

Evaluación del Comportamiento Hidromecánico de Materiales Granulares Marginales de  
Subbase Identificados como MGM-1

Jeisi Jelizeth Martínez Chinchilla, Juan Camilo Vargas Prada

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Alex Eduardo Alvarez Lugo

PhD. en Ingeniería Civil

Codirector

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

PhD. en Ingeniería del Terreno Cartográfica y Geofísica

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil  
Bucaramanga

2022

### **Agradecimientos y dedicatoria**

Queremos agradecer a la Universidad Industrial de Santander, especialmente a la escuela de ingeniería civil por brindarnos el espacio para ejecutar los diferentes ensayos que dieron forma a este proyecto; de igual forma agradecemos a los directores de proyecto de grado, el Ing. Allex Eduardo Alvarez Lugo y al Ing. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes por su apoyo y orientación.

A Dios y a la virgen María por ser mi fortaleza en los momentos difíciles a lo largo de este camino, pero sobre todo por haberme dado vida y salud para poder cumplir este sueño. A mis padres Nived y Julio por ser mi apoyo incondicional, mi fuerza y mi motivación, por su gran esfuerzo y sacrificio para que pudiera culminar mis estudios de la mejor manera; por esas y muchas razones más prometo continuar esforzándome para ser una profesional exitosa. A mis hermanos Yeison y Edwin, por ser mis mejores amigos, por estar orgullosos de mí y porque a pesar de la distancia siempre estuvimos el uno para el otro. A mi sobrino Yeiler por su amor, alegría y constante motivación al verme como un ejemplo a seguir. Finalmente, a mi compañero de tesis Juan Camilo Vargas por su responsabilidad y dedicación para el desarrollo de este proyecto.

***Jeisi Jelizeth Martínez Chinchilla***

A mi compañera de trabajo de grado Jeisi Martinez por incluirme en este gran proyecto, así mismo agradezco a Sebastián por su apoyo incondicional en todo este proceso. Finalmente agradezco a mis padres y hermana por acompañarme durante toda la carrera sacando siempre lo mejor de mí.

***Juan Camilo Vargas Prada***

**Tabla de contenido**

Introducción .....	10
1. Objetivos.....	12
1.1 Objetivo general .....	12
1.2 Objetivos específicos.....	12
2. Generalidades .....	13
2.1. Proyecto global sobre materiales granulares marginales (mgm).....	13
3. Marco teórico.....	15
3.1. Materiales granulares marginales (MGM) .....	15
3.2. Especificaciones de subbase y base granular .....	17
3.3. Compactación por método giratorio .....	18
3.4. Succión del suelo .....	20
3.5. Técnica del papel filtro para medición de succión .....	20
3.6. Ensayo de tracción indirecta (ITS) .....	21
4. Materiales y métodos.....	21
4.1. Granulometría de trabajo .....	23
4.2. Índice de plasticidad .....	24
4.3. Compactación .....	25
4.4. Ensayo de tracción indirecta.....	26
4.5. Toma de imágenes 2d y 3d .....	28
4.6. Medición de succión total.....	29
4.7. Granulometría final.....	31

5. Resultados y discusión.....	32
5.1. Índice de plasticidad .....	32
5.2. Compactación .....	34
5.3. Ensayo de tracción indirecta.....	37
5.4. Succión .....	40
5.5. Granulometría final.....	42
6. Conclusiones.....	44
7. Recomendaciones .....	45
Referencias bibliográficas .....	46
Apéndices .....	50

**Lista de tablas**

Tabla 1. Distribución de ensayos – estudio de materiales granulares marginales.....	13
Tabla 2. Especificaciones del PG-3 Art. 330 para uso de materiales granulares marginales.....	16
Tabla 3. Especificaciones para subbases granulares .....	17
Tabla 4. Especificaciones para bases granulares .....	18
Tabla 5. Cantidad de material de cantera, caolinita, bentonita, y triturado para mezcla de finos	32
Tabla 6. Comparación de límite líquido e índice de plasticidad para cada material MGM con las especificaciones INVIAS y PG-3. ....	34
Tabla 7. Peso unitario seco máximo y humedad óptima de los materiales MGM1, MGM2 y SBG_C1 .....	35
Tabla 8. Degradación de fracciones para los materiales MGM1, MGM2 y SBG_C1 .....	43

**Lista de Figuras**

Figura 1. Granulometría de diseño- proyecto global sobre MGM.....	14
Figura 2. Criterios de clasificación de suelos marginales según plasticidad PG-3 Art. 330 ...	16
Figura 3. Compactador giratorio ubicado en el Centro de caracterización de materiales-UIS	19
Figura 4. Material de cantera. (b) Material triturado. (c) Bentonita. (d) Caolinita. ....	23
Figura 5. Curvas granulométricas MGM1, MGM2, y SBG-C1 .....	23
Figura 6. Montaje de la probeta para ensayo ITS .....	27
Figura 7. Índice de plasticidad vs % material triturado .....	33
Figura 8. Índice de plasticidad vs % bentonita .....	34
Figura 9. Curva de compactación del MGM1, MGM2 y SBG_C1 .....	35
Figura 10. Peso unitario seco versus N° de giros del material MGM1 .....	36
Figura 11. Peso unitario seco versus N° de giros del material MGM2 .....	36
Figura 12. Resistencia a la tracción indirecta vs humedad del MGM1, MGM2 SBG_C1 .....	37
Figura 13. Curva esfuerzo vs desplazamiento ensayos de RTI para MGM1.....	38
Figura 14. Curva esfuerzo vs desplazamiento ensayos de RTI para MGM2.....	39
Figura 15. Curva esfuerzo vs desplazamiento ensayos de RTI para SBG_C1 .....	39
Figura 16. Relación humedad papel filtro-succión .....	41
Figura 17. Humedad del papel filtro vs humedad de la probeta .....	41
Figura 18. Granulometría final MGM1 .....	42
Figura 19. Granulometría final MGM2 .....	42
Figura 20. Granulometría final SBG_C1 .....	43

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Ensayo de límite líquido y límite plástico - norma INVIAS 125 -13 y 126 -13 .....	50
Apéndice B. Protocolo de preparación de mezclas y ensayo de compactación giratoria para la generación de curvas de compactación.....	50
Apéndice C. Proceso de compactación de probetas suelos mediante compactador giratorio Superpave. ....	76
Apéndice D. Granulometría de trabajo.....	76
Apéndice E. Ensayos de índices de plasticidad para IP 8% .....	78
Apéndice F. Ensayos de índices de plasticidad para IP 12% .....	80
Apéndice G. Datos compactación MGM1 .....	82
Apéndice H. Datos compactación MGM2 .....	84
Apéndice I. Datos compactación SBG_C1.....	85
Apéndice J. Ensayo de tracción indirecta.....	86
Apéndice K. Ensayo de succión .....	87
Apéndice L. Granulometría final.....	88
Apéndice M. Toma de imágenes MGM1 .....	91
Apéndice N. Toma de imágenes MGM2.....	103

## Resumen

**Título:** evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como MGM-1\*

**Autores:** Jeisi Jelizeth Martínez Chinchilla\*\*

Juan Camilo Vargas Prada\*\*

**Palabras clave:** Material Granular Marginal (MGM), índice de plasticidad (IP), compactación giratoria, tracción indirecta (ITS), succión total, degradación.

