 14

Humedecimiento de MGMS con la ayuda de equipo humificador



Nota. En la figura se observa el procedimiento de humedecimiento de la probeta, donde se introdujo dentro de un box para aplicarle vapor de agua con la ayuda de un equipo que vaporiza el agua. Autores, 2023.

4.7. Medición de gravedad específica de sólidos

Se realizaron ensayos de gravedad específica para gravas, arenas, y finos. Los finos se caracterizaron según la norma INV E-128-13 (ver apéndice F3) (INVIAS, 2013). Para determinar los valores de gravedad específica de las gravas y arenas de la subbase granular SBG-C0 se

siguieron las normas de ensayo INV E-223-13 e INV E-222-13 respectivamente. (INVIAS, 2013). (ver apéndice F1 y F2).

Los valores obtenidos de gravedad específica de gravas, arenas, y finos determinados como se mencionó anteriormente fueron usados para calcular la gravedad específica del agregado combinado, a través de la ecuación (1).

Ecuación 1

Peso específico Bruto (Bulk) Laboratorio

$$Gsb = \frac{P_1 + P_2 + P_n}{\frac{P_1}{Gsb_1} + \frac{P_2}{Gsb_2} + \frac{P_n}{Gsb_n}}$$

Gsb = Gravedad específica aparente ponderada del agregado.

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

Gsi = Gravedad específica aparente de la fracción de agregado i .

Nota. La ecuación es empleada para calcular la gravedad específica del agregado combinado.

Los resultados de gravedad específica aparente ponderada del agregado SBG-C0 se presenta en el apéndice F4.

5. Análisis y Resultados

5.1. Datos de MGMS compactados

Se realizó la réplica de la MGM 4 teniendo en cuenta su granulometría y humedad óptima de compactación. Luego de ser compactada la probeta, se obtuvo los parámetros indicados en la Tabla 8.

Tabla 8

Resultados de la probeta MGM 4-R después de compactar.

PROBETA	MASA (g)	% W obtenido	% W objetivo	Ws (Kg)	Ww (Kg)	γ_d (Kg/m³)
MGM 4-R	7781	11,52	11,60	6,96	0,82	1970,4

Nota. Se muestran datos obtenidos de la probeta MGM 4R después del proceso de compactación.

Autores, 2023.

W. obtenido: Humedad real de la probeta después de compactación

W. objetivo: Humedad óptima de la probeta después de compactación que se desea obtener

Ws: Peso seco de la probeta

Ww: Peso del agua de la probeta

Yd: Peso específico seco

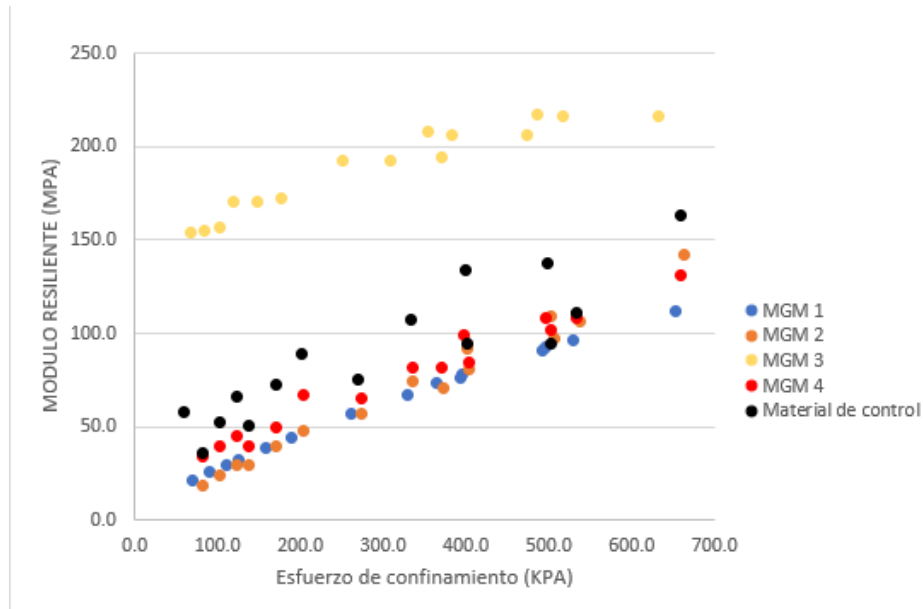
5.2. Módulo resiliente de MGMS 1, 2, 3, y 4-R después de compactar (Fase 1)

En la figura 15, se comparan los módulos resilientes de MGM 1, 2, 3, y 4-R en fase 1 (después de compactación) con el módulo resiliente del material de control (SBG-C1-1-Paviandi) que tiene un IP de 0% con un porcentaje de finos de 8,5%. Se puede visualizar que el módulo resiliente es mayor en el material MGM 3 y a su vez tiene mayor rigidez que los demás materiales e incluso mayor que el material de control. Variaciones en la energía de compactación de las probetas podrían explicar estas diferencias de rigidez, dado que las probetas fueron compactadas controlando su altura en el compactador giratorio y permitiendo un número de giros libre para alcanzar la altura definida (i.e., 20 cm).

Por otra parte, al analizar la probeta y la MGM 4-R, las cuales tiene igual IP del 8%, pero diferente porcentaje de finos el cual es de 18% y 21% respectivamente se observa que la MGM4-R tiene mayor módulo resiliente, es decir en este caso para esta fase, a mayor porcentaje de finos mayor módulo resiliente, por otra parte, la mayoría de los módulos resilientes de los MGMS guardan la tendencia en la que presentan menores valores de modulo resiliente que el material de control. (ver figura 15). Se recomienda realizar investigación adicional para evaluar estas respuestas, las cuales en principio son contradictorias con lo esperado a nivel teórico.

Figura 15

Módulo resiliente de MGMs después de compactación Vs SBG-C1.



Nota. En el gráfico se expone la comparación de los módulos resilientes de MGM 1, 2, 3, y 4-R en fase 1 (después de compactación) con el material de control (SBG-C1-1-Paviandi), evidenciando que el módulo resiliente es mayor en el material MGM 3 y a su vez tiene mayor rigidez que los demás materiales e incluso mayor que el material de control. Autores, 2023.

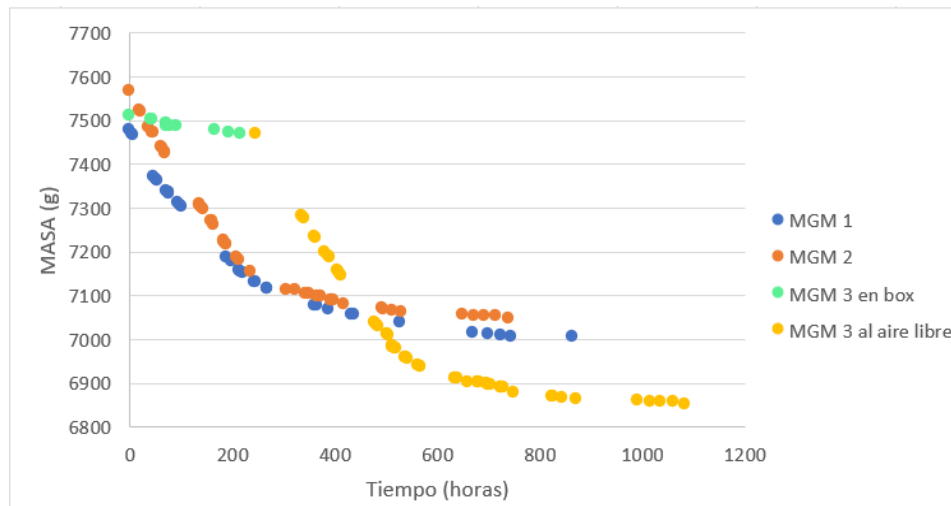
5.3. Trayectoria de secado de MGMs 1, 2, 3, y 4-R

Las probetas MGMs 1, 2, y 3 fueron llevadas a Fase A (secado máximo); en este ciclo se dejaron al aire libre, permitiendo que el porcentaje de humedad tienda a un contenido de humedad residual cercana e incluso menor al uno por ciento en determinado tiempo. Cabe resaltar, que a la probeta MGM 3, las primeras doscientas diecisiete horas de la trayectoria de secado de la muestra (MGM 3), se realizó en un ambiente controlado por una solución salina dentro de una caja de acrílico

aislada del ambiente de laboratorio; por tal razón, la tasa de pérdida de agua es menor que en condiciones de secado al aire en el ambiente de laboratorio.

Figura 16

Trayectoria de secado de los MGMS 1, 2, y 3 (secado al aire-Fase A).



Nota. El gráfico indica y compara la trayectoria de secado de los MGM's a lo largo del tiempo y condiciones diferentes de entorno; dejando en evidencia que el secado o pérdida de agua en situación salina es menor que en condiciones de secado al aire en el ambiente de laboratorio Autores, 2023.

Tabla 9

Resultado de masas y humedades de los MGMs en su trayectoria de secado máximo.

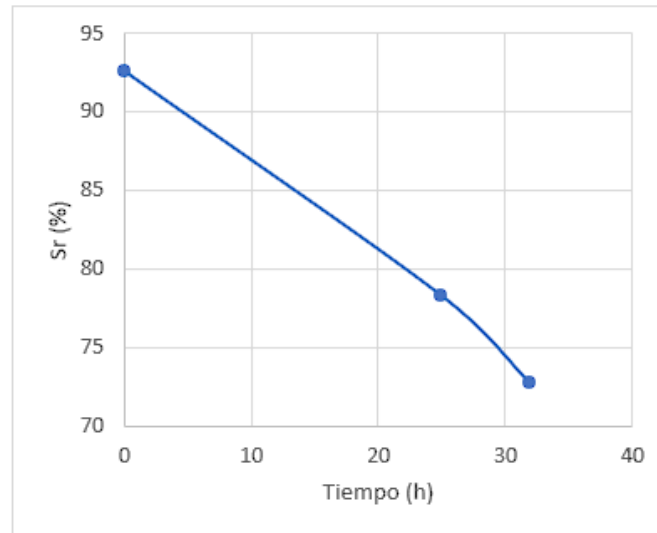
PROBETA	MASA INICIAL (gr)	MASA FINAL (gr)	HUMEDAD (%)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)
MGM 1	7477	7006	11	7,83	1,03
MGM 2	7566	7047	11,7	8,01	0,6
MGM 3	7468	6851	11,7	9,9	0,82

Nota. En la tabla se aprecia el resumen de control de masa y humedad de MGMs 1, 2, y 3 en la fase de secado máximo. Autores, 2023.

En el caso de la réplica de la probeta del MGM 4, se muestra el comportamiento de secado para la probeta MGM 4 -R de la fase dos que corresponde a menos dos puntos porcentuales respecto a su humedad óptima. Una vez se alcanzó la humedad objetivo, se aísla de las condiciones ambientales del laboratorio durante un periodo de aproximadamente siete días para alcanzar el equilibrio de la succión impuesta por el secado.

Figura 17

Grado de saturación (S_r) Vs tiempo del MGM 4-R (Fase 2)



Nota. En el gráfico se evidencia la disminución del grado de saturación para alcanzar la humedad objetivo de la probeta MGM 4R en fase dos. Autores, 2023.

En el caso de los datos del equilibrio del MGM 4-R de la fase de menos dos puntos porcentuales de la humedad óptima, se obtuvo su peso inicial el cual fue de 7643 g y su peso antes del ensayo triaxial dinámico de 7638 g, es decir, que la probeta perdió 5 g en el equilibrio; se pesó diariamente para poder saber su estado de equilibrio y poder realizar el ensayo triaxial dinámico y así avanzar a la fase tres (i.e., más un punto porcentual de su humedad óptima).

Tabla 10

Datos iniciales de equilibrio y masa de probeta antes de Modulo Resiliente en Fase dos

DATOS INICIALES DE EQUILIBRIO			
Peso Probeta	Peso de Sistema succión	Peso Total del sistema	Peso de probeta antes de modulo resiliente fase 2

7643 gr	649 gr	8292 gr	7638 gr
----------------	--------	---------	---------

Nota. En la tabla se muestran los datos al iniciar el equilibrio de la probeta Autores, 2023.

El control de masa y humedad para lograr el objetivo de la MGM4-R en la fase de menos dos por ciento de la humedad óptima, se logró con un control en la toma de datos, sobre todo la masa respecto al tiempo.

Tabla 11

Control de masa de trayectoria de secado menos dos por ciento de la humedad óptima de la MGM4-R Fase 2.

PROBETA	MASA INICIAL (gr)	MASA OBJETIVO (gr)	HUMEDAD (%)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD OBJETIVO (%)
MGM 4-R Fase 2	7771	7641	11,52	11,38	9,52

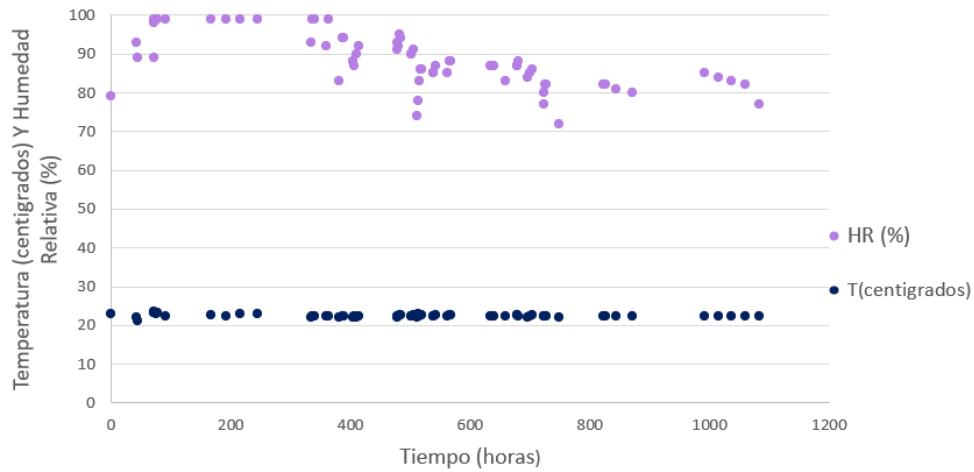
Nota. En la tabla se evidencia el control de masa en el secado menos dos por ciento de la humedad óptima y los valores correspondientes mostrados para la MGM 4-R. Autores, 2023.

5.4. Humedad relativa y temperatura versus tiempo en fase de secado máximo de MGMS

Durante las trayectorias de secado en el ambiente de laboratorio y en el "box", se realizaron mediciones de humedad relativa y temperatura para tener una aproximación de la succión total impuesta por las condiciones ambientales. Las mediciones de temperatura presentaron variaciones entre 20 y 25 °C. Por otra parte, las mediciones de HR varían entre 80% y 90%. Los valores de HR cercanos al 100% corresponden a mediciones en la caja de acrílico sellada.

Figura 18

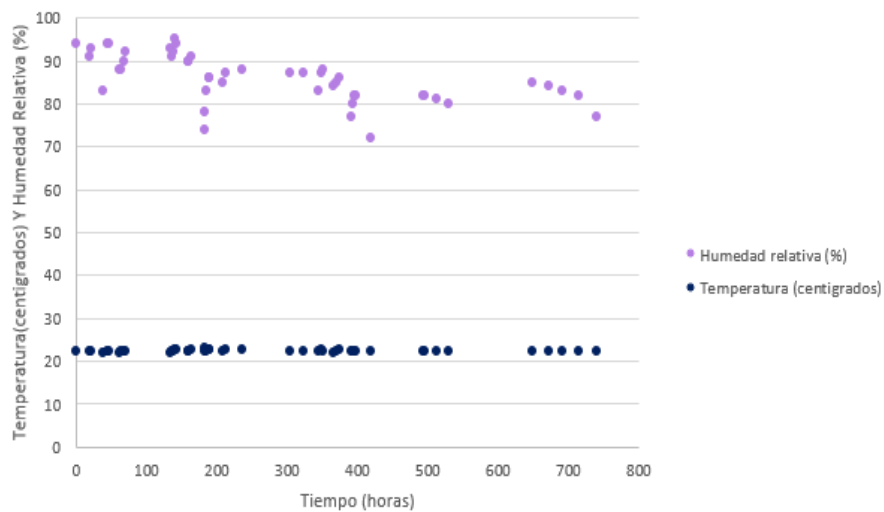
Humedad relativa y temperatura Vs tiempo en fase de secado máximo (Fase A) de MGM 1.



Nota. Se evidencia en el gráfico la humedad relativa y temperatura de la MGM 1 fase A, dentro de las instalaciones de laboratorio de la Universidad. Autores, 2023.

Figura 19

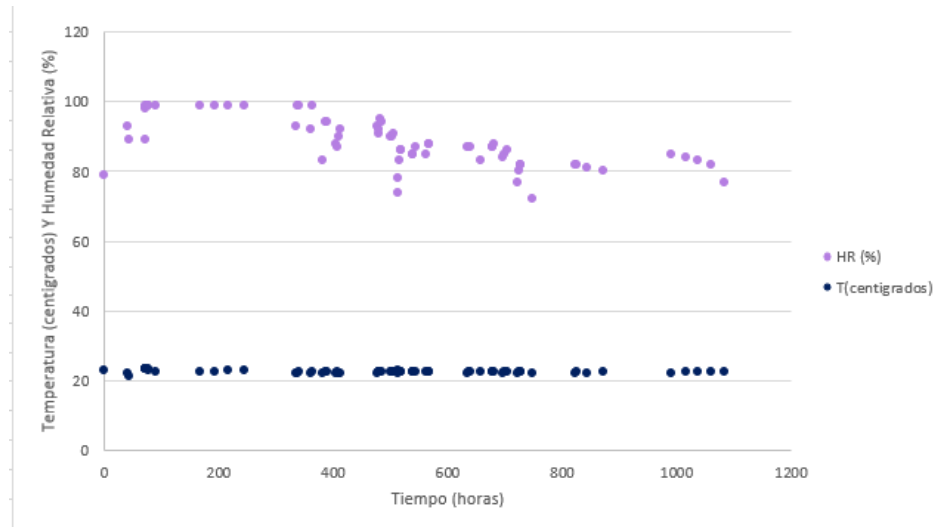
Humedad relativa y temperatura Vs tiempo en fase de secado máximo (Fase A) de MGM 2.



Nota. Se evidencia en el gráfico la humedad relativa y temperatura de la MGM 2 fase A, dentro de las instalaciones de laboratorio de la Universidad. Autores, 2023.

Figura 20

Humedad relativa y temperatura Vs tiempo en fase de secado máximo (Fase A) de MGM 3.



Nota. Se evidencia en el gráfico la humedad relativa y temperatura de la MGM 3 fase A, dentro de las instalaciones de laboratorio de la Universidad. Autores, 2023.

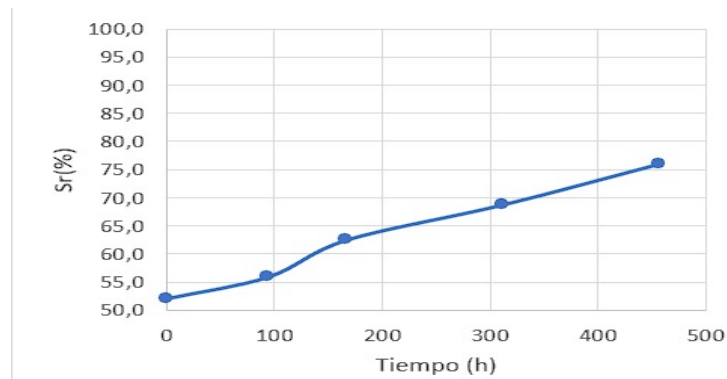
5.5. Trayectoria de humedecimiento de la MGM 4-R

Así mismo, luego de terminar la fase dos se evidencia el comportamiento de humedecimiento de la probeta MGM 4-R en su fase tres, que corresponde a la humedad óptima más un punto porcentual. Seguido, se procedió a humedecer la probeta con la ayuda del equipo vaporizador de agua obteniendo un humedecimiento más acelerado y homogéneo en todas las caras de la probeta, se llevó la muestra a humedad óptima más un punto porcentual. Obteniendo una saturación de aproximadamente 76% en 460 horas. Para esta probeta no se alcanzó a realizar el proceso de

equilibrio con el sistema de succión (ver figura 21) y por ende no se le determinó el Módulo resiliente para esta fase 3.

Figura 21

Grado de saturación Vs tiempo para el MGM 4-R (más un punto porcentual de la humedad óptima)



Nota. En el gráfico se representa la relación del grado de saturación obtenido al llevar la muestra MGM 4-R a su humedad óptima más un punto porcentual. Autores, 2023.

Tabla 12

Control de masa de trayectoria de humedecimiento al más un punto porcentual de la humedad óptima de la MGM4 R fase tres.

PROBETA	MASA INICIAL (gr)	MASA OBJETIVO (gr)	HUMEDAD (%)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD OBJETIVO (%)
MGM 4-R Fase 3	7638	7851	11,52	9,47	12,52

Nota. La tabla muestra el resumen del control de masa y humedad para lograr el objetivo en la fase de humedecimiento del MGM4-R. Autores, 2023.

5.6. Módulo resiliente en trayectoria de secado

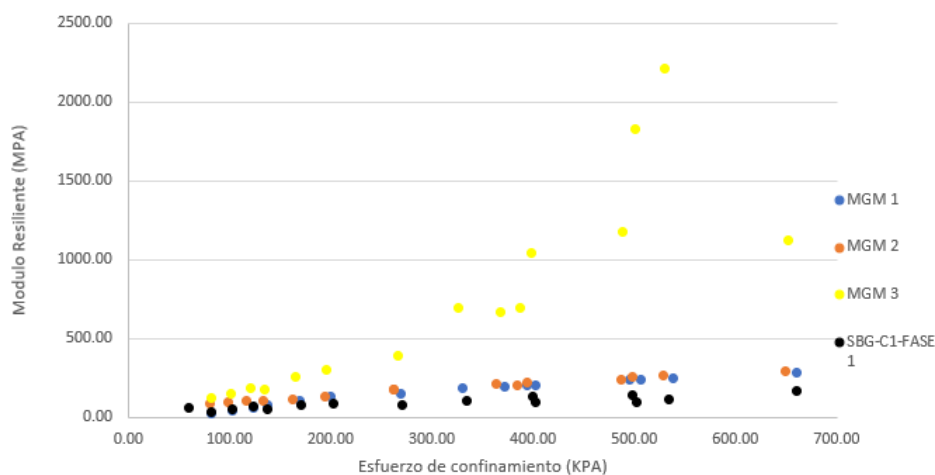
La trayectoria de secado se divide en: secado máximo al aire libre (Fase A) y secado hasta humedad óptima menos el dos por ciento para el MGM.

5.6.1. Módulo resiliente de secado máximo (Fase A)

Se determinó el módulo resiliente para las probetas de los MGMS 1, 2, y 3 en fase de secado máximo; es decir, cuando su masa se alcanza un valor constante y su humedad era cercana a cero, como por ejemplo en el caso de la MGM 1 en su fase de secado máximo. Véase figura 22 y 23.

Figura 22

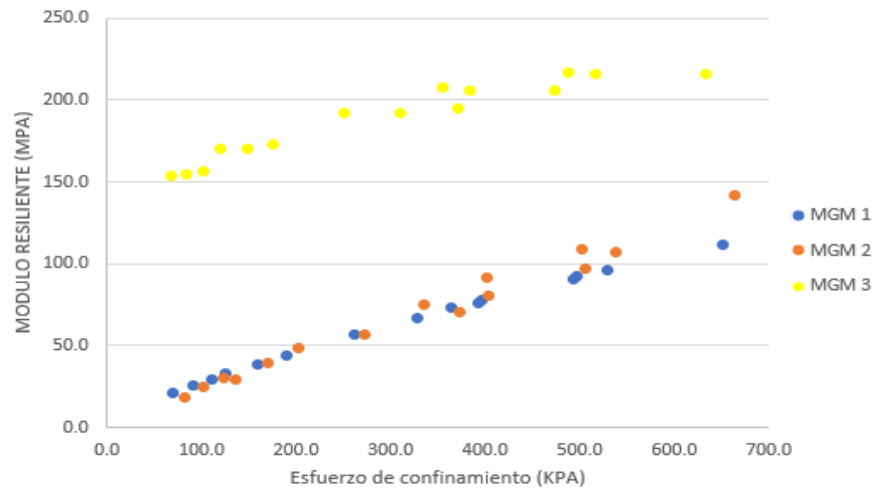
Módulo resiliente de la MGMS 1, 2, 3 en Fase A secado máximo versus material de control después de compactar.



Nota. En el gráfico se presenta la determinación del módulo resiliente de MGM's 1, 2, 3, Fase A, donde se refleja que la MGM 3 (con 18% de finos y un IP de 15%) tiene un módulo resiliente más alto, mostrando como cambian los módulos resilientes en secado extremo Autores, 2023.

Figura 23

Módulo resiliente de las MGMs 1, 2,3 después de compactar



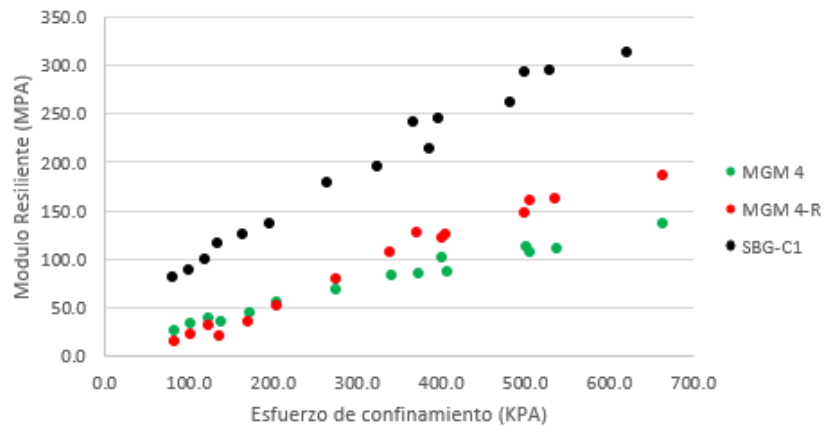
Nota. En el gráfico se muestra la determinación del módulo resiliente de MGM's 1, 2, 3, después de compactar, incrementándose más del cien por ciento su modulo resiliente Autores, 2023.

5.6.2. Módulo resiliente de MGM 4 y MGM 4-R en condición de secado del menos dos puntos porcentuales por debajo de la humedad óptima

Se evidencia que este MGM-4 presenta menor módulo resiliente respecto al material de control SBG-C1, que tiene un IP de 0% y porcentaje de finos del 8.5%. Es decir, al compararlos se puede indicar que, a menor índice de plasticidad y menor porcentaje de finos, mayor módulo resiliente, lo cual coincide con lo esperado a nivel teórico. Adicionalmente, llama la atención la diferencia en los módulos resilientes entre las dos réplicas de MGM4 para esfuerzos de confinamiento mayor a 350kPa. Lo cual sugiere realizar más réplicas para comprobar tendencias con fines estadísticos.

Figura 24

Módulo resiliente del material MGM 4 y material de control SBG-C1 en fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima (Fase 2).



Nota. El gráfico presenta los módulos resilientes de fase dos (humedad óptima menos dos por ciento) del material MGM-4. Autores, 2023.

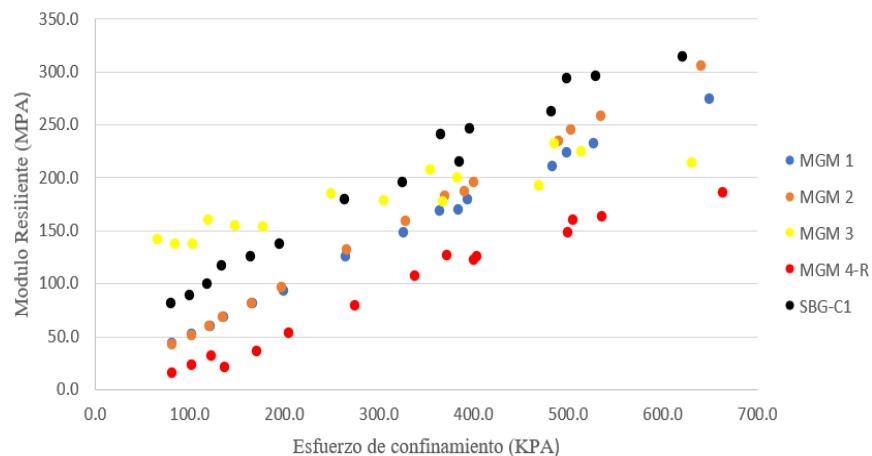
5.6.3. Módulos resilientes en humedad óptima menos dos por ciento (Fase 2) de MGMS

La MGM 2 tiene un buen comportamiento siendo la más cercana a los valores del material de control, en la fase dos se puede decir que el material MGM 2 tiene mejor respuesta mecánica en comparación con los demás MGMS siendo comparadas con el material de control SBG-C1. El material de control SBG-C1 (IP de 0% y porcentaje de finos del 8.5%) tiene mayor módulo resiliente que el MGM 1 (IP 8% y porcentaje de finos del 18%), MGM 2 (IP 12% y porcentaje de finos 18%), MGM 3 (IP 15% y porcentaje de finos 18%), y a su vez MGM 4 (IP 8% y porcentaje de finos del 21%), siendo este último el de mayor porcentaje de finos y a su vez de menor módulo resiliente.