**Descripción:** la caracterización de materiales no convencionales, para validar a futuro su uso en estructuras de pavimento puede constituir una de las diversas alternativas técnicas para ampliar las intervenciones enfocadas en el mejoramiento de vías terciarias. Este proyecto tiene como objetivo principal analizar el comportamiento hidro-mecánico de dos materiales granulares marginales (MGM1 y MGM2), los cuales no cumplen con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) relacionadas con el porcentaje de finos e índices de plasticidad requeridos para una subbase SBG-38. Con el fin de analizar dicho comportamiento, se fabricaron probetas haciendo uso del compactador giratorio Superpave. Posteriormente, las probetas se sometieron a ensayos de granulometría, tracción indirecta, y medición de succión total. Los resultados obtenidos se compararon con los de un material de control (SGB\_C1), a partir de los cuales se logró evidenciar que el material MGM1 presentó mayor resistencia a la tracción indirecta y menor degradación del material después de ser compactado; sin embargo, el MGM2 presentó mayores valores de succión. A su vez, estos resultados sugieren para una investigación futura ampliar el estudio de los MGMs en cuanto al análisis de locking point en el proceso de compactación. Adicionalmente, a partir de la toma de imágenes determinar parámetros tales como distribución de tamaños de agregado, porcentaje de agregado fracturado y área real de fractura, que contribuyan al estudio del comportamiento mecánico de dichos materiales.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Allex Eduardo Alvarez Lugo. Codirector Vladimir Ernesto Merchán Jaimes.

### Abstract

**Title:** Hydromechanics behavior evaluation of subbase granular materials identified as MGM-1

**Authors:** Jeisi Jelizeth Martínez Chinchilla\*\*

Juan Camilo Vargas Prada\*\*

**Keywords:** Marginal Granular Material (MGM), plasticity index, gyratory compaction, indirect tensile strength (ITS), total suction, degradation.

**Description:** characterization of nonconventional materials for validating their future use in pavement structures can constitute one of the diverse technical alternatives for increasing the interventions focused on improving low-volume roads. This project analyzes the hydromechanical behavior of two marginal granular materials (MGM1 and MGM2). These materials do not meet the specifications of the National Road Institute (INVIAS) for a subbase SBG-38 in terms of fines content and plasticity index. Evaluating the material response required testing specimens manufactured using a Superpave gyratory compactor. Subsequently, gradation, indirect tensile strength, and total suction tests were performed. The results obtained were compared with a control material (SBG\_C1). The results suggest that material MGM1 exhibited greater indirect tensile strength and less particle degradation after its compaction. However, the material MGM2 showed greater values of suction. In addition, the results encouraged broadening MGM's research by considering further assessing the locking point in the compaction process. Finally, based on the specimen's imaging, different parameters such as aggregate size distribution, percentage of fractured aggregate, and actual fracture area can be calculated to contribute to the material's mechanical behavior.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Allex Eduardo Alvarez Lugo. Codirector Vladimir Ernesto Merchán Jaimes.

## Introducción

Colombia posee 205.937 km de carreteras, de las cuales 142.284 km son vías de bajo volumen de tránsito (o vías terciarias) (Cepeda, 2019); estas juegan un papel muy importante para el país, ya que comunican las cabeceras municipales con sus veredas o unen veredas entre sí y a su vez permiten llegar a las zonas más alejadas y marginales del país. El Estado colombiano, a lo largo de la historia ha implementado diferentes iniciativas para realizar mejoras sobre esta infraestructura ya que actualmente solo el 10% se encuentra en buen estado (Semana, 2022). Uno de los principales problemas que presenta la ejecución de estas obras de pavimentación es la carencia de materiales granulares tradicionales de buena calidad que cumplan con las especificaciones técnicas estipuladas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), generando altos costos en los proyectos viales, debido al transporte de dichos materiales desde otras regiones hasta los sitios de desarrollo de los proyectos viales (Acosta & Alarcón, 2017).

A partir de la problemática planteada anteriormente surge la necesidad de implementar soluciones innovadoras. Una de estas soluciones es la incorporación de materiales granulares marginales (MGM) en la construcción y mantenimiento de vías terciarias (i.e., conformación de capas de subbase granular). Según el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes de España (PG-3) (Cano & Perucho, 2015), los MGMs son aquellos que están compuestos de materiales naturales, que son aceptados si cumplen al menos unos requisitos mínimos en cuanto al contenido de materia orgánica, expansión, y condiciones de plasticidad. El uso de estos materiales en estructuras de pavimento podría brindar ventajas medioambientales, económicas, y paisajísticas, entre otras.

Hasta la fecha, las investigaciones existentes sobre MGM están encaminadas a su aprovechamiento para la construcción de rellenos en terraplén y son muy pocos los estudios relacionados con su uso como capas estructurales para estructuras de pavimento de vías de bajo volumen de tránsito. Estos estudios iniciales sugieren que es posible su utilización como bases granulares alternativas (Liebenberg & Visser, 2003). Ante la necesidad de avanzar en la caracterización de MGM se opta por estudiar su comportamiento hidromecánico mediante ensayos de granulometría, tracción indirecta y succión haciendo uso de los equipos del laboratorio de caracterización de materiales de la Universidad Industrial de Santander.

En este contexto se plantea el presente trabajo de grado, el cual hace parte de las actividades de investigación de un proyecto global que se enfoca en evaluar de forma experimental el comportamiento mecánico e hidráulico para ciertas tipologías de MGMs en los que se varía el porcentaje de finos e índices de plasticidad. En razón de lo anterior, esta propuesta se enfocará únicamente en el estudio de los materiales identificados como MGM1 y MGM2, los cuales presentan un porcentaje de finos de 18% e índices de plasticidad (IPs) de 8% y 12% respectivamente.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento hidromecánico de muestras compactadas con materiales granulares marginales MGM-1, teniendo en cuenta un contenido de finos del 18% e índices de plasticidad de 8% y 12%.

### 1.2 Objetivos Específicos

Establecer las curvas de compactación de los materiales granulares teniendo en cuenta un contenido de finos del 18% e índices de plasticidad del 8% y 12% (MGM-1).

Proponer un índice de compactabilidad a partir de las curvas densidad – número de giros.

Establecer la relación succión total – contenido de agua – grado de saturación de las muestras compactadas.

Evaluar el grado de degradación del tamaño de partículas por efectos de la técnica de compactación giratoria mediante la comparación de la granulometría de diseño de las muestras y la granulometría después de compactar.

Evaluar la influencia del contenido de humedad de compactación sobre resistencia a la tracción indirecta (ITS) en las muestras granulares identificadas como MGM-1.

Evaluar la influencia del índice de plasticidad en la rigidez de muestras compactadas en el contenido de humedad óptimo.

## 2. Generalidades

### 2.1. Proyecto global sobre materiales granulares marginales (MGM)

En la tabla 1 se presenta un resumen del proyecto global, especificando los ensayos a realizar para cada material de estudio. A su vez los números que se observan en la tabla indican el número de ensayos a ejecutar.