En consecuencia, se puede analizar que entre menor porcentaje de finos menor es su afectación en el módulo resiliente en esta fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima.

Figura 25

Módulo resiliente de MGMS Vs material de Control SBG-C1, en fase dos.



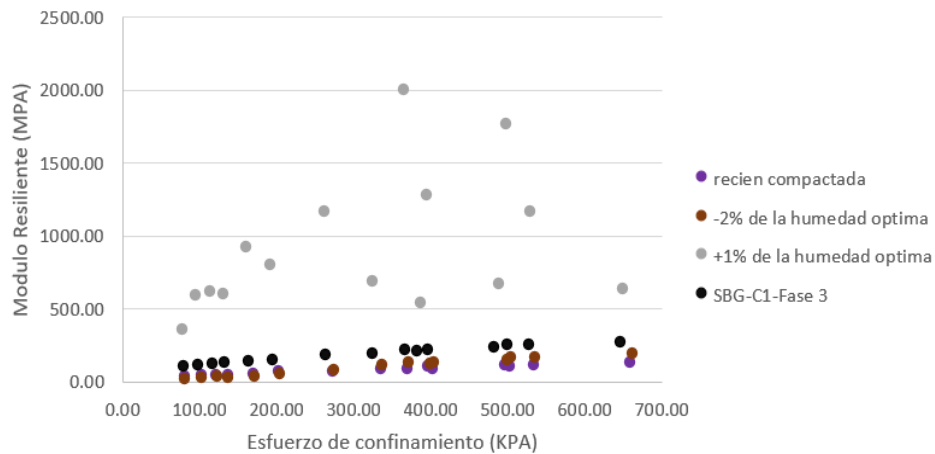
Nota. En la figura se aprecia mayor módulo resiliente del material de control con respecto a los demás materiales de estudio, acercándose a los datos del material de control los registrados por la MGM2 con una mejor respuesta mecánica. Autores, 2023.

5.7. Módulo resiliente de MGM 4 en sus diferentes fases

A partir de los datos presentados en las figuras 22 y 26 se puede observar que, al llevar el material a un secado de menos dos por ciento de su humedad óptima, el material adquiere mayor módulo resiliente en comparación con su módulo al ser evaluada después de compactada (i.e., humedad óptima de compactación).

Figura 26

Módulo resiliente de MGM 4 en diferentes fases versus material de control.



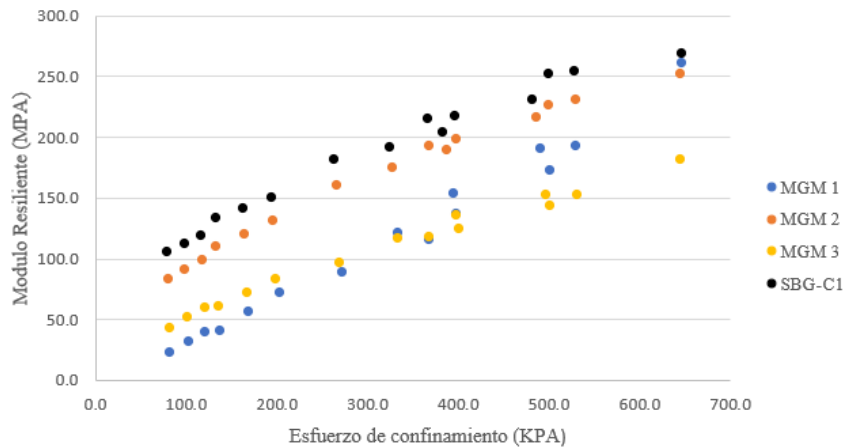
Nota. Autores, 2023

5.7.1. Módulo resiliente de los MGMS 1, 2, 3, y 4 Versus SBG-C1 en fase de más un punto porcentual de la humedad óptima (Fase 3)

A partir de estos resultados se puede determinar que el material de control (que tiene 8.5% de finos), supera en modulo resiliente a los demás materiales.

Figura 27

Módulo resiliente de MGM 1-2-3 VS SBG-C1 (Fase 3).



Nota. La figura incluye los datos de módulo resiliente de MGM 1, 2, y 3, se comparan con el del material de control SBG-C1 en condición de fase 3. Autores, 2023.

Ciertas probetas en este proyecto de investigación en fases distintas de secado superaron al módulo resiliente de control, lo cual muestra que adquieren rigidez con el secado o al tener menor presencia de agua. Es importante considerar que se puede mejorar los MGMS con el fin de brindar un comportamiento mecánico que cumpla con los requisitos mínimos para un buen funcionamiento como capas de subbase granular y si es posible en capas de bases granulares de vías de bajo nivel de tránsito.

5.8. Ensayos de calidad

Los MGM son materiales que no se ajustan totalmente a las especificaciones dadas por INVIAS. Para fines de este proyecto de investigación realizado en Colombia se tomó como referencia las especificaciones de la norma invias. (INVIAS, 2022). Se observa la comparación de

los ensayos obtenidos sobre el material SBG-C0 de Sánchez Construcciones con las especificaciones dadas por la norma INVIAS.

Tabla 13

Control de calidad de material SBG-C0.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	OBTENIDOS SOBRE MATERIALSBG-C0		CRITERIO
		GRAVAS	FINOS	
Dureza [O]				
Degradación por abrasión en el equipo Micro- Deval, máximo [35%]	E-238	6.8	13.2	CUMPLE
Durabilidad [O]				
Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo [12%] Sulfato de sodio	E-220	5.7	4.3	CUMPLE
Limpieza [F]				
Equivalente de arena, mínimo [25%]	E-133	-	76.6	CUMPLE
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo [2%]	E-211	2	7.7	CUMPLE GRAVAS NO CUMPLE EN FINOS

Nota. Información tomada de la norma INVIAS en su Artículo 320-13.

5.9. Gravedad específica

En la tabla 14 se presentan los valores de gravedad específica de gravas, arenas, y finos del material SBG-C0.

Tabla 14

Valores de gravedad específica aparente de SBG-C0 (gravas, arenas, y finos)

Tamaño Partícula	Cantera Sánchez
Gravas	2.689
Arenas	2.63

Finos	2.702
-------	-------

Nota. La tabla indica los valores de gravedad específica de partículas del material de control SBG-CO, proveniente de la Cantera Sánchez. Autores, 2023.

Por medio de la ecuación uno se calcula la gravedad específica aparente del agregado combinado de MGMS en estudio. Además, para la obtención de cada valor de gravedad específica de gravas, arenas, y finos, se procedió a realizar sus respectivos ensayos con varias replicas. Los resultados correspondientes se presentan en las tablas incluidas en los apéndices F1, F2, y F3. Adicional Véase tabla 15 (ver apéndice F4 y F5).

Tabla 15

Gravedad específica de probetas MGM 1, 2, 3, y 4

Probeta	Proporción Gravas		Proporción Arenas		Proporción Finos					Gs
	Cantera Sanchez	Cantera Paviandi	Cantera Sanchez	Cantera Paviandi	Cantera Sanchez	Cantera Paviandi	Triturado Paviandi	Caolinita	Bentonita	
MGM-1	0.00%	55.00%	0.00%	27.00%	0.00%	15.21%	2.79%	0.00%	0.00%	2.626
MGM-2	0.00%	55.00%	0.00%	27.00%	0.00%	8.90%	0.00%	8.90%	0.21%	2.625
MGM-3	0.00%	55.00%	0.00%	27.00%	0.00%	8.79%	0.00%	8.79%	0.42%	2.624
MGM-4	0.00%	55.00%	0.00%	24.00%	0.00%	17.75%	3.26%	0.00%	0.00%	2.628

Nota. La tabla muestra los resultados correspondientes al cálculo de la gravedad específica de aparente del agregado combinado de MGM's. Autores, 2023.

6. Conclusiones

Comparando los valores de modulo resiliente en estado inicial de compactación, se puede observar que los MGM presentan menores valores que la muestra de control, lo cual está en concordancia con los resultados esperados para este tipo de materiales que no cumple con la Norma. Sin embargo, llama la atención los resultados de la probeta MGM3, que superaron el material de control significativamente. Esto implica que se requieren muestras réplica compactadas con el mismo número de giros para reducir esta variable de incertidumbre.

Los resultados sugieren que las trayectorias de secado y humedecimiento en materiales granulares marginales tienen una influencia sobre el comportamiento mecánico expresado en términos del módulo resiliente. Se destacan los módulos resilientes obtenidos en condiciones de secado extremo, llevando a incrementos incluso mayor al 100% en el módulo resiliente.

Comparando el comportamiento en estado de compactación inicial con el de humedecimiento. En general se observan reducciones en el módulo resiliente de aproximadamente 40 % para las muestras analizadas, en especial para la MGM 3, excepto la MGM4 que presentó un comportamiento anómalo y disperso en esta fase.

7. Sugerencias y Recomendaciones

En futuras investigaciones se sugiere aplicar diferentes tipos de emulsiones para aumentar la resistencia mecánica de estos materiales granulares marginales cuando estén en ambientes

húmedos o de gran flujo de agua para así aumentar su calidad, desempeño y durabilidad en aplicación para construcción de futuras bases granular de vías de medio y bajo tránsito vehicular.

Además, llevar al MGM 4 a demás fases para ver su desempeño y comportamiento.

Referencias Bibliográficas

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2007)

Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. Ensayo triaxial con carga cíclica para mezclas sin ligante. T 307 -99 (AASHTO, 2007).

<https://es.scribd.com/document/319490653/AASHTO-T-307-2007>.

AASHTO T 307-99 (2007). Determinación del módulo resiliente de suelos y materiales agregados.

Cáceres O., Rodríguez A. (2021). Estimación de la resistencia monotónica en materiales granulares marginales como alternativa en la construcción de vías. [Tesis de Pregrado Publicada] Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. p. 14 y 15.

Camacho, J., Reyes, O. & Méndez, D. (2007). Ensayo de compactación giratoria en suelos como alternativa al ensayo de compactación Proctor. Ciencia E Ingeniería Neogranadina, 17(2), p. 67-81

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.

Correa, E. (2017). EL rol de las vías terciarias en la construcción de un nuevo país. Revista de Ingeniería, N° 45, p. 64-71.

Departamento Nacional de Planeación. (2018). Mejoramiento de vías terciarias- vías de tercer orden. Proyectos Tipo, versión 1.0.

Herrera-Montealegre, M. (2014). Determinación del Módulo Resiliente de Pavimentos Mediante Criterios de AASHTO 1993 y 2002. 1–98.

INVIAS. (2019). Estado actual de la red vial terciaria. (Rta INVIAS 034). Bogotá D.C., Colombia. p. 2.

INVIAS. (2016). Clasificación de las carreteras. Recuperado de:

<https://www.invias.gov.co/index.php/red-vial-nacional/2-uncategorised/2706-clasificación-de-las-carreteras>

Invias (2022). Capítulo 3. Afirmados subbases y bases. Art 320-22.

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). Determinación de la succión de un suelo usando papel de filtro. Normas de ensayos de materiales para carreteras E-159.

INVIAS. (2013). Determinación del límite líquido de los suelos. Norma de ensayos de materiales para carreteras E-125.

Invias. (2013). INV E-128-13 determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y de la 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-220-13. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.

Invias (2013). INV E-211-13. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados.

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.

INVIAS. (2013). Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. Norma de ensayos de materiales para carreteras E-126.

López, J. (2019). Las vías terciarias en Colombia. Artículo de Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos.

Martínez, J. & Vargas, J. Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales identificados como MGM-1. (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, 2022.

Moreno, L. (2019). Mejoramiento de vías de bajos volúmenes de tránsito mediante el uso de losas de concreto simple optimizadas. [Tesis de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. Repositorio Institucional Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, p.16-19.

Pérez, F., Martínez, A., Miró, R., Hernández, D., & Araya, L. (2014). Effect of compaction temperature and procedure on the design of asphalt mixtures using Marshall and gyratory compactors. *Construction and Building Materials*, 65, p. 264-26

Sánchez, Fernando (2016), Módulo 7: materiales para base y subbase.

Yépez, V. (2013, 5 de septiembre) ¿Qué es la curva de compactación de un suelo?

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.

<https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/09/05/curva-compactacion-suelo/>

Apéndices

Apéndice A. Granulometría de diseño para cada MGMS correspondiente a este proyecto

MATERIAL	% FINOS	% IP	GRAVAS [g]	%Retenido					ARENAS [g]	%Retenido			FINOS [g]			%Retenido Pasa N°200 (Fondo)		
				1" 1/2"	1"	1/2"	3/8"	No. 4		No. 10	No. 40	No. 200	Cantera Paviandi	Triturado Paviandi	Bentonita			
MGM1	18	8	Paviandi	55,0%	0,0%	15,0%	17,0%	8,0%	15,0%	Paviandi	27,0%	12,5%	6,5%	8,0%	Cantera Paviandi	84,50%	1085	1284
					0,00	1070,10	1212,78	570,72	1070,10			891,75	463,71	570,72	Triturado Paviandi	15,50%	199	
MGM2	18	12	Paviandi	55,0%	0,0%	15,0%	17,0%	8,0%	15,0%	Paviandi	27,0%	12,5%	6,5%	8,0%	Cantera Paviandi	49,43%	640	1296
					0,00	1079,70	1223,66	575,84	1079,70			899,75	467,87	575,84	Caolinita	49,43%	640	
														Bentonita	1,14%	15		
MGM3	18	15	Paviandi	55,0%	0,0%	15,0%	17,0%	8,0%	15,0%	Paviandi	27,0%	12,5%	6,5%	8,0%	Cantera Paviandi	48,83%	614	1257
					0,00	1047,90	1187,62	558,88	1047,90			873,25	454,09	558,88	Caolinita	48,83%	614	
														Bentonita	2,34%	29		
MGM4	21	8	Paviandi	55,0%	0,0%	15,0%	17,0%	8,0%	15,0%	Paviandi	24,0%	12,5%	6,5%	5,0%	Cantera Paviandi	84,50%	1273	1506,33
					0,00	1075,95	1219,41	573,84	1075,95			896,63	466,25	358,65	Triturado Paviandi	15,50%	233	

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

Apéndice B. Análisis y resultados del módulo resiliente de las MGMS:

Apéndice B1. Resultado de módulo resiliente de la MGM 1 Fase A (secado máximo)

No. secuencia de carga	No. Ciclo	Carga axial de contacto, Pcontact (kN)	Carga axial máxima, Pmax (kN)	Carga axial resiliente, Pycyclic (kN)	Esfuerzo desviador de contacto (kPa)	Esfuerzo desviador máximo (kPa)	Esfuerzo desviador de contacto final (1 s) (kPa)	Esfuerzo Bulk (e) (kPa)	Módulo resiliente (MPa)	Deformación unitaria plástica del ciclo (0,1 s)	Deformación plástica acumulativa ciclo (0,1 s)	Deformación plástica acumulativa ciclo (0,1 s)
Acond. (ciclo 0)	0									0	0	0,00%
Acond. (ciclo 500)	500									4,9005E-05	4,9005E-05	0,00490%
1	600	0,0320	0,3577	0,3257	1,8322	20,2545	1,8186	82,35	26,25	0,00011990	0,000168905	0,01689%
2	700	0,0679	0,7251	0,6572	3,8647	41,0112	3,8557	103,11	44,14	0,00011269	0,000281592	0,02816%
3	800	0,1059	1,0915	0,9856	6,0114	61,6890	6,0048	123,79	61,93	0,00012214	0,000403731	0,04037%
4	900	0,0612	0,6034	0,5422	3,4873	34,1344	3,3811	137,63	79,68	0,00039428	0,00079801	0,07980%
5	1000	0,1250	1,1543	1,0293	7,0924	65,2269	6,7627	168,73	107,56	0,00070025	0,001498259	0,14983%
6	1100	0,1895	1,6999	1,5104	10,7364	95,9799	10,1785	199,48	128,70	0,00082687	0,002325124	0,23251%
7	1200	0,1370	1,0989	0,9620	7,7627	62,0800	6,7589	268,78	148,46	0,00038642	0,002691542	0,26915%
8	1300	0,2479	2,2005	1,9526	14,0319	124,1432	13,7024	330,84	181,70	0,00065622	0,003347761	0,33478%
9	1400	0,3842	3,3171	2,9329	21,7208	186,9062	20,5491	393,61	204,88	0,00086119	0,004208955	0,42090%
10	1500	0,1439	1,0947	0,9508	8,1520	61,8002	6,7670	372,00	189,21	0,00028756	0,004496517	0,44965%
11	1600	0,2578	1,6423	1,3845	14,5830	92,6537	10,1937	402,85	205,36	0,00055871	0,005055224	0,50552%
12	1700	0,4194	3,2959	2,8765	23,7018	185,6633	20,5665	495,86	235,07	0,00074876	0,00580398	0,58040%
13	1800	0,2501	1,6474	1,3974	14,1438	92,9144	10,1151	506,61	239,58	0,00042413	0,006228109	0,62281%
14	1900	0,2723	2,2009	1,9286	15,3989	124,0686	13,6844	537,77	244,30	0,00041070	0,006638806	0,66388%
15	2000	0,5150	4,3905	3,8756	29,0761	247,0573	27,3870	660,76	278,45	0,00063184	0,00727065	0,72706%
MR Promedio (Mpa)									158,4			

Apéndice B2. Resultado de módulo resiliente de la MGM 2 Fase A (secado máximo)

No. secuencia de carga	No. Ciclo	Carga axial de contacto, Pcontact (kN)	Carga axial máxima, Pmax (kN)	Carga axial resiliente, Pycyclic (kN)	Esfuerzo desviador de contacto (kPa)	Esfuerzo desviador máximo (kPa)	Esfuerzo desviador de contacto final (1 s) (kPa)	Esfuerzo Bulk (e) (kPa)	Módulo resiliente (MPa)	Deformación unitaria plástica del ciclo (0,1 s)	Deformación plástica acumulativa ciclo (0,1 s)	Deformación plástica acumulativa ciclo (0,1 s)
Acond. (ciclo 0)	0									0	0	0,00%
Acond. (ciclo 500)	500									9,20398E-06	9,20398E-06	0,092%
1	600	0,0404	0,3283	0,2879	2,2858	18,5374	2,0804	80,64	85,53	0,00005522	6,44279E-05	0,552%
2	700	0,0894	0,6556	0,5662	5,0524	36,9963	4,0972	99,10	93,15	0,00009726	0,000161692	0,973%
3	800	0,1192	0,9780	0,8587	6,7367	55,1631	6,1701	117,26	99,56	0,00013433	0,00029602	1,343%
4	900	0,0911	0,5218	0,4307	5,1489	29,4476	3,4597	132,95	105,99	0,00006194	0,00035796	0,619%
5	1000	0,1339	1,0544	0,9206	7,5642	59,4680	6,8574	162,97	115,96	0,00010348	0,000461443	1,035%
6	1100	0,2426	1,6003	1,3577	13,6985	90,1964	10,2628	193,70	133,21	0,00018930	0,000650746	1,893%
7	1200	0,2096	0,9837	0,7741	11,8295	55,4551	6,8714	262,16	171,18	0,00003905	0,000689801	0,391%
8	1300	0,2972	2,0615	1,7643	16,7675	116,0961	13,8051	262,16	171,18	0,00003905	0,000728856	0,391%
9	1400	0,4635	3,1625	2,6990	26,1310	177,9313	20,7205	384,63	202,50	0,00015871	0,000887567	1,587%
10	1500	0,1913	0,9559	0,7646	10,7881	53,8411	6,8666	364,04	210,67	0,00005896	0,000946517	0,590%
11	1600	0,2502	1,4884	1,2382	14,1060	83,7944	10,2674	393,99	218,58	0,00006468	0,001011194	0,647%
12	1700	0,4287	3,1378	2,7091	24,1551	176,4735	20,6823	486,67	238,94	0,00008209	0,001093284	0,821%
13	1800	0,2063	1,4895	1,2832	11,6254	83,8215	10,2693	497,52	252,24	0,00002886	0,001122139	0,289%
14	1900	0,2718	2,0511	1,7793	15,3152	115,3884	13,8030	529,09	260,64	0,00003607	0,001158209	0,361%
15	2000	0,5539	4,1986	3,6447	31,1926	235,9382	27,5281	649,64	288,99	0,00007562	0,001233383	0,756%
MR Promedio (Mpa)									176,6			

Apéndice B3. Resultado de módulo resiliente de la MGM 3 Fase A (secado máximo)

No. secuencia de carga	No. Ciclo	Carga axial de contacto, Pcontact (kN)	Carga axial máxima, Pmax (kN)	Carga axial resiliente, Pcyclic (kN)	Esfuerzo desviador de contacto (kPa)	Esfuerzo desviador máximo (kPa)	Esfuerzo desviador de contacto final (1 s) (kPa)	Esfuerzo Bulk (e) (kPa)	Módulo resiliente (MPa)	Deformación unitaria plástica del ciclo (0,1 s)	Deformación plástica acumulativa ciclo (0,1 s)
Acond. (ciclo 0)	0									0	0
Acond. (ciclo 500)	500									#N/D	#N/D
1	600	0,0403	0,3511	0,3108	2,2780	19,8642	2,0743	81,964	120,634	#N/D	#N/D
2	700	0,0912	0,6960	0,6048	5,1576	39,3598	4,0802	101,460	148,868	0,00008	0,0075%
3	800	0,1180	1,0298	0,9118	6,6737	58,2147	6,2054	120,315	187,765	0,00006	0,0137%
4	900	0,0767	0,5531	0,4764	4,3370	31,2805	3,5199	134,780	175,969	0,00005	0,0183%
5	1000	0,1464	1,0915	0,9451	8,2806	61,6930	6,8778	165,193	256,916	0,00011	0,0295%
6	1100	0,2384	1,6385	1,4001	13,4824	92,5567	10,3063	196,057	299,204	0,00010	0,0397%
7	1200	0,1430	1,0448	0,9018	8,0835	59,0342	6,9458	265,734	389,099	0,00020	0,0599%
8	1300	0,3376	2,1097	1,7721	19,0798	119,0818	13,8394	325,782	695,738	0,00021	0,0809%
9	1400	0,4077	3,2069	2,7992	23,0336	180,8341	20,7894	387,534	694,518	0,00024	0,1052%
10	1500	0,1366	1,0241	0,8876	7,7148	57,8193	7,4526	368,019	662,385	0,00002	0,1072%
11	1600	0,2729	1,5482	1,2753	15,4169	87,3716	11,0583	397,572	1040,085	0,00005	0,1122%
12	1700	0,4919	3,1587	2,6668	27,7748	178,0603	20,3329	488,260	1175,612	0,00018	0,1304%
13	1800	0,2233	1,5529	1,3296	12,6056	87,6028	9,7528	501,303	1830,164	0,00004	0,1346%
14	1900	0,2849	2,0688	1,7840	16,0852	116,6721	12,7015	530,372	2213,635	0,00005	0,1397%
15	2000	0,5578	4,2425	3,6848	31,4754	238,9338	#N/D	652,634	1119,894	0,00024	0,1635%
MR Promedio (MPa)									734,03232		

Apéndice B4. Resultado de módulo resiliente de la MGM 4-R Fase 1 (después de compactación)

No. secuencia de carga	No. Ciclo	Carga axial de contacto, Pcontact (kN)	Carga axial máxima, Pmax (kN)	Carga axial resiliente, Pcyclic (kN)	Esfuerzo desviador de contacto (kPa)	Esfuerzo desviador máximo (kPa)	Esfuerzo desviador de contacto final (1 s) (kPa)	Esfuerzo Bulk (e) (kPa)	Módulo resiliente (MPa)	Deformación unitaria plástica del ciclo (0,1 s)	Deformación plástica acumulativa ciclo (0,1 s)
Acond. (ciclo 0)	0									0	0
Acond. (ciclo 500)	500									0,01145	0,0114
1	600	0,0362	0,3635	0,3273	2,0293	20,3432	2,0428	82,44	34,03	-0,00087	0,0106
2	700	0,0708	0,7297	0,6590	3,9637	40,7817	3,9525	102,88	39,29	0,00081	0,0114
3	800	0,1078	1,0928	0,9850	6,0263	60,9658	5,9861	123,07	45,21	0,00125	0,0126
4	900	0,0614	0,6077	0,5462	3,4363	33,9309	3,4564	137,43	39,92	-0,00026	0,0124
5	1000	0,1195	1,2148	1,0953	6,6797	67,7286	6,7042	171,23	49,17	0,00078	0,0132
6	1100	0,1877	1,8093	1,6216	10,4468	100,4713	10,0012	203,97	66,87	0,00335	0,0165
7	1200	0,1380	1,1973	1,0594	7,6853	66,5462	6,7266	273,25	64,70	-0,00015	0,0163
8	1300	0,2515	2,3511	2,0996	13,9600	130,1480	13,4292	336,85	81,92	0,00296	0,0193
9	1400	0,3922	3,4809	3,0887	21,5630	190,7531	20,0422	397,45	99,30	0,00929	0,0286
10	1500	0,1291	1,1147	0,9856	7,1075	61,2469	6,7093	371,45	81,16	-0,00086	0,0277
11	1600	0,1965	1,6933	1,4968	10,8081	92,9546	9,9813	403,15	84,78	0,00027	0,0280
12	1700	0,3978	3,4253	3,0275	21,8377	187,4539	19,9445	497,65	108,21	0,00206	0,0301
13	1800	0,2483	1,6306	1,3823	13,6400	89,3976	9,9613	503,10	102,00	-0,00054	0,0295
14	1900	0,3303	2,2016	1,8712	18,1388	120,6155	13,3655	534,32	107,77	0,00022	0,0297
15	2000	0,5363	4,5145	3,9782	29,3587	246,3179	26,7127	660,02	131,05	0,00244	0,0322
MR Promedio (MPa)									75,7		

Apéndice B5. Resultado de módulo resiliente de la MGM 4-R Fase 2

No. secuencia de carga	No. Ciclo	Carga axial de contacto, Pcontact (kN)	Carga axial máxima, Pmax (kN)	Carga axial resiliente, Pcylic (kN)	Esfuerzo desviador de contacto (kPa)	Esfuerzo desviador máximo (kPa)	Esfuerzo desviador de contacto final (1 s) (kPa)	Esfuerzo Bulk (e) (kPa)	Módulo resiliente (MPa)	Deformación unitaria plástica del ciclo (0,1 s)	Deformación plástica acumulativa ciclo (0,1 s)
Acond. (ciclo 0)	0									0	0
Acond. (ciclo 500)	500									0,00507	0,0051
1	600	0,0324	0,3605	0,3281	1,8456	20,3482	1,8366	82,45	15,43	-0,00232	0,0027
2	700	0,0661	0,7245	0,6584	3,7502	40,8299	3,7547	102,93	22,39	0,00063	0,0034
3	800	0,1037	1,0892	0,9854	5,8714	61,3139	5,8624	123,41	31,34	0,00046	0,0038
4	900	0,0562	0,6028	0,5466	3,1877	33,9727	3,1877	137,47	20,50	-0,00041	0,0034
5	1000	0,1166	1,2099	1,0933	6,5942	68,0882	6,5920	171,59	35,71	0,00055	0,0040
6	1100	0,1786	1,8221	1,6436	10,0782	102,4032	10,0895	205,90	52,46	0,00070	0,0047
7	1200	0,1331	1,2117	1,0787	7,5123	68,1543	6,8445	274,85	78,66	0,00009	0,0048
8	1300	0,3098	2,3469	2,0371	17,4491	131,7462	13,6871	338,45	107,07	0,00104	0,0058
9	1400	0,3868	3,4709	3,0842	21,7373	194,3311	20,5248	401,03	121,60	0,00181	0,0076
10	1500	0,1514	1,1114	0,9600	8,5276	62,3852	6,8724	372,59	126,71	-0,00041	0,0072
11	1600	0,1976	1,6854	1,4878	11,1170	94,5276	10,2080	404,73	124,72	0,00013	0,0073
12	1700	0,4271	3,4003	2,9731	23,9926	190,3429	20,5248	500,54	147,53	0,00073	0,0081
13	1800	0,2313	1,6420	1,4107	13,0045	92,0692	10,1963	505,77	159,56	-0,00021	0,0079
14	1900	0,3114	2,1987	1,8873	17,5000	123,2125	13,6239	536,91	162,64	0,00010	0,0079
15	2000	0,5166	4,4704	3,9538	28,9869	249,9561	27,3622	663,66	185,99	0,00093	0,0089
MR Promedio (MPa)									92,8		