Tabla 1

*Distribución de ensayos – estudio de materiales granulares marginales*

		Grupos de trabajo			
		MGM-1	MGM-2	MGM-3	MGM-4
%Finos	18%	<b>X</b>		X	
	21%		X		X
	24%				X
Índice de plasticidad	8%	<b>X</b>	X		
	12%	<b>X</b>	X		
	15%			X	X
Material de control 1	SBG-C1			X	
Curvas de compactación		<b>2</b>	2	2	2
Ensayo de tracción indirecta		<b>8</b>	8	8	8
Toma de imágenes		<b>48</b>	48	48	48
Medición de succión		<b>8</b>	8	8	8
Distribución de tamaños (granulometría)		<b>8</b>	8	8	8

En la tabla 1 se observa como este proyecto global se divide en cuatro grupos de trabajo, donde tres de ellos realizan el estudio de dos MGMs, mientras que el grupo MGM-3 se encarga de un MGM y del material de control tipo subbase granular (SBG-C1).

En la figura 1 se presenta la curva granulométrica que se empleará para cada MGM. En esta figura se evidencia la marginalidad de los MGMs al no cumplir con las especificaciones establecidas por el INVIAS para el contenido de finos, superando su límite superior.

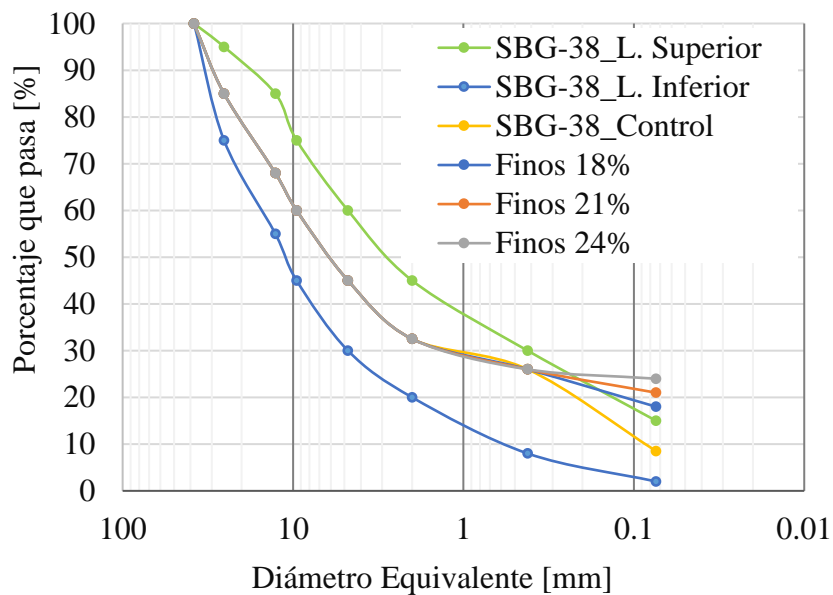


Figura 1. Granulometría de diseño- proyecto global sobre MGM

### 3. Marco teórico

A continuación, se presentan los aspectos teóricos relevantes para la investigación.

#### 3.1. Materiales granulares marginales (MGM)

Sandoval et al. (2019) definen un MGM como un material que no se ajusta totalmente a las especificaciones estándar utilizadas en un país o región para los materiales de pavimentación, pero que puede utilizarse con éxito, ya sea en condiciones climáticas especiales o tras el progreso de las técnicas de construcción o el tratamiento para mejorar sus propiedades.

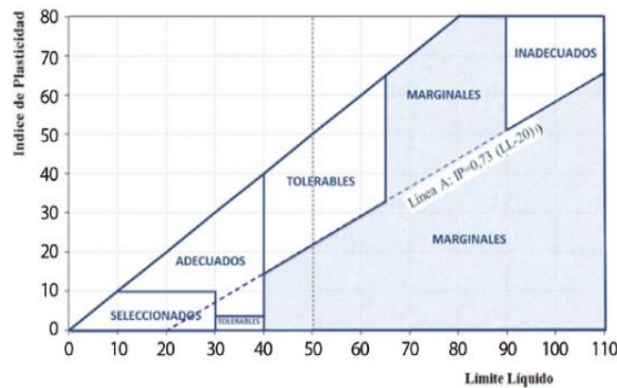
Así mismo el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes de España (PG-3) (Cano & Perucho, 2015) considera como materiales marginales aquellos suelos que, no pudiendo ser clasificados dentro de las otras categorías (seleccionados, adecuados, tolerables e inadecuados) cumplen al menos unas condiciones mínimas en cuanto al contenido de materia orgánica, expansión, y condiciones de plasticidad, como se resume en la tabla 2. Adicionalmente, en la figura 2 se presentan los criterios de clasificación de suelos marginales según plasticidad. Bajo estos criterios, se considera viable la implementación de materiales granulares marginales para la construcción de obras viales; sin embargo, la práctica más utilizada en España para el empleo de MGMs corresponde a su estabilización con adición de cal (Cano & Perucho, 2015).

Tabla 2

*Especificaciones del PG-3 Art. 330 para uso de materiales granulados marginales*

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

*Nota:* tomado de Cano & Perucho, 2015.



*Figura 2.* Criterios de clasificación de suelos marginales según plasticidad PG-3 Art. 330

*Nota:* tomado de Cano & Perucho, 2015.

A continuación, se presenta evidencia de estudios relacionados con el comportamiento de MGMs en estructuras de pavimento con bajo nivel de tránsito. Li et al. (2017) evaluaron el comportamiento ante deformación permanente de MGMs provenientes de Nueva Zelanda, a través de la ejecución del ensayo triaxial dinámico sobre probetas con diferentes condiciones de humedad. Los autores concluyeron que el MGM tiene una capacidad razonablemente buena para resistir la deformación permanente en condiciones secas, pero esta capacidad se deteriora cuando el material se expone a un periodo prolongado de humedecimiento y al someterse a altos niveles de esfuerzo.

Así mismo Liebenberg & Visser (2003) concluyeron que los MGM tratados con cemento y emulsión asfáltica desarrollan alto grado de resistencia a la deformación permanente, haciéndolos aptos para ser empleados en pavimentos con niveles de tráfico bajos a medios. Las pruebas de laboratorio demostraron que el cemento contribuye a la resistencia del material, mientras que la adición de suficiente emulsión mejora la flexibilidad. Por lo tanto, es necesario un buen equilibrio para garantizar la combinación óptima de estos estabilizadores.

### 3.2. Especificaciones de subbase y base granular

En las tablas 3 y 4 se presentan las especificaciones establecidas por diferentes agencias viales para subbases granulares (SBG) y bases granulares (BG) respectivamente.

Tabla 3

*Especificaciones para subbases granulares*

Norma	Parámetro				
	Contenido de finos (%)	LL, máx. (%)	IP, máx. (%)	DMA, máx. (%)	CBR, mín. (%)
INVIAS (2013)	15	25	6	50	30
TxDOT (2014)	20	40	10	-	-
FHWA (2014)	10	30	7	50	30
AASHTO (2016)	2-8	25	4	50	30
MTOP (2013)	15	25	6	50	30
NCh (2018)	10	35	8	40	40
Austroroads (2008)	12	35	12	35	30

*Nota:* líquido límite (LL), índice de plasticidad (IP), desgaste en la máquina de los ángeles (DMA), relación de soporte de California (CBR).