Apéndice B6. Resultado de módulo resiliente de la MGM 4 Fase 2

No. secuencia de carga	No. Ciclo	Carga axial de contacto, Pcontact (kN)	Carga axial máxima, Pmax (kN)	Carga axial resiliente, Pcylic (kN)	Esfuerzo desviador de contacto (kPa)	Esfuerzo desviador máximo (kPa)	Esfuerzo desviador de contacto final (1 s) (kPa)	Esfuerzo Bulk (e) (kPa)	Módulo resiliente (MPa)	Deformación unitaria plástica del ciclo (0,1 s)	Deformación plástica acumulativa ciclo (0,1 s)
Acond. (ciclo 0)	0									0	0
Acond. (ciclo 500)	500									0,00451	0,0045
1	600	0,0360	0,3641	0,3281	2,0580	20,5913	2,0557	82,69	26,78	-0,00326	0,0012
2	700	0,0699	0,7282	0,6583	3,9690	41,0874	3,9622	103,19	33,12	0,00126	0,0025
3	800	0,1079	1,0945	0,9866	6,1083	61,6324	6,0970	123,73	39,68	0,00142	0,0039
4	900	0,0601	0,6073	0,5472	3,4136	34,2407	3,4113	137,74	34,99	-0,00033	0,0036
5	1000	0,1202	1,2143	1,0940	6,7969	68,3335	6,7923	171,83	44,87	0,00083	0,0044
6	1100	0,1802	1,8239	1,6437	10,1419	102,2231	10,1418	205,72	54,93	0,00350	0,0079
7	1200	0,1297	1,2102	1,0806	7,3042	67,8875	6,8135	274,59	67,90	-0,00018	0,0077
8	1300	0,2552	2,3965	2,1412	14,3140	133,9275	13,6515	340,63	83,76	0,00281	0,0106
9	1400	0,3932	3,5306	3,1374	21,7913	194,9667	20,2951	401,67	100,97	0,01125	0,0218
10	1500	0,1306	1,1511	1,0205	7,2594	63,7371	6,7215	373,94	84,67	-0,00107	0,0207
11	1600	0,2293	1,7475	1,5182	12,7237	96,6793	10,0640	406,88	87,06	0,00035	0,0211
12	1700	0,4323	3,4750	3,0428	23,9170	191,6548	20,2579	501,85	112,44	0,00213	0,0232
13	1800	0,2121	1,6808	1,4687	11,7529	92,8666	10,0390	506,57	107,09	-0,00062	0,0226
14	1900	0,3017	2,2606	1,9589	16,7071	124,8235	13,4994	538,52	110,54	0,00022	0,0228
15	2000	0,5420	4,5746	4,0326	29,8856	251,3927	26,9477	665,09	137,39	0,00359	0,0264
MR Promedio (MPa)									75,1		

Apéndice B7. Resultado de módulo resiliente de la MGM 4 Fase 3 (más un punto porcentual de su humedad óptima)

No. secuencia de carga	No. Ciclo	Carga axial de contacto, Pcontact (kN)	Carga axial máxima, Pmax (kN)	Carga axial resiliente, Pcylic (kN)	Esfuerzo desviador de contacto (kPa)	Esfuerzo desviador máximo (kPa)	Esfuerzo desviador de contacto final (1 s) (kPa)	Esfuerzo Bulk (e) (kPa)	Módulo resiliente (MPa)	Deformación unitaria plástica del ciclo (0,1 s)	Deformación plástica acumulativa ciclo (0,1 s)
Acond. (ciclo 0)	0									0	0
Acond. (ciclo 500)	500									-0,00207	-0,0021
1	600	0,0463	0,2927	0,2464	2,6159	16,5288	1,9878	78,63	357,15	-0,00025	-0,0023
2	700	0,0957	0,5999	0,5042	5,4076	33,8603	4,0114	95,96	590,36	0,00005	-0,0023
3	800	0,1289	0,9205	0,7916	7,2791	51,9274	6,0998	114,03	614,02	0,00008	-0,0022
4	900	0,0807	0,4924	0,4117	4,5578	27,7920	3,4012	131,29	600,52	-0,00003	-0,0022
5	1000	0,2239	1,0249	0,8010	12,6438	57,8143	6,7926	161,31	924,31	0,00010	-0,0021
6	1100	0,2859	1,5709	1,2849	16,1400	88,5362	10,1785	192,04	795,39	0,00019	-0,0019
7	1200	0,2020	1,0014	0,7994	11,4045	56,4664	6,7831	263,17	1166,39	-0,00002	-0,0020
8	1300	0,2801	2,1116	1,8315	15,8024	118,9206	13,6452	325,62	686,39	0,00022	-0,0017
9	1400	0,3853	3,2175	2,8322	21,7092	180,9127	20,4883	387,61	539,90	0,00049	-0,0012
10	1500	0,2006	0,9788	0,7781	11,3094	55,1164	6,7420	365,32	1995,11	-0,00010	-0,0013
11	1600	0,2298	1,5291	1,2993	12,9495	86,0664	10,1743	396,27	1275,43	0,00003	-0,0013
12	1700	0,5039	3,1790	2,6750	28,3850	178,7125	20,5105	488,91	669,67	0,00022	-0,0011
13	1800	0,2515	1,5129	1,2614	14,1692	85,1304	10,1191	498,83	1765,17	-0,00007	-0,0011
14	1900	0,3478	2,0734	1,7256	19,5947	116,6257	13,6420	530,33	1162,15	0,00005	-0,0011
15	2000	0,5240	4,2246	3,7007	29,4906	237,2375	27,3433	650,94	636,02	0,00036	-0,0007
MR Promedio (MPa)									918,5		

Apéndice B8. Resultado de módulo resiliente de la MGM 1 Fase 3

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Módulo resiliente calculado (Uzan) (MPa)
1	20.7	20.3875	18.3381	0.0009	21.4	82.5	22.2
2	20.7	41.0605	36.9793	0.0011	33.5	103.2	31.3
3	20.7	59.2595	53.0336	0.0012	44.1	121.4	39.3
4	34.5	34.2739	30.7295	0.0010	30.7	137.8	40.5
5	34.5	66.8216	59.7963	0.0012	51.6	170.3	56.2
6	34.5	100.9575	86.5846	0.0010	86.3	204.5	72.0
7	68.9	65.6436	56.2926	0.0007	81.1	272.3	88.8
8	68.9	127.5197	100.7115	0.0008	122.6	334.2	120.6
9	68.9	188.3799	150.2039	0.0010	148.7	395.1	152.8
10	103.4	57.9412	45.1596	0.0003	137.7	368.1	115.3
11	103.4	89.3079	74.3114	0.0005	159.1	399.5	136.6
12	103.4	181.0529	151.8844	0.0008	190.0	491.3	190.3
13	137.9	88.2271	75.4511	0.0004	178.3	501.9	171.9
14	137.9	116.3998	104.0195	0.0006	179.7	530.1	192.0
15	137.9	234.0033	188.7947	0.0009	220.8	647.7	260.4

Apéndice B9. Resultado de módulo resiliente de la MGM 2 en Fase 3

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Módulo resiliente calculado (Uzan) (MPa)
1	20.7	18.5920	15.8020	0.0002	91.8	80.7	82.9
2	20.7	37.4402	32.5880	0.0003	96.0	99.5	90.7
3	20.7	56.3523	49.4479	0.0005	100.6	118.5	98.5
4	34.5	30.8128	26.9231	0.0003	97.7	134.3	109.1
5	34.5	61.9799	55.5069	0.0005	104.5	165.5	119.2
6	34.5	93.8566	66.5733	0.0005	133.0	197.4	131.1
7	68.9	60.2273	44.3669	0.0003	141.9	266.9	159.5
8	68.9	121.8883	95.1445	0.0006	158.7	328.6	174.0
9	68.9	181.8141	141.9991	0.0007	213.4	388.5	188.5
10	103.4	58.4783	46.8367	0.0002	207.4	368.7	192.3
11	103.4	88.5084	71.7788	0.0003	210.2	398.7	197.5
12	103.4	177.3197	142.7314	0.0006	222.5	487.5	215.3
13	137.9	86.2456	70.9947	0.0003	228.4	499.9	225.7
14	137.9	116.4571	97.8324	0.0004	226.1	530.2	230.1
15	137.9	232.5907	183.3823	0.0008	242.8	646.3	251.2

Apéndice B10. Resultado de módulo resiliente de la MGM 3 en Fase 3.

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo de Confinamiento (kPa)	Módulo resiliente calculado (Uzan) (MPa)
1	20.7	20.0600	17.9905	0.0004	47.9	82.2	42.0
2	20.7	40.3680	36.2682	0.0007	52.0	102.5	51.1
3	20.7	59.2299	52.9874	0.0009	56.7	121.3	58.6
4	34.5	33.4932	29.9686	0.0006	51.9	137.0	60.1
5	34.5	65.1184	53.2212	0.0007	77.7	168.6	71.8
6	34.5	96.0632	79.0762	0.0009	89.2	199.6	82.4
7	68.9	62.6830	53.4106	0.0006	86.9	269.4	95.7
8	68.9	126.9442	109.1810	0.0010	104.4	333.6	116.2
9	68.9	192.5618	168.4755	0.0014	120.7	399.3	134.7
10	103.4	59.2410	56.3347	0.0005	108.3	369.4	116.8
11	103.4	90.8276	64.0121	0.0005	132.1	401.0	124.2
12	103.4	187.0360	139.5332	0.0009	155.4	497.2	151.6
13	137.9	87.9365	65.1389	0.0005	143.7	501.6	142.7
14	137.9	118.9517	88.2355	0.0006	151.8	532.7	152.0
15	137.9	232.3916	172.1742	0.0008	215.7	646.1	181.3

Apéndice B11. Resultado de módulo resiliente de SBG-C1 en Fase 3

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Módulo resiliente calculado (Uzan) (MPa)
1	20.7	18.2852	12.9272	0.0001	111.0	80.4	105.4
2	20.7	36.8088	27.4693	0.0002	116.4	98.9	111.6
3	20.7	55.3488	42.6082	0.0003	122.3	117.4	118.6
4	34.5	30.1490	22.0722	0.0002	119.1	133.6	132.8
5	34.5	60.6742	47.3035	0.0003	158.9	164.2	140.6
6	34.5	92.0597	76.1002	0.0006	138.2	195.6	149.2
7	68.9	57.9906	48.0471	0.0003	163.2	264.7	180.7
8	68.9	119.3050	102.0426	0.0005	195.6	326.0	191.6
9	68.9	176.6345	144.5894	0.0007	207.6	383.3	203.7
10	103.4	56.7478	49.4778	0.0003	191.8	366.9	214.2
11	103.4	87.1185	78.7122	0.0004	199.6	397.3	216.4
12	103.4	172.2856	145.3847	0.0007	217.7	482.5	230.0
13	137.9	86.2541	52.4855	0.0002	272.9	500.0	251.2
14	137.9	115.5395	72.3278	0.0003	281.9	529.2	253.2
15	137.9	232.9993	144.4870	0.0005	284.5	646.7	268.5

Apéndice C. Tablas de resultados de módulo resiliente fase 1 (después de compactar) de MGM 1, 2, 3,4-R y de control SBG-C1-1**Apéndice C1. Módulo resiliente MGM 1 FASE 1**

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Módulo resiliente calculado (Uzan) (MPa)
1	20.7	8.2797	17.8771	0.0009	20.8	70.4	21.1
2	20.7	28.9457	36.5658	0.0013	27.6	91.0	25.4
3	20.7	49.3900	54.9462	0.0016	33.9	111.5	29.5
4	34.5	22.2409	30.4334	0.0011	27.9	125.7	32.6
5	34.5	55.5896	60.3719	0.0017	36.5	159.1	38.7
6	34.5	86.9675	88.5073	0.0019	45.9	190.5	44.1
7	68.9	54.6714	59.2780	0.0012	51.2	261.4	56.6
8	68.9	122.1439	120.0889	0.0020	60.2	328.8	66.8
9	68.9	186.9805	177.8222	0.0025	70.3	393.7	76.2
10	103.4	54.1054	53.5250	0.0007	80.2	364.3	73.1
11	103.4	86.4988	82.3435	0.0010	80.8	396.7	77.5
12	103.4	182.9693	169.0511	0.0018	95.2	493.2	90.6
13	137.9	83.6877	83.6181	0.0009	96.7	497.4	92.2
14	137.9	116.1805	112.9248	0.0012	98.1	529.9	96.4
15	137.9	238.7261	222.0235	0.0020	111.4	652.4	111.8

Apéndice C2. Módulo resiliente MGM 2 FASE 1

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Módulo resiliente calculado (Uzan) (MPa)
1	20.7	19.9654	17.9417	0.0010	18.6	82.1	18.1
2	20.7	40.6077	36.6499	0.0014	25.5	102.7	24.2
3	20.7	60.9817	54.8209	0.0016	34.3	123.1	29.9
4	34.5	33.5775	29.9823	0.0012	24.8	137.1	29.5
5	34.5	67.5685	60.5900	0.0016	38.1	171.1	39.4
6	34.5	99.9451	89.6572	0.0018	49.3	203.4	48.1
7	68.9	66.7564	59.6884	0.0012	51.4	273.5	56.8
8	68.9	129.5104	115.7828	0.0017	67.5	336.2	74.5
9	68.9	194.8274	174.1641	0.0021	84.1	401.5	91.7
10	103.4	63.4473	50.9084	0.0006	81.5	373.6	70.8
11	103.4	94.3116	76.9597	0.0009	85.4	404.5	80.7
12	103.4	193.0693	168.2005	0.0015	109.4	503.3	108.9
13	137.9	92.4640	80.7934	0.0008	95.8	506.2	97.0
14	137.9	124.1446	107.6777	0.0011	101.6	537.8	106.7
15	137.9	250.8019	222.1110	0.0014	157.9	664.5	141.9

Apéndice C3. Módulo resiliente MGM 3 FASE 1

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Módulo resiliente calculado (Uzan) (MPa)
1	20.7	5.5512	14.1410	0.0001	172.2	67.7	153.9
2	20.7	22.2352	27.4069	0.0002	161.8	84.3	154.5
3	20.7	40.0840	42.5021	0.0003	156.2	102.2	156.6
4	34.5	16.4508	22.6519	0.0001	164.6	120.0	170.3
5	34.5	45.2465	46.8867	0.0003	156.1	148.7	169.9
6	34.5	72.9819	67.3698	0.0004	166.3	176.5	172.3
7	68.9	45.1086	47.4076	0.0003	175.3	251.8	192.3
8	68.9	103.4025	93.6468	0.0005	183.4	310.1	192.2
9	68.9	164.3252	144.4616	0.0007	197.4	371.0	194.3
10	103.4	44.7483	49.4407	0.0002	209.1	354.9	207.9
11	103.4	73.4980	74.5066	0.0004	195.6	383.7	205.5
12	103.4	163.4030	145.8538	0.0007	209.3	473.6	205.7
13	137.9	73.7029	78.2751	0.0004	222.8	487.4	216.7
14	137.9	102.9223	99.0436	0.0004	223.6	516.6	216.0
15	137.9	220.0884	196.1962	0.0008	235.3	633.8	215.7

Apéndice C4. Módulo resiliente SBG-C1 FASE 1

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Módulo resiliente calculado (Uzan) (MPa)
1	20.7	20.3224	18.3199	0.0005	37.8	82.4	36.2
2	20.7	40.7771	36.7406	0.0009	42.9	102.9	52.5
3	20.7	61.2593	55.1748	0.0011	49.6	123.4	65.7
4	34.5	33.9829	30.5990	0.0007	43.0	137.5	50.1
5	34.5	67.7214	60.9785	0.0011	55.4	171.2	72.4
6	34.5	99.1076	87.7785	0.0011	77.2	202.6	88.5
7	68.9	63.4395	57.4153	0.0007	80.7	270.1	75.2
8	68.9	127.8819	112.4000	0.0012	97.4	334.6	107.5
9	68.9	192.2340	166.5429	0.0013	125.0	398.9	133.5
10	0.0	60.2928	52.0597	0.0005	102.9	60.3	57.4
11	103.4	91.4954	81.1309	0.0008	103.2	401.7	94.3
12	103.4	188.0494	164.0042	0.0012	131.6	498.2	137.0
13	137.9	88.7250	75.6573	0.0006	129.3	502.4	94.2
14	137.9	120.3465	102.9813	0.0008	133.9	534.0	110.4
15	137.9	246.5700	216.3601	0.0014	155.0	660.3	163.4

Apéndice D. Tablas de resultados de módulo resiliente fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima (fase 2) de MGM 1, 2, 3,4-R y de control SBG-C1

Apéndice D1. Módulo resiliente de MGM 1 fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima.

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Módulo resiliente calculado (Uzan) (MPa)
1	20.7	20.4306	18.4899	0.0005	36.9	82.5	43.2
2	20.7	40.7277	36.74	Eje Vertical (Valor) Titulo	50.4	102.8	51.6
3	20.7	60.3825	54.2806	0.0009	57.2	122.5	59.9
4	34.5	33.1261	29.5890	0.0005	61.8	136.6	68.2
5	34.5	63.9947	52.1324	0.0006	93.2	167.5	80.6
6	34.5	96.3396	85.6204	0.0009	97.2	199.8	93.2
7	68.9	58.6017	47.4855	0.0003	165.5	265.3	124.9
8	68.9	119.9077	97.6293	0.0006	166.7	326.6	147.3
9	68.9	177.6166	142.5333	0.0008	181.8	384.3	169.0
10	103.4	54.4623	47.5772	0.0003	180.2	364.7	168.7
11	103.4	83.9034	68.5402	0.0004	183.7	394.1	178.7
12	103.4	173.5547	143.0576	0.0007	195.0	483.8	210.0
13	137.9	85.4915	72.8911	0.0004	203.9	499.2	222.7
14	137.9	114.2006	98.8887	0.0005	205.8	527.9	231.7
15	137.9	235.8200	190.4915	0.0008	235.8	649.5	273.9

Apéndice D2. Módulo resiliente MGM 2 fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima.

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Módulo resiliente calculado (Uzan) (MPa)
1	20.7	20.4301	18.2775	0.0005	38.2	82.5	41.7
2	20.7	40.7792	36.5455	0.0007	53.0	102.9	51.0
3	20.7	59.0340	52.7621	0.0009	60.5	121.1	59.4
4	34.5	32.0312	28.4255	0.0004	63.9	135.5	67.6
5	34.5	62.3366	55.2323	0.0007	75.0	165.8	81.3
6	34.5	93.9505	82.2532	0.0008	100.2	197.5	95.7
7	68.9	60.3129	46.5818	0.0003	139.8	267.0	131.4
8	68.9	122.1295	97.4803	0.0006	157.9	328.8	158.6
9	68.9	184.0726	144.9919	0.0007	222.9	390.8	186.5
10	103.4	59.7591	49.9202	0.0002	203.7	370.0	181.8
11	103.4	90.6696	75.3483	0.0004	211.0	400.9	194.7
12	103.4	180.0212	145.8420	0.0006	233.3	490.2	233.9
13	137.9	90.1644	76.0227	0.0003	241.7	503.9	244.7
14	137.9	121.0766	104.1632	0.0004	242.2	534.8	257.5
15	137.9	227.8982	174.9394	0.0007	242.1	641.6	304.6

Apéndice D3. Módulo resiliente MGM 3 en fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Módulo resiliente calculado (Uzan) (MPa)
1	20.7	5.1461	13.8201	0.0001	145.6	67.2	141.3
2	20.7	23.0095	27.5156	0.0002	147.8	85.1	137.1
3	20.7	41.4918	42.4995	0.0003	146.1	146.1	136.9
4	34.5	16.6684	23.1300	0.0001	155.0	120.2	159.6
5	34.5	45.6263	45.4249	0.0003	149.2	149.1	154.2
6	34.5	75.1280	68.4874	0.0004	152.7	178.6	153.6
7	68.9	44.0997	47.3235	0.0003	163.9	250.8	184.3
8	68.9	99.7817	90.1447	0.0005	166.0	306.5	178.0
9	68.9	162.0462	141.4867	0.0008	169.3	368.7	176.5
10	103.4	44.5611	49.2475	0.0003	195.1	354.8	207.2
11	103.4	72.8277	72.5282	0.0004	186.6	383.0	199.8
12	103.4	159.9821	143.5273	0.0008	187.7	470.2	192.0
13	137.9	72.1508	48.7013	0.0002	240.6	485.9	232.2
14	137.9	100.3298	67.9530	0.0003	242.1	514.0	224.3
15	137.9	217.8637	142.5114	0.0006	252.2	631.6	213.5

Apéndice D4. Módulo resiliente SBG-C1 en fase de secado al menos dos por ciento de la humedad óptima

No. secuencia de carga	Presión de cámara (kPa)	Presión axial máxima (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Deformación unitaria	Módulo resiliente (MPa)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Módulo resiliente calculado (Uzan) (MPa)
1	20.7	18.9368	16.3554	0.0002	77.8	81.0	81.1
2	20.7	38.0302	33.6470	0.0004	85.8	100.1	88.5
3	20.7	56.7212	41.0942	0.0004	111.2	118.8	98.9
4	34.5	30.5682	21.1398	0.0002	105.6	134.1	116.2
5	34.5	61.3272	46.8330	0.0004	122.2	164.8	125.3
6	34.5	92.6748	70.9746	0.0005	137.7	196.2	137.2
7	68.9	57.9573	50.4156	0.0003	170.9	264.7	178.9
8	68.9	118.6515	98.3065	0.0005	210.9	325.4	195.4
9	68.9	179.1922	143.8860	0.0007	216.7	385.9	214.1
10	103.4	56.1863	31.6993	0.0001	245.4	366.4	240.9
11	103.4	86.4854	47.2126	0.0002	285.3	396.7	245.6
12	103.4	172.6181	109.3901	0.0004	285.1	482.8	261.6
13	137.9	85.9844	46.5069	0.0002	299.5	499.7	293.7
14	137.9	115.9415	67.7116	0.0002	304.0	529.6	295.3
15	137.9	207.5576	121.7314	0.0005	239.0	621.3	313.9

Apéndice E. Tablas de resultados de ensayos de calidad de SBG-C0

Apéndice E1. Ensayo de equivalente de Arenas de material SBG-C0

EQUIVALENTE DE ARENA SANCHEZ CONSTRUCCIONES					
Numero de Ensayo	Lectura de arcilla (in) [B]	Lectura de arena (in) [A]	EA[(A/B)X100] (%)	d2s(%)	
1	3.4	2.6	76.5	7.8	
2	3.3	2.6	78.8		
3	3.3	2.5	75.8		
4	3.5	2.8	80		
5	3.6	2.6	72.2		
6	3.4	2.6	76.5		
Promedio =			76.6		
Valor mínimo especificado de Equivalente de Arena (>=25%)			Cumplimiento:		CUMPLE!

Apéndice E2. Ensayo de degradación por abrasión en equipo Micro-Deval de SBG-C0

Degradacion por abrasion en el Equipo Micro - Deval			
AGREGADO GRUESO			
Numero de ensayo	A(g)	B(g)	PERDIDA (%) $[(A-B/A)*100]$
1	1500	1397.3	6.85
2	1500	1400	6.67
		Promedio=	6.76
Cumplimiento:			CUMPLE!
AGREGADO FINO			
1	500	432.8	13.44
2	500	435	13.00
		Promedio=	13.22
Cumplimiento:			CUMPLE!

Apéndice E3. Ensayo de solidos por sulfatos en material SBG-C0

Solidéz de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio (sal Anhidra) para material de sanchez Construcciones								
Numero de ensayo	Tamaño de agregado	Peso antes del ensayo (g) [A]	Peso después del ensayo (g) [B]	Porcentaje de pérdida (%) $[(A-B)/A] \times 100$	Gradación de la muestra original (%) retenido	Promedio de pérdida Ponderado (%)	Especificación máximo 12%	
1	3/4"	1504.3	1354.3	9.97	15.00	1.5	5.7	CUMPLE
	3/8"	1000	920	8.00	25.00	2.0		
	No. 4	300	265	11.67	15.00	1.8		
	No. 8	100	90	10.00	12.50	1.3		
	No. 16	100	89	11.00	3.25	0.4		
	No. 30	100	91	9.00	3.25	0.3		
	No. 50	100	92	8.00	8.00	0.6		
2	3/4"	1493.2	1330	10.93	15.00	1.6	Promedio de pérdida final de Finos (%)	CUMPLE
	3/8"	1000	888	10.20	25.00	2.6		
	No. 4	300	269	10.33	15.00	1.6		
	No. 8	100	89	11.00	12.50	1.4		
	No. 16	100	91	9.00	3.25	0.3		
	No. 30	100	91	9.00	3.25	0.3		
	No. 50	100	93	7.00	8.00	0.6		
3	3/4"	1500	1325	11.67	15.00	1.8	4.3	CUMPLE
	3/8"	1000	899	10.10	25.00	2.5		
	No. 4	300	265	11.67	15.00	1.8		
	No. 8	100	90	10.00	12.50	1.3		
	No. 16	100	90	10.00	3.25	0.3		
	No. 30	100	91	9.00	3.25	0.3		
	No. 50	100	87	13.00	8.00	1.0		

Apéndice E4. Ensayo de contenido de terrones de arcillas y partículas deleznales de material SBG-C0

CONTENIDO DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTICULAS DELEZNABLES (MAXIMO EN %)					
TAMIZ		Peso inicial (g) (M)	Peso final (g) (R)	P(%) $[(M-R)/M] \times 100$	%Pérdida promedio ponderado
AGREGADO GRUESO					
PASA	RETENIDO				2.00
1"	3/4"	3002	2954	1.6	
3/4"	3/8"	2000	1970.1	1.5	
3/8"	No.4	1000	971	2.9	
CUMPLIMIENTO				GRAVAS ($\leq 2\%$)	CUMPLE!
AGREGADO FINO					
Retenido en	No.16	30	27.7	7.7	7.7
CUMPLIMIENTO				Arenas ($\leq 1\%$)	NO CUMPLE!