Tabla 4

*Especificaciones para bases granulares*

Norma	Parámetro				
	Contenido de finos (%)	LL, máx. (%)	IP, máx. (%)	DMA, máx. (%)	CBR, mín. (%)
INVIAS (2013)	5-15	25	3	40	80
TxDOT (2014)	10	40	10	-	-
FHWA (2014)	10	35	4	50	80
AASHTO (2016)	2-8	35	4	40	80
MTOP (2013)	2-12	25	6	40	80
NCh (2018)	10	25	6	35	80
Austroroads (2008)	7-20	25	6	30	80

*Nota:* líquido límite (LL), índice de plasticidad (IP), desgaste en la máquina de los ángeles (DMA), relación de soporte de California (CBR).

A partir de los parámetros reportados en las tablas anteriores se puede evidenciar que, en comparación con el INVIAS, algunas agencias viales especifican un rango más permisible en cuanto a límite líquido e índice de plasticidad de subbases granulares. Por lo anterior, en Colombia podría ser viable emplear materiales que no cumplan con las especificaciones vigentes.

### 3.3. Compactación por método giratorio

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, Reyes, & Méndez, 2007). 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, Martínez, Miró, Hernández, & Araya).

A continuación, en la figura 3 se presenta el compactador giratorio utilizado para la fabricación de las probetas de estudio, el cual se encuentra en el centro de caracterización de materiales de la universidad industrial de Santander.



*Figura 3.* Compactador giratorio ubicado en el Centro de caracterización de materiales-UIS

Un dato a destacar en los resultados de la compactación giratoria es el punto de bloqueo (locking point), el cual es definido como los primeros tres giros en los que se presenta una altura constante en la probeta y están precedidos por dos giros que tienen una altura constante del espécimen compactado. El locking point permite identificar un adecuado desarrollo del contacto agregado-agregado y agregados resistentes al aplastamiento para conservar las propiedades de drenaje con el tiempo (Alvarez, Mora, & Espinosa, 2018).

### **3.4. Succión del suelo**

El término “succión del suelo” fue usado por Schofield (como se citó en Barrera & Garnica, 2002) para representar la “deficiencia de presión” en el agua de poros de algunos suelos (saturados o no saturados) que tenían la capacidad de absorber agua a presión atmosférica.

La succión total corresponde al trabajo total de las fuerzas de capilaridad, absorción y ósmosis la cual tiene dos componentes. La primera está relacionada con el efecto capilar y recibe el nombre de succión matricial, y la segunda, producto de la presencia de sales diluidas en el agua, es conocida como succión osmótica (García et al. , 2017)

### **3.5. Técnica del papel filtro para medición de succión**

Este método de ensayo se refiere al uso de papeles de filtro de laboratorio como sensores pasivos para evaluar la succión matricial y total del suelo (INVIAS, 2013). Esta técnica controla las variables para la medición del contenido de humedad del papel de filtro, el cual puede estar en contacto directamente con la muestra determinando así la succión matricial o el papel filtro puede estar dentro del recipiente hermético sin tener contacto con la muestra de suelo midiendo así la succión total. Cabe destacar que la operación de prueba con esta técnica es simple y no necesita otro equipo adicional (Pande et al. , 2019).

### **3.6. Ensayo de tracción indirecta (ITS)**

La norma ASTM D8225-19 (Garrote, 2006) describe los procedimientos de preparación, prueba y medición de la resistencia al agrietamiento de probetas cilíndricas elaboradas con mezcla asfáltica. Sin embargo, para finalidades de este proyecto, el ITS se realiza sobre probetas cilíndricas de MGM compactado. El ensayo consiste en la aplicación de una carga de manera uniforme a lo largo de dos generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura.

El parámetro a determinar es la carga máxima (de rotura) de la probeta. También se puede determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta durante la realización del ensayo si se dispone de los deformímetros necesarios para la toma de datos.

## **4. Materiales y métodos**

Como anteriormente se indicó, un MGM no satisface una o algunas especificaciones de calidad. En este trabajo se evaluaron dos MGMs diseñados y controlados en laboratorio; el MGM1 se caracteriza por tener un contenido de finos de 18% e IP de 8% y el MGM2 corresponde a un material con contenido de finos de 18% e IP de 12%.

Para la conformación de las probetas del MGM se empleó material de cantera y material triturado. Estos materiales fueron extraídos de la cantera de Paviandi ubicada en el Km 4,5 vía Piedecuesta - Aratoca, Santander. El material de cantera se usó como componente principal para

la conformación de los MGMs evaluados. Este material presenta un índice de plasticidad de 11% en su fracción fina (pasa tamiz No. 200), a su vez tiene un valor de DMA de 60.73%, pérdida por sulfatos de 3.70% y un equivalente de arena de 48% (Gelves, 2021). Cabe aclarar que a pesar de que el material de cantera no cumple con el requisito máximo de DMA (50%) establecido por el INVIAS (2013), este se usará como componente principal del material de control SBG\_C1 desde el punto de vista que satisface el porcentaje de finos e índice de plasticidad al mezclarse con material fino triturado para una SBG-38. Para investigaciones futuras se caracterizará un material de control que cumpla con todas las especificaciones sugeridas por el INVIAS (2013).

El material triturado fue obtenido a partir de la trituración de roca y seleccionado de los filtros de finos de la planta asfáltica de la cantera Paviandi. Este material no presenta plasticidad (no líquido, no plástico; NL-NP).

La caolinita y la bentonita empleadas fueron importadas a través de la empresa Comercial Fox S.A.S ubicada en la vía Mosquera–Soacha, Cundinamarca, y se utilizaron para reemplazar parte de la fracción fina del material de cantera para obtener un IP del 12% teniendo en cuenta que el IP de la caolinita empleada es 11.68% y el IP de la bentonita es de 360%.

A continuación, en la figura 4 se presentan los materiales utilizados para la elaboración de cada una de las probetas.

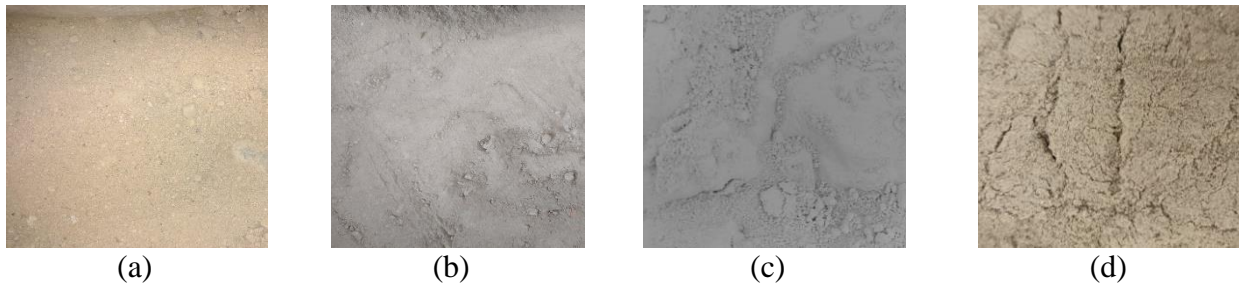


Figura 4. Material de cantera. (b) Material triturado. (c) Bentonita. (d) Caolinita.

#### 4.1. Granulometría de trabajo

La granulometría de trabajo de los dos MGM caracterizados se presenta en la Figura 5. Esta granulometría es sensiblemente paralela a la curva de granulometría promedio de la especificación INVIAS para SBG-38; se modificó el porcentaje de finos usando 18% (superando el límite de 15% especificado para una subbase granular SBG-38).