Apéndice F. Tablas de resultados de gravedad específica de SBG-C0

Apéndice F1. Gravedad específica aparente de gravas

Numero de Ensayo	A(g)	B(g)	C(SH)	Gs(SH)	Gs(SSS)	Gs(APA)	d2s(SH)	d2s(SSS)	d2s(APA)
1	3965.6	4000	2489.00	2.624	2.647	2.686	0.027	0.020	0.014
2	3965.2	4000	2495.100	2.635	2.658	2.697			
3	3960.9	4000	2484.500	2.614	2.639	2.683			
4	3971.9	4000	2496.100	2.641	2.660	2.691			
			Promedio=	2.629	2.651	2.689			

Apéndice F2. Gravedad específica aparente de Arenas

GRAVEDAD ESPECIFICA DE ARENAS DE SANCHEZ CONSTRUCCIONES (SBG-C0)										
Numero de Ensayo	A(g)	B(g)	S(g)	C(g)	Gs(SH)	Gs(SSS)	GS(APA)	d2s(SH)	d2s(SSS)	d2s(APA)
1	94.9	658	100	717	2.315	2.439	2.643	0.014	0.018	0.026
2	95	658.2	100	717	2.306	2.427	2.624			
3	95	658.3	100	717	2.300	2.421	2.617			
4	94.9	658.2	100	717.1	2.309	2.433	2.636			
				Promedio =	2.307	2.430	2.630			

Apéndice F3. Gravedad específica aparente de finos

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

Apéndice F4. Gravedad específica aparente ponderada

Probeta	Proporción Gravas		Proporción Arenas		Proporción Finos					Gs
	Cantera Sanchez	Cantera Paviandi	Cantera Sanchez	Cantera Paviandi	Cantera Sanchez	Cantera Paviandi	Triturado Paviandi	Caolinita	Bentonita	
MGM-1	0.00%	55.00%	0.00%	27.00%	0.00%	15.21%	2.79%	0.00%	0.00%	2.626
MGM-2	0.00%	55.00%	0.00%	27.00%	0.00%	8.90%	0.00%	8.90%	0.21%	2.625
MGM-3	0.00%	55.00%	0.00%	27.00%	0.00%	8.79%	0.00%	8.79%	0.42%	2.624
MGM-4	0.00%	55.00%	0.00%	24.00%	0.00%	17.75%	3.26%	0.00%	0.00%	2.628
MGM-5	0.00%	55.00%	0.00%	24.00%	0.00%	10.38%	0.00%	10.38%	0.24%	2.626
MGM-6	0.00%	55.00%	0.00%	24.00%	0.00%	10.25%	0.00%	10.25%	0.49%	2.626
MGM-7	0.00%	55.00%	0.00%	21.00%	0.00%	20.28%	3.72%	0.00%	0.00%	2.63
MGM-8	0.00%	55.00%	0.00%	21.00%	0.00%	11.86%	0.00%	11.86%	0.27%	2.628
MGM-9	0.00%	55.00%	0.00%	21.00%	0.00%	11.72%	0.00%	11.72%	0.56%	2.627
MGM-10	0.00%	55.00%	0.00%	26.00%	0.00%	19.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.628
SBG-C0	55.00%	0.00%	36.50%	0.00%	8.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.668
SBG-C1	0.00%	55.00%	0.00%	36.50%	0.00%	3.20%	4.80%	0.00%	0.00%	2.62

Apéndice F5 Gravedad específica general de gravas, arenas y finos

Gravedad específica de los materiales para probetas					
Tamaño partícula	Cantera Sanchez	Cantera Paviandi	Triturado Paviandi	Caolinita	Bentonita
Gravas	2.689	2.61	No reporta	No reporta	No reporta
Arenas	2.63	2.624	No reporta	No reporta	No reporta
Finos	2.702	2.685	2.656	2.665	2.492

Apéndice G. Tablas de control de fase de secado máximo (fase a) de MGM 1, 2 Y 3

Apéndice G1 tabla de control de fase de secado máximo de MGM 1

Medición	MGM		1	V	3404.70	[cm ³]	Ms	6934.28	[gr]	Gs	2.65	-	pW	0.99762	[gr/cm ³]	ΔSr [%]
	Día	Hora	tiempo [hr]	HR [%]	T [°C]	(M+Mv) [gr]	Mv [gr]	M [gr]	Mw [gr]	w [%]	Aw [%]	Vwo [cm ³]	Vs [cm ³]	Va [cm ³]	Sr [%]	
1	31/10/2022	11:01	0	71	23.3	7527	50	7477	542.72	7.83	-	544.01476	2623.0	237.73	69.59	-
2	31/10/2022	15:12	4.18333333	83	22.7	7518	50	7468	533.72	7.70	0.13	532.44975	2623.0	249.30	68.11	1.48
3	31/10/2022	16:18	5.28333333	83	22.6	7517	50	7467	532.72	7.68	0.01	531.45213	2623.0	250.30	67.98	0.13
4	2/11/2022	9:58	46.95	81	22.6	7421	50	7371	436.72	6.30	1.38	435.68061	2623.0	346.07	55.73	12.25
5	2/11/2022	14:15	51.23333333	87	22.7	7414	50	7364	429.72	6.20	0.10	428.69727	2623.0	353.05	54.84	0.89
6	2/11/2022	16:34	53.55	90	23	7412	50	7362	427.72	6.17	0.03	426.70203	2623.0	355.05	54.58	0.26
7	3/11/2022	11:18	72.28333333	88	23	8224	885	7339	404.72	5.84	0.33	403.75677	2623.0	377.99	51.65	2.94
8	3/11/2022	14:36	75.58333333	99	23	8220	885	7335	400.72	5.78	0.06	399.76629	2623.0	381.98	51.14	0.51
9	3/11/2022	16:16	77.25	99	23	8218	885	7333	398.72	5.75	0.03	397.77105	2623.0	383.98	50.88	0.26
10	4/11/2022	9:12	94.18333333	91	22.7	8197	885	7312	377.72	5.45	0.30	376.82103	2623.0	404.93	48.20	2.68
11	4/11/2022	14:14	99.21666667	99	22.4	8191	885	7306	371.72	5.36	0.09	370.83531	2623.0	410.91	47.44	0.77
12	4/11/2022	16:46	101.75	94	22.7	8188	885	7303	368.72	5.32	0.04	367.84245	2623.0	413.91	47.05	0.38
13	8/11/2022	8:25	189.4	87	22	8071	885	7186	251.72	3.63	1.69	251.12091	2623.0	530.63	32.12	14.93
14	8/11/2022	16:17	197.266667	90	22.6	8062	885	7177	242.72	3.50	0.13	242.14233	2623.0	539.61	30.97	1.15
15	9/11/2022	9:05	214.066667	79	22.1	8043	885	7158	223.72	3.23	0.27	223.18755	2623.0	558.56	28.55	2.42
16	9/11/2022	11:29	216.466667	85	22.5	8040	885	7155	220.72	3.18	0.04	220.19469	2623.0	561.55	28.17	0.38
17	9/11/2022	16:08	221.116667	87	22.7	8036	885	7151	216.72	3.13	0.06	216.20421	2623.0	565.54	27.66	0.51
18	10/11/2022	14:25	243.4	90	22.5	8017	885	7132	197.72	2.85	0.27	197.24943	2623.0	584.50	25.23	2.42
19	10/11/2022	16:19	245.3	88	22.7	8017	885	7132	197.72	2.85	0.00	197.24943	2623.0	584.50	25.23	0.00
20	11/11/2022	14:25	267.233333	89	22.4	8000	885	7115	180.72	2.61	0.25	180.28989	2623.0	601.46	23.06	2.17
21	11/11/2022	16:29	269.3	89	22.3	8000	885	7115	180.72	2.61	0.00	180.28989	2623.0	601.46	23.06	0.00
22	15/11/2022	11:00	359.816667	93	22.2	7962	885	7077	142.72	2.06	0.55	142.38033	2623.0	639.37	18.21	4.85
23	15/11/2022	16:21	365.166667	94	22.5	7961	885	7076	141.72	2.04	0.01	141.38271	2623.0	640.37	18.09	0.13
24	16/11/2022	15:05	387.9	95	22.5	7953	885	7068	133.72	1.93	0.12	133.40175	2623.0	648.35	17.06	1.02
25	18/11/2022	11:53	432.7	90	22.3	7942	885	7057	122.72	1.77	0.16	122.42793	2623.0	659.32	15.66	1.40
26	18/11/2022	16:03	436.866667	92	22.2	7941	885	7056	121.72	1.76	0.01	121.43031	2623.0	660.32	15.53	0.13
27	22/11/2022	10:53	527.7	90	22.6	7923	885	7038	103.72	1.50	0.26	103.47315	2623.0	678.28	13.24	2.30
28	28/11/2022	9:10	670.191667	87	22.1	7899	885	7014	79.72	1.15	0.35	79.530266	2623.0	702.22	10.17	3.06
29	29/11/2022	14:17	699.308333	87	22.6	7896	885	7011	76.72	1.11	0.04	76.537406	2623.0	705.21	9.79	0.38
30	30/11/2022	16:31	725.541667	86	22.6	7894	885	7009	74.72	1.08	0.03	74.542166	2623.0	707.21	9.54	0.26
31	1/12/2022	10:10	743.191667	75	22.3	7891	885	7006	71.72	1.03	0.04	71.549306	2623.0	710.20	9.15	0.38
32	6/12/2022	11:11	864.208333	75	22.3	7891	885	7006	71.72	1.03	0.00	71.549306	2623.0	710.20	9.15	0.00

Apéndice G 2. Tabla de control de fase de secado máximo de MGM 2

MGM		2		V	3404.76	[cm ²]	Ms	7005.04	[gr]	Gs	2.65	-	pW	0.99737	[gr/cm ³]	
Medición	Día	Hora	tiempo [hr]	HR [%]	T [°C]	M+Mv [gr]	M [gr]	M [gr]	Mw [gr]	w [%]	Δw [%]	Vwo [cm ³]	Vs [cm ³]	Va [cm ³]	Sr [%]	ΔSr [%]
1	18/11/2022	16:17	0	94	22.5	8429	863	7566	560.96	8.01	-	562.4392	2650.4	191.94	74.56	
2	18/11/2022	11:22	19.08333333	91	22.2	8387	863	7524	518.96	7.41	0.60	517.5951	2650.4	236.78	63.61	5.94
3	18/11/2022	14:14	21.95	93	22.3	8382	863	7519	513.96	7.34	0.07	512.8093	2650.4	241.77	67.35	0.66
4	17/11/2022	7:50	37.55	83	22.1	8348	863	7486	479.96	6.95	0.49	478.6977	2650.4	276.68	63.46	4.50
5	17/11/2022	14:16	43.98333333	94	22.5	8336	863	7473	467.96	6.68	0.17	466.7293	2650.4	287.65	61.87	1.59
6	17/11/2022	16:22	46.08333333	94	22.5	8334	863	7471	465.96	6.65	0.03	464.7345	2650.4	289.64	61.60	0.26
7	18/11/2022	8:13	61.93333333	88	22.1	8303	863	7440	434.96	6.21	0.44	433.8161	2650.4	320.56	57.51	4.10
8	18/11/2022	9:31	63.23333333	88	22.5	8300	863	7437	431.96	6.17	0.04	430.8239	2650.4	323.55	57.11	0.40
9	18/11/2022	14:05	67.8	90	22.2	8292	863	7429	423.96	6.05	0.11	422.845	2650.4	331.53	56.05	1.06
10	18/11/2022	16:11	69.9	92	22.3	8288	863	7425	419.96	6.00	0.06	418.8555	2650.4	336.52	55.52	0.53
11	21/11/2022	9:08	135.216667	93	22.1	8171	863	7308	302.96	4.32	1.67	302.1632	2650.4	452.21	40.05	15.47
12	21/11/2022	10:25	136.5	91	22.5	8169	863	7306	300.96	4.30	0.03	300.1685	2650.4	454.21	39.79	0.26
13	21/11/2022	11:39	137.733333	92	22.5	8167	863	7304	298.96	4.27	0.03	298.1737	2650.4	456.20	39.53	0.26
14	21/11/2022	14:14	140.316667	95	22.6	8164	863	7301	295.96	4.22	0.04	295.1816	2650.4	459.20	39.13	0.40
15	21/11/2022	16:15	142.333333	94	22.7	8161	863	7298	292.96	4.18	0.04	292.1895	2650.4	462.19	38.73	0.40
16	22/11/2022	8:43	158.8	90	22.4	8134	863	7271	265.96	3.80	0.39	265.2605	2650.4	489.12	35.16	3.57
17	22/11/2022	9:47	159.866667	90	22.5	8132	863	7269	263.96	3.77	0.03	263.2658	2650.4	491.11	34.90	0.26
18	22/11/2022	14:16	164.35	91	22.7	8125	863	7262	256.96	3.67	0.10	256.2842	2650.4	498.09	33.97	0.93
19	23/11/2022	8:25	182.5	74	22.2	8089	863	7226	220.96	3.15	0.51	220.3789	2650.4	534.00	29.21	4.76
20	23/11/2022	9:30	183.583333	78	22.9	8087	863	7224	218.96	3.13	0.03	218.3841	2650.4	535.99	28.95	0.26
21	23/11/2022	11:21	185.433333	83	22.5	8084	863	7221	215.96	3.08	0.04	215.392	2650.4	538.99	28.55	0.40
22	23/11/2022	14:28	188.55	86	22.6	8080	863	7217	211.96	3.03	0.06	211.4025	2650.4	542.98	28.02	0.53
23	23/11/2022	15:00	189.083333	86	22.6	8079	863	7216	210.96	3.01	0.01	210.4052	2650.4	543.97	27.89	0.13
24	24/11/2022	10:12	208.283333	85	22.5	8049	863	7186	180.96	2.58	0.43	180.4841	2650.4	573.89	23.92	3.97
25	24/11/2022	15:09	213.233333	87	22.7	8044	863	7181	175.96	2.51	0.07	175.4972	2650.4	578.88	23.26	0.66
26	26/11/2022	14:25	236.5	88	22.7	8018	863	7155	149.96	2.14	0.37	149.5656	2650.4	604.81	19.83	3.44
27	28/11/2022	11:00	305.083333	87	22.3	7976	863	7113	107.96	1.54	0.60	107.6761	2650.4	646.70	14.27	5.55
28	28/11/2022	14:16	324.083333	87	22.5	7976	863	7113	107.96	1.54	0.00	107.6761	2650.4	646.70	14.27	0.00
29	29/11/2022	10:00	343.816667	83	22.4	7968	863	7105	99.96	1.43	0.11	99.69711	2650.4	654.68	13.22	1.06
30	29/11/2022	14:35	348.4	87	22.6	7967	863	7104	98.96	1.41	0.01	98.69974	2650.4	655.68	13.08	0.13
31	29/11/2022	17:02	350.85	88	22.5	7966	863	7103	97.96	1.40	0.01	97.70237	2650.4	656.68	12.95	0.13
32	30/11/2022	8:14	366.05	84	22.1	7962	863	7099	93.96	1.34	0.06	93.71289	2650.4	660.67	12.42	0.53
33	30/11/2022	11:34	369.383333	85	22.5	7961	863	7098	92.96	1.33	0.01	92.71552	2650.4	661.66	12.29	0.13
34	30/11/2022	16:10	373.983333	86	22.6	7960	863	7097	91.96	1.31	0.01	91.71815	2650.4	662.66	12.16	0.13
35	1/12/2022	10:35	392.4	77	22.3	7953	863	7090	84.96	1.21	0.10	84.73656	2650.4	669.64	11.23	0.93
36	1/12/2022	11:46	393.583333	80	22.4	7952	863	7089	83.96	1.20	0.01	83.73919	2650.4	670.64	11.10	0.13
37	1/12/2022	13:47	395.6	82	22.4	7952	863	7089	83.96	1.20	0.00	83.73919	2650.4	670.64	11.10	0.00
38	1/12/2022	15:33	397.366667	82	22.5	7952	863	7089	83.96	1.20	0.00	83.73919	2650.4	670.64	11.10	0.00
39	2/12/2022	11:25	418.233333	72	22.2	7943	863	7080	74.96	1.07	0.13	74.76286	2650.4	679.62	9.31	1.19
40	5/12/2022	13:51	432.666667	82	22.3	7933	863	7070	64.96	0.93	0.14	64.78916	2650.4	689.59	8.59	1.32
41	5/12/2022	16:20	435.15	82	22.5	7932	863	7069	63.96	0.91	0.01	63.79179	2650.4	690.59	8.46	0.13
42	6/12/2022	10:02	512.783333	81	22.3	7929	863	7068	60.96	0.87	0.04	60.79968	2650.4	693.58	8.06	0.40
43	7/12/2022	14:52	529.616667	80	22.4	7925	863	7062	56.96	0.81	0.06	56.8102	2650.4	697.57	7.53	0.53
44	13/12/2022	14:10	648.916667	85	22.3	7920	863	7057	51.96	0.74	0.07	51.82335	2650.4	703.55	6.87	0.66
45	13/12/2022	13:47	672.533333	84	22.5	7918	863	7055	49.96	0.71	0.03	49.82861	2650.4	704.55	6.61	0.26
46	14/12/2022	11:11	691.933333	83	22.5	7918	863	7055	49.96	0.71	0.00	49.82861	2650.4	704.55	6.61	0.00
47	15/12/2022	10:18	715.05	82	22.4	7917	863	7054	48.96	0.70	0.01	48.83124	2650.4	705.55	6.47	0.13
48	16/12/2022	10:44	739.483333	77	22.5	7910	863	7047	41.96	0.60	0.10	41.84965	2650.4	712.53	5.55	0.93

Apéndice G3. Tabla de control de fase de secado máximo de MGM 3

Apéndice G3.1. Tabla de control de fase de secado con mezcla salina dentro del box.