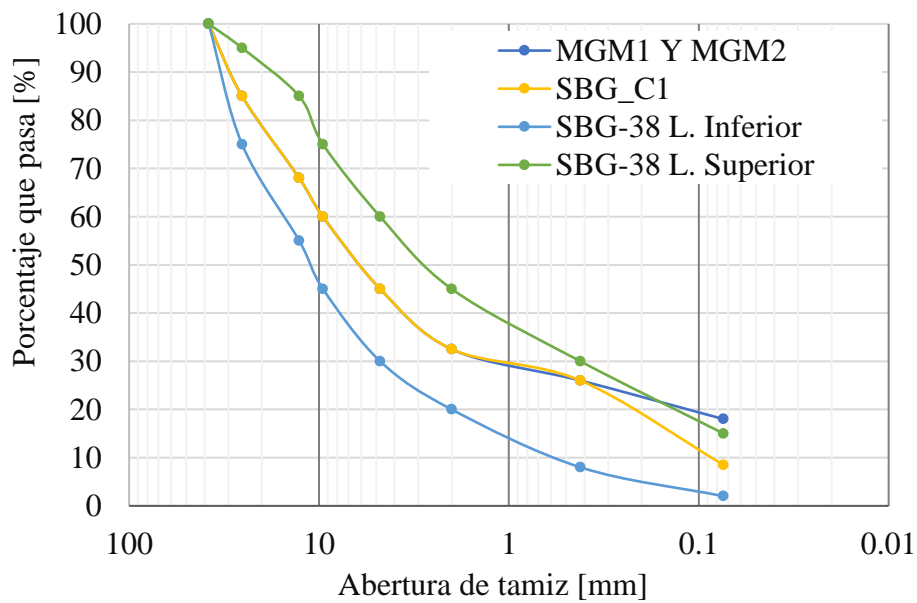


Figura 5. Curvas granulométricas MGM1, MGM2, y SBG-C1

A partir de la granulometría de diseño se estableció la cantidad de material requerido de cada fracción para elaborar las probetas de estudio de los materiales MGM1 y MGM2 con granulometría controlada (recombinación de fracciones en laboratorio). Para la determinación de la masa requerida de cada fracción, se proyectó la fabricación de probetas de 0.20 m de altura y diámetro de 0.15 m y se adoptó un peso unitario seco inicial de 20 KN/m<sup>3</sup>.

#### **4.2. Índice de plasticidad**

Los IP de los materiales MGM1 y MGM2 evaluados corresponden, respectivamente a 8% y 12%. Para obtener fracciones pasa tamiz No. 200 con estos IP fue necesario realizar combinaciones de materiales finos como se describe a continuación. Las fracciones finas que se combinaron corresponden a finos de material de cantera, finos del material triturado, caolinita- y bentonita-comercial.

Para alcanzar los IPs de 8% y 12% se realizaron ensayos de límite líquido según el procedimiento expuesto en la norma INV E-125-13 (INVIAS, 2013) y límite plástico según la norma INV E-126-13 (INVIAS, 2013) (Apéndice A). La mezcla de material pasa tamiz No. 200 a ensayar para alcanzar un IP de 8% se hizo con material fino de cantera y triturado, mientras que para alcanzar un IP de 12% se realizó una mezcla con material fino de cantera, caolinita, y bentonita. En cada ensayo se varió el porcentaje de material triturado y de bentonita respectivamente para así analizar el comportamiento del IP ante esta variación.

Para el ensayo de límite líquido se mantuvo la mezcla de cantera y triturado en proceso de curado durante 40 minutos, mientras que la mezcla de cantera, colinita y bentonita se mantuvo durante 60 minutos en curado. Este curado se indujo con el fin de que la humedad en la mezcla fuera homogénea y se estabilizara.

### **4.3. Compactación**

Para determinar los valores de peso unitario seco máximo y humedad óptima de cada MGM, se realizó su respectiva curva de compactación. Para este fin se manufacturaron 4 probetas con diferentes humedades haciendo uso del compactador giratorio Superpave.

La mezcla de suelo para cada MGM se realizó a partir de la granulometría de trabajo y teniendo en cuenta que se requerían diferentes humedades se garantizó una humedad inicial del 0%, la cual se obtuvo a través del proceso de secado en horno.

Una vez secado el material, se realizó el mezclado con agua, considerando la cantidad de agua correspondiente a la humedad deseada. Con el fin de homogeneizar dicha humedad, se le permitió a la mezcla suelo-agua un proceso de curado de 18 a 24 horas mediante su almacenamiento en tres bolsas herméticas.

Una vez terminado el proceso de curado y con el propósito de obtener la humedad real de las probetas compactadas se extrajeron 200 g de suelo justo antes de depositarlo en el molde del

compactador; posteriormente se secó en el horno a 110°C durante 24 horas y se realizó su respectivo cálculo de humedad.

El material húmedo restante se pesó, se depositó en el molde de compactación giratoria en tres capas iguales para minimizar efectos de segregación, y seguidamente se colocó dentro del compactador. Una vez realizado este paso se ajustó el ángulo de giro con un valor de 1.25° y una presión de contacto de 600 kPa. A su vez, se estableció el número de giros teniendo en cuenta que para las humedades extremas (mínima y máxima de estudio) se consideraron 180 giros, mientras que para las humedades intermedias se asignaron 140 giros. Después de configurados los parámetros se inició la compactación.

Una vez terminada la compactación se extrajo la probeta, se recubrió en papel vinipel y se guardó en una cava hasta que fue posible la ejecución de los ensayos de tracción indirecta, medición de succión total y granulometría final.

En el apéndice B se presenta con mayor detalle el protocolo de compactación y en el apéndice C la ejecución de este empleando el método giratorio.

#### **4.4. Ensayo de tracción indirecta**

Este ensayo se realizó con el fin de determinar y comparar la resistencia a la tracción de cada una de las probetas utilizadas para las curvas de compactación de cada MGM. El ensayo se llevó

a cabo con base en la norma ASTM D8225 (ASTM, 2019) y se empleó una prensa MTS 647, a la cual se le adaptó un cabezal de carga específico para el ensayo de tracción indirecta.

Inicialmente, para la ejecución del ensayo fue necesario cubrir la MTS 647 con un plástico y así proteger el equipo de las partículas que se desprendían de las probetas cuando ocurría la falla. Posteriormente se instaló el cabezal de carga a la MTS 647 asegurándolo con los tornillos de ajuste y se colocó la probeta sobre los elementos transmisores de carga, garantizando que esta estuviera centrada como se observa en la figura 6; seguido a esto se ubicaron a ambos lados y de forma paralela al cabezal de carga medio tubo de PVC de 0.15 m de diámetro donde se recolectó la muestra alterada una vez fallada la probeta.



*Figura 6.* Montaje de la probeta para ensayo ITS

Finalmente se aplicó la carga manteniendo la velocidad de deformación constante de 50,8 mm/min hasta que ocurrió la rotura en el plano diametral de la probeta.

Una vez terminado el ensayo y extraídos los datos se determinó la resistencia a la tracción (RTI) en kPa empleando la ecuación 1.

$$RTI = \frac{2000 \times P_{\max}}{\pi \times t \times D} \quad Ec. 1$$

Donde:

$P_{\max}$  = carga máxima [N]

$t$  = altura del espécimen [mm]

$D$  = diámetro del espécimen [mm]

#### 4.5. Toma de imágenes 2D y 3D

Con la toma de imágenes en 2D y 3D se buscó tener un primer acercamiento al estudio de distribución de tamaños en probetas MGM. La adquisición de imágenes 2D y 3D se realizó en tres fases. Para las dos primeras fases se utilizó una cámara de 20.1 mega pixeles y para la fase final se hizo uso de un Kinect de Xbox 360 (Kipman, 2010). La primera fase se llevó a cabo antes de ejecutar el ensayo de tracción indirecta y se tomaron dos imágenes correspondientes a las vistas superior y frontal de cada probeta; para ello, se ubicó la cámara a una distancia de 16 cm de la probeta, se colocó un fondo negro, y se iluminó la probeta con luz led blanca.

La segunda fase se efectuó una vez la probeta fue fallada por tracción indirecta y se tomaron dos fotografías (una para cada superficie de falla); para ello se ubicó la cámara a una distancia de 16 cm de la probeta, se colocó un fondo negro, y se iluminó la muestra con luz led blanca.

La tercera fase correspondió a la toma de imágenes 3D de las dos superficies de falla de la probeta. Para ello se utilizó un Kinect Xbox 360 controlado por el software SDK versión 1.8 (Redmon, 2011) ubicado a una distancia de 68 cm de la probeta.

Las imágenes tomadas se muestran en el N, y su análisis se encuentra fuera del alcance de este proyecto.

#### **4.6. Medición de succión total**

Con este ensayo se determinó la succión total para cada una de las probetas de MGMs; para ello se tomó como referencia la norma de ensayo INV E-159-13 (INVIAS, 2013). Inicialmente, se secó el papel de filtro en un horno a 110 °C durante 16-24 horas para posteriormente almacenarlo en una bolsa hermética hasta la ejecución del ensayo, esto con el fin de garantizar una humedad inicial del 0 %.

Se procedió a extraer una muestra alterada de 300 g aproximadamente del material recolectado del ensayo de tracción indirecta y se colocó en un recipiente hermético; sobre esta muestra 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 un papel de filtro e inmediatamente se colocó sobre el disco acrílico perforado y posteriormente se colocó un disco acrílico sin perforar. Seguido a esto se cerró el recipiente y se guardó en una cava durante siete días para evitar variaciones externas de temperatura y humedad.

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 extrajo el papel de filtro, se secó al horno a 110°C durante dos horas, se volvió a pesar dentro de la bolsa hermética ( $M_2$ ), se sacó el papel de filtro de la bolsa hermética y se determinó la masa final de esta ( $T_h$ ). Finalmente se realizó el análisis de los datos anteriores mediante las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 las cuales fueron tomadas de la norma ASTM D5298 (ASTM, 2016).

$$M_f = M_2 - T_h \quad \text{Ec. 2}$$

$$M_w = M_1 - M_2 + T_h - T_c \quad \text{Ec. 3}$$

$$w_f = \frac{M_w}{M_f} * 100 \quad \text{Ec. 4}$$

$$h = (m \times w_f) + b \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$M_f$ = masa del papel de filtro seco, g.

$M_2$ = masa total seca, g.

$T_h$ = masa de la bolsa seca, g.

$T_{(c)}$ = masa de la bolsa fría, g.

$M_w$ = masa del agua en el papel de filtro, g.

$w_f$ = contenido de agua del papel filtro, %.

$h$ = succión, Log<sub>10</sub> kPa.

$m$ = pendiente de la curva de calibración del papel de filtro,  $\log_{10}$  kPa / % del contenido de agua.

$b$ = ordenada al origen de la curva de calibración del papel de filtro,  $\log_{10}$  kPa.

#### **4.7. Granulometría final**

Este ensayo se realizó para determinar la degradación del material debida al proceso de compactación giratoria y tracción indirecta (el mecanismo de degradación principal se atribuye al proceso de compactación). Para ello se realizó una comparación de las curvas granulométricas antes y después de ejecutar los ensayos de compactación y tracción indirecta.

Para elaborar la curva granulométrica final se usó todo el material de la probeta empleada para el ensayo de tracción indirecta, teniendo en cuenta que ya se habían extraído 300 g, aproximadamente, para la medición de succión total. Inicialmente se secó el material en un horno a 110 °C, hasta obtener masa constante; posteriormente, se lavó el material con el fin de separar los finos que permanecían adheridos a las fracciones gruesas y se secó nuevamente durante 24 horas.

Luego se seleccionaron el grupo de tamices utilizados para la granulometría de trabajo, se agregó en porciones de 3000 g y se tamizó de forma mecánica durante un periodo de cinco minutos. Una vez se terminó el tamizado, se determinó la masa de las fracciones retenidas en cada tamiz, empleando una balanza con precisión de 0.1 g.

## 5. Resultados y discusión

El análisis y discusión de resultados se basó en la comparación entre los materiales marginales MGM1 y MGM2 con el material de control (SBG\_C1), debido a que este último presenta un porcentaje de finos y un IP que se encuentran dentro del rango admisible por el INVIAS.

### 5.1. Índice de plasticidad

En la tabla 5 se presentan las cantidades de material fino usadas para obtener los índices de plasticidad deseados para cada material de estudio.

Tabla 5

*Cantidad de material de cantera, caolinita, bentonita, y triturado para mezcla de finos*

Material	Fondo [g]	%IP	Cantera		Caolinita		Bentonita		Triturado	
			%	g	%	g	%	g	%	g
MGM1	1308	8	84,5	1106					15,5	203
MGM2	1308	12	49,4	647	49,4	647	1,1	15		
SBG_C1	618	0	40	247					60	371

Los valores mostrados en la tabla 5 fueron obtenidos con base en las ecuaciones 6 y 7. La ecuación 6 se definió a partir de ensayos de límites de Atterberg para mezclas de material fino de cantera y triturado variando la cantidad de triturado para obtener un IP de 0% y 8%; mientras que la ecuación 7 se definió para mezclas de material fino de cantera, caolinita, y bentonita variando la cantidad de bentonita y dejando en proporciones iguales la cantidad de material de cantera y caolinita; esto para obtener un IP de 12%.

$$IP = -0.0013 * (\%_{\text{triturado}})^2 - 0.3147 * \%_{\text{triturado}} + 12.558 \quad \text{Ec. 6}$$

$$IP = 0.4543 * (\%_{\text{bentonita}})^2 + 0.9254 * \%_{\text{bentonita}} + 10.363 \quad \text{Ec. 7}$$

Las ecuaciones anteriormente mencionadas se tomaron a partir de las gráficas de IP versus porcentaje de triturado (figura 7) y/o porcentaje de bentonita (figura 8) según correspondía.

Finalmente, los límites de consistencia obtenidos en las mezclas de finos para los materiales MGM1 y MGM2 se presentan en la tabla 6. A partir de los resultados antes presentados se observó que estos materiales son considerados inadecuados en Colombia según el art. 320-13 del INVIAS, ya que no cumplen con los requisitos máximos de LL e IP (ver tabla 2). Sin embargo, en España la clasificación de materiales del art. 330 del PG-3 (Bustos, 2010) (ver figura 2) considera los materiales MGM1 y MGM2 como adecuados para la construcción de terraplenes.