MGM		3		V	3404.76	[cm ²]	Ms	6797.53	[gr]	Gs	2.65	-	pW	0.99762	[gr/cm ³]	
Medición	Día	Hora	tiempo [hr]	HR [%]	T [°C]	(M+Mv) [gr]	M [gr]	M [gr]	Mw [gr]	w [%]	Δw [%]	Vwo [cm ³]	Vs [cm ³]	Va [cm ³]	Sr [%]	ΔSr [%]
1	31/10/2022	15:46	0	79	23	758	Área de trazado	7511	713.47	10.50	-	715.17211	2571.2	118.36	85.80	-
2	2/11/2022	9:56	42.333	93	22.2	7545	42	7503	705.47	10.38	0.12	703.790981	2571.2	129.74	84.43	1.37
3	2/11/2022	11:56	44.333	89	21.1	7536	35	7501	703.47	10.35	0.03	701.795741	2571.2	131.74	84.20	0.24
4	3/11/2022	15:10	71.5662	99	23.3	8375	882	7493	695.47	10.23	0.12	693.814781	2571.2	139.72	83.24	0.96
5	3/11/2022	15:49	72.2162	98	23.2	8374	882	7492	694.47	10.22	0.01	692.817161	2571.2	140.72	83.12	0.12
6	4/11/2022	10:40	91.06619	99	22.4	8368	882	7486	688.47	10.13	0.09	686.831441	2571.2	146.70	82.40	0.72
7	4/11/2022	10:48	72.34953333	89	23.5	8368	882	7486	688.47	10.13	0.00	686.831441	2571.2	146.70	82.40	0.00
8	4/11/2022	14:56	76.48286667	99	23.1	8368	882	7486	688.47	10.13	0.00	686.831441	2571.2	146.70	82.40	0.00
9	4/11/2022	16:25	77.9662	99	23.3	8368	882	7486	688.47	10.13	0.00	686.831441	2571.2	146.70	82.40	0.00
10	8/11/2022	9:17	166.8328667	99	22.6	8359	882	7477	679.47	10.00	0.13	677.852861	2571.2	155.68	81.32	1.08
11	9/11/2022	10:59	192.5328667	99	22.5	8355	882	7473	675.47	9.94	0.06	673.862381	2571.2	159.67	80.84	0.48
12	10/11/2022	11:13	216.7662	99	22.9	8350	882	7468	670.47	9.86	0.07	668.874281	2571.2	164.66	80.25	0.60

Apéndice G3.2. Tabla de control de fase de secado máximo al aire libre.

MGM		3		Y	3404.76	[cm ³]	Ms	8795.53	[gr]	Gs	2.65	-	p _w	0.99737	[gr/cm ³]	
Medición	Día	Hora	tiempo [hr]	HR [%]	T [°C]	M·Mw [gr]	Mw [gr]	M [gr]	Mw [gr]	w [%]	Δw [%]	Y _{wo} [cm ³]	Y _s [cm ³]	Y _a [cm ³]	Sr [%]	ΔSr [%]
1	11/11/2022	15:52	245.32	99	22.9	8350	882	7468	672.47	9.90	-	674.2432598	2571.1	159.40	80.88	-
2	15/11/2022	9:04	334.52	93	22.1	8165	882	7283	487.47	7.17	2.72	486.1879539	2571.1	347.46	58.32	22.56
3	15/11/2022	11:35	337.036667	99	22.3	8162	882	7280	484.47	7.13	0.04	483.1958439	2571.1	350.45	57.96	0.36
4	15/11/2022	15:59	341.436667	99	22.4	8157	882	7275	479.47	7.06	0.07	478.2089939	2571.1	355.44	57.36	0.60
5	16/11/2022	11:22	360.703333	92	22.3	8118	882	7236	440.47	6.48	0.57	439.3116639	2571.1	394.34	52.70	4.67
6	16/11/2022	14:15	363.586667	99	22.4	8114	882	7232	436.47	6.42	0.06	435.3220839	2571.1	398.32	52.22	0.48
7	17/11/2022	7:50	381.17	83	22.1	8082	882	7200	404.47	5.95	0.47	403.4062439	2571.1	430.24	48.39	3.83
8	17/11/2022	14:16	387.603333	94	22.5	8071	882	7189	393.47	5.79	0.16	392.4361739	2571.1	441.21	47.07	1.32
9	17/11/2022	16:22	389.703333	94	22.5	8069	882	7187	391.47	5.76	0.03	390.4404339	2571.1	443.21	46.84	0.24
10	18/11/2022	8:13	405.57	88	22.1	8041	882	7159	363.47	5.35	0.41	362.5104739	2571.1	471.13	43.49	3.35
11	18/11/2022	9:31	406.87	87	22.5	8038	882	7156	360.47	5.30	0.04	359.5219639	2571.1	474.13	43.13	0.36
12	18/11/2022	14:05	411.436667	90	22.2	8030	882	7148	352.47	5.19	0.12	351.5430039	2571.1	482.10	42.17	0.96
13	18/11/2022	16:11	413.536667	92	22.3	8027	882	7145	349.47	5.14	0.04	348.5508939	2571.1	485.10	41.81	0.36
14	21/11/2022	9:08	478.22	93	22.1	7919	881	7038	242.47	3.57	1.57	241.8223039	2571.1	591.81	29.01	12.80
15	21/11/2022	10:25	479.503333	91	22.5	7917	881	7036	240.47	3.54	0.03	239.8375639	2571.1	593.81	28.77	0.24
16	21/11/2022	11:39	480.736667	92	22.5	7916	881	7035	239.47	3.52	0.01	238.8401939	2571.1	594.81	28.65	0.12
17	21/11/2022	14:14	483.32	95	22.6	7913	881	7032	236.47	3.48	0.04	235.8480839	2571.1	597.80	28.29	0.36
18	21/11/2022	16:15	485.336667	94	22.7	7912	881	7031	235.47	3.47	0.01	234.8501739	2571.1	598.80	28.17	0.12
19	22/11/2022	8:43	501.803333	90	22.4	7894	881	7013	217.47	3.20	0.26	216.8905939	2571.1	616.75	26.02	2.15
20	22/11/2022	9:47	502.87	90	22.5	7893	881	7012	216.47	3.19	0.01	215.9006839	2571.1	617.75	25.90	0.48
21	22/11/2022	14:16	506.286667	91	22.7	7889	881	7008	212.47	3.13	0.06	211.9112039	2571.1	621.74	25.42	0.48
22	23/11/2022	8:25	512.436667	74	22.2	7866	881	6985	189.47	2.79	0.34	188.9716939	2571.1	644.68	22.67	2.75
23	23/11/2022	9:30	513.52	78	22.9	7864	881	6983	187.47	2.76	0.03	186.9796939	2571.1	646.67	22.43	0.24
24	23/11/2022	11:21	515.37	83	22.5	7862	881	6981	185.47	2.73	0.03	184.9822139	2571.1	648.66	22.19	0.24
25	23/11/2022	14:28	518.486667	86	22.6	7859	881	6978	182.47	2.69	0.04	181.9901039	2571.1	651.66	21.83	0.36
26	23/11/2022	15:00	519.02	86	22.6	7859	881	6978	182.47	2.69	0.00	181.9901039	2571.1	651.66	21.83	0.00
27	24/11/2022	10:12	538.22	85	22.5	7840	881	6959	163.47	2.41	0.28	163.0400739	2571.1	670.61	19.56	2.27
28	24/11/2022	11:16	539.286667	85	22.5	7839	881	6958	162.47	2.39	0.01	162.0427039	2571.1	671.60	19.44	0.12
29	24/11/2022	15:09	543.17	87	22.7	7837	881	6956	160.47	2.36	0.03	160.0479639	2571.1	673.60	19.20	0.24
30	25/11/2022	11:17	563.303333	85	22.5	7822	881	6941	145.47	2.14	0.22	145.0874139	2571.1	688.56	17.40	1.79
31	25/11/2022	14:25	566.436667	88	22.7	7820	881	6939	143.47	2.11	0.03	143.0926739	2571.1	690.55	17.16	0.24
32	25/11/2022	15:28	567.486667	88	22.7	7819	881	6938	142.47	2.10	0.01	142.0953039	2571.1	691.55	17.05	0.12
33	28/11/2022	11:00	635.02	87	22.3	7791	881	6910	114.47	1.68	0.41	114.1689439	2571.1	719.48	13.70	3.35
34	28/11/2022	14:16	638.286667	87	22.5	7791	881	6910	114.47	1.68	0.00	114.1689439	2571.1	719.48	13.70	0.00
35	28/11/2022	15:18	639.32	87	22.5	7791	881	6910	114.47	1.68	0.00	114.1689439	2571.1	719.48	13.70	0.00
36	29/11/2022	10:00	659.053333	83	22.4	7784	881	6903	107.47	1.58	0.10	107.1873539	2571.1	726.46	12.86	0.84
37	29/11/2022	14:16	679.053333	87	22.6	7783	881	6902	106.47	1.57	0.01	106.1899839	2571.1	727.46	12.74	0.12
38	29/11/2022	14:35	679.37	87	22.6	7782	881	6901	105.47	1.55	0.01	105.1926139	2571.1	728.45	12.62	0.12
39	29/11/2022	17:02	681.82	88	22.5	7783	881	6902	106.47	1.57	-0.01	106.1899839	2571.1	727.46	12.74	-0.12
40	30/11/2022	8:14	697.02	84	22.1	7779	881	6898	102.47	1.51	0.06	102.2005039	2571.1	731.45	12.26	0.48
41	30/11/2022	11:34	700.353333	85	22.5	7778	881	6897	101.47	1.49	0.01	101.2031339	2571.1	732.44	12.14	0.12
42	30/11/2022	15:10	704.953333	86	22.6	7777	881	6896	100.47	1.48	0.01	100.2057639	2571.1	733.44	12.02	0.12
43	1/12/2022	10:35	723.37	77	22.3	7770	881	6889	93.47	1.38	0.10	93.2241739	2571.1	740.42	11.18	0.84
44	1/12/2022	11:46	724.553333	80	22.4	7770	881	6889	93.47	1.38	0.00	93.2241739	2571.1	740.42	11.18	0.00
45	1/12/2022	13:47	726.57	82	22.4	7770	881	6889	93.47	1.38	0.00	93.2241739	2571.1	740.42	11.18	0.00
46	1/12/2022	15:33	728.336667	82	22.5	7770	881	6889	93.47	1.38	0.00	93.2241739	2571.1	740.42	11.18	0.00
47	2/12/2022	11:25	749.203333	72	22.2	7761	881	6880	84.47	1.24	0.13	84.2478439	2571.1	749.40	10.11	1.08
48	5/12/2022	13:51	823.636667	82	22.3	7752	881	6871	75.47	1.11	0.13	75.2716139	2571.1	758.38	9.03	1.08
49	5/12/2022	16:20	826.12	82	22.5	7752	881	6871	75.47	1.11	0.00	75.2716139	2571.1	758.38	9.03	0.00
50	6/12/2022	10:02	843.82	81	22.3	7749	881	6868	72.47	1.07	0.04	72.2794039	2571.1	761.37	8.67	0.36
51	7/12/2022	14:52	872.653333	80	22.4	7745	881	6864	68.47	1.01	0.06	68.2893239	2571.1	765.36	8.19	0.48
52	12/12/2022	14:10	991.953333	85	22.3	7741	881	6860	64.47	0.95	0.06	64.3004439	2571.1	769.35	7.71	0.48
53	13/12/2022	13:47	1015.57	84	22.5	7739	881	6858	62.47	0.92	0.03	62.3057039	2571.1	771.34	7.47	0.24
54	14/12/2022	11:11	1036.37	83	22.5	7739	881	6858	62.47	0.92	0.00	62.3057039	2571.1	771.34	7.47	0.00
55	15/12/2022	10:18	1060.08667	82	22.4	7738	881	6857	61.47	0.90	0.01	61.3083339	2571.1	772.34	7.35	0.12
56	16/12/2022	10:44	1084.52	77	22.5	7732	881	6851	55.47	0.82	0.09	55.3241139	2571.1	778.32	6.64	0.72

Apéndice H. IMÁGENES

Apéndice H1. Probeta MGM 1



Apéndice H2. Probeta MGM 2



Apéndice H3. Probeta MGM 3



Apéndice H4. Probeta MGM 4



Apéndice H5. Probeta MGM 4-R



Apéndice H6. Probeta MGM 3 dentro del box con sal



Apéndice H7. Probeta MGM 3 con mezcla salina



Apéndice H8. Cavas utilizadas para almacenar las probetas