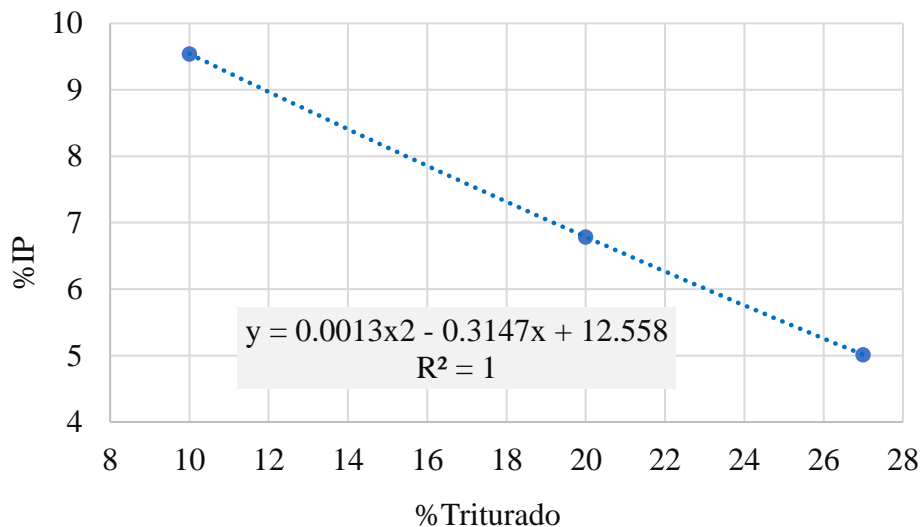


Figura 7. Índice de plasticidad vs %material triturado

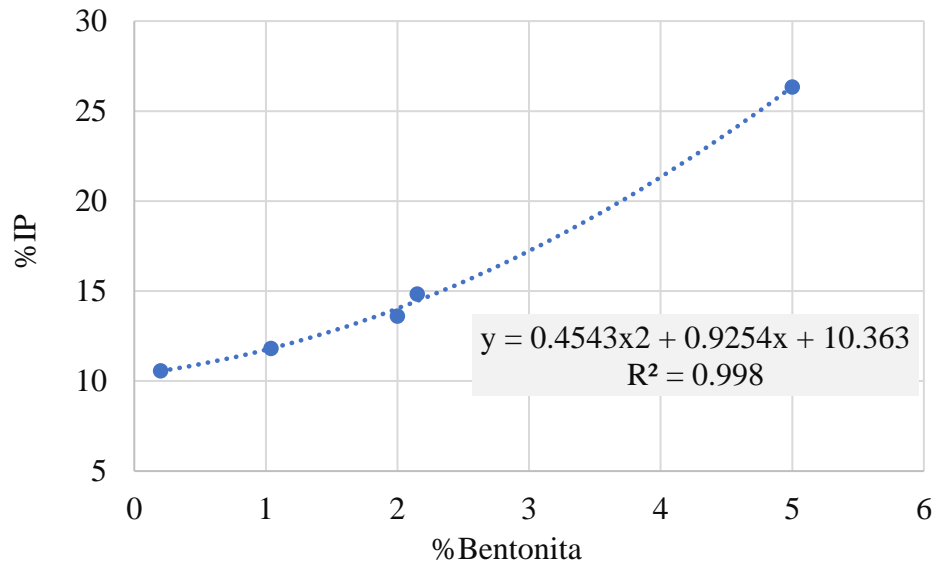


Figura 8. Índice de plasticidad vs %bentonita

Tabla 6

Comparación de límite líquido e índice de plasticidad para cada material MGM con las especificaciones INVIAS y PG-3

Material	Laboratorio		INVIAS		PG-3	
	LL [%]	IP [%]	LL [%]	IP [%]	LL [%]	IP [%]
MGM1	35,3	8	<25	<6	>30	> 4
MGM2	40,0	12				

Nota: Rangos admisibles para LL e IP tomados de INVIAS, 2013 y Bustos, 2010.

## 5.2. Compactación

En la tabla 7 se muestran los resultados de peso unitario seco máximo y humedad óptima para cada MGM y el material de control. Estos datos se extrajeron a partir de la elaboración de las

curvas de compactación de cada material (figura 9). Estas curvas se elaboraron con base en los datos arrojados por el compactador giratorio.

Tabla 7

*Peso unitario seco máximo y humedad óptima de los materiales MGM1, MGM2 y SBG\_C1*

Material	Peso unitario seco máximo [KN/m <sup>3</sup> ]	Humedad óptima [%]
MGM1	19,62	11,5
MGM2	19,80	12,2
SBG_C1	20,07	11,4

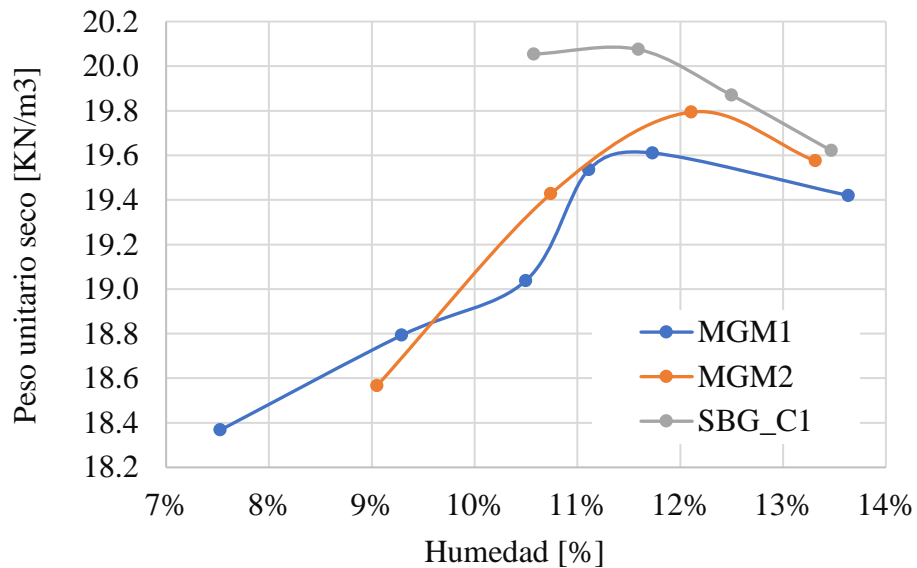


Figura 9. Curva de compactación del MGM1, MGM2 y SBG\_C1

A partir de los datos de la figura 9 se observó como el peso unitario seco de los MGMs es inferior al del material de control SBG\_C1 a lo largo de toda la curva de compactación. A su vez se evidenció como se incrementó el peso unitario seco al aumentar el IP del MGM.

En las figuras 10 y 11 se muestra el comportamiento del peso unitario seco de cada una de las probetas fabricadas con diferentes contenidos de humedad ( $w$ ) para los materiales MGM1 y MGM2 a lo largo de la compactación. Así mismo, se ubicó el locking point para las probetas de cada material.

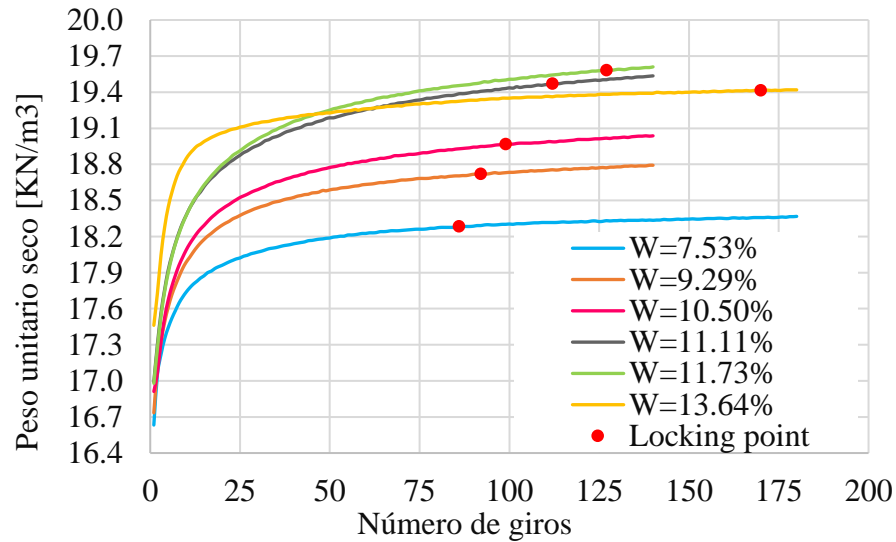


Figura 10. Peso unitario seco versus N° de giros del material MGM1

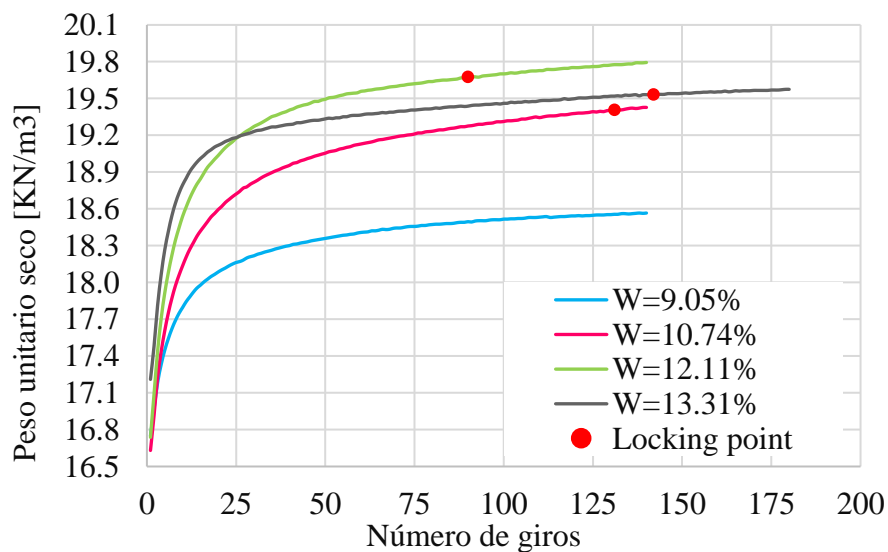


Figura 11. Peso unitario seco versus N° de giros del material MGM2

A partir de las figuras anteriores se evidenció como el peso unitario seco se incrementó a medida que aumentó la humedad de la probeta; sin embargo, las probetas con mayor humedad de cada material presentaron expulsión de agua al final del proceso de compactación.

Por otro lado, en el MGM1 (figura 10) se observó que el locking point tuvo un comportamiento creciente en cuanto al número de giros, mientras que con respecto al peso unitario seco presentó un comportamiento parabólico y cóncavo hacia abajo; a diferencia de lo que se observó en el MGM2 (figura 11) cuyos valores de locking point no presentaron un comportamiento definido, y por lo tanto se requiere un estudio más amplio en el tema.

### 5.3. Ensayo de tracción indirecta

En la figura 12 se presentan los valores de resistencia a la tracción indirecta obtenidos para las probetas usadas en la elaboración de las curvas de compactación para cada MGM junto con el material de control.

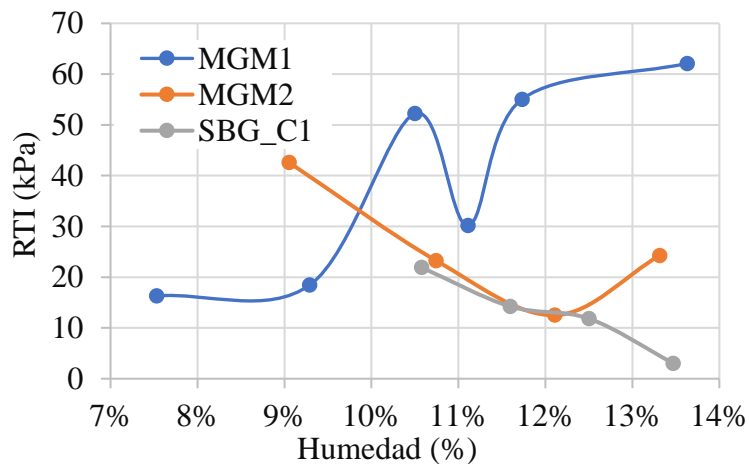


Figura 12. Resistencia a la tracción indirecta vs humedad del MGM1, MGM2 SBG\_C1

Los resultados presentados en la figura 12 fueron obtenidos a partir de la ecuación 1, donde el diámetro (D) de la probeta corresponde a 150 mm, la altura (t) se obtuvo a partir de los datos finales de la compactación y la carga máxima ( $P_{\text{máx}}$ ) se adquirió a partir de los datos que arrojó el ensayo de tracción indirecta.

Con los resultados obtenidos se consideró que el material que presentó mejor resistencia a la tracción indirecta es el material MGM1, donde presentó un valor máximo de 62.11 kPa a una humedad de 13.63% superando así el valor obtenido tanto para el material SBG\_C1 como para el MGM2.

Las figuras 13, 14 y 15 presentan las respuestas esfuerzo versus deformación para los materiales MGM1, MGM2, y el material de control SBG\_C1, respectivamente.

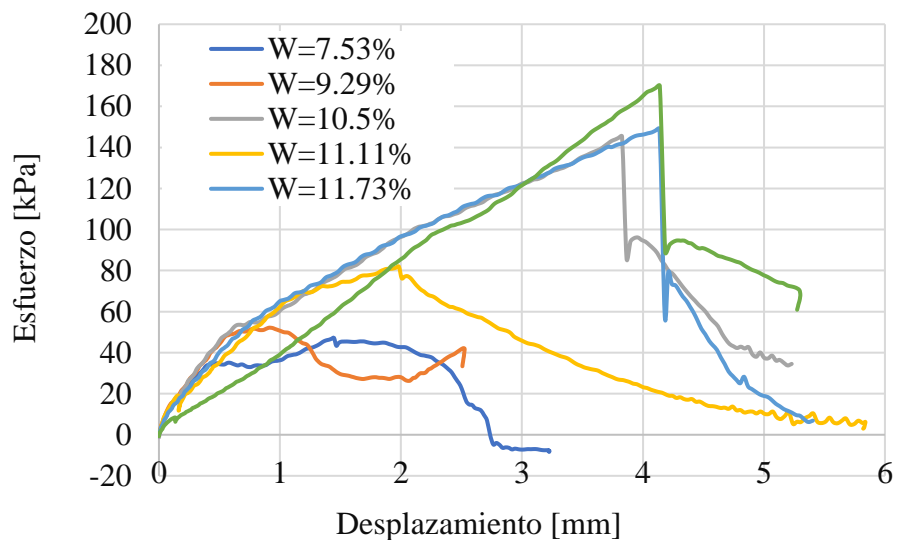


Figura 13. Curva esfuerzo vs desplazamiento ensayos de RTI para MGM1

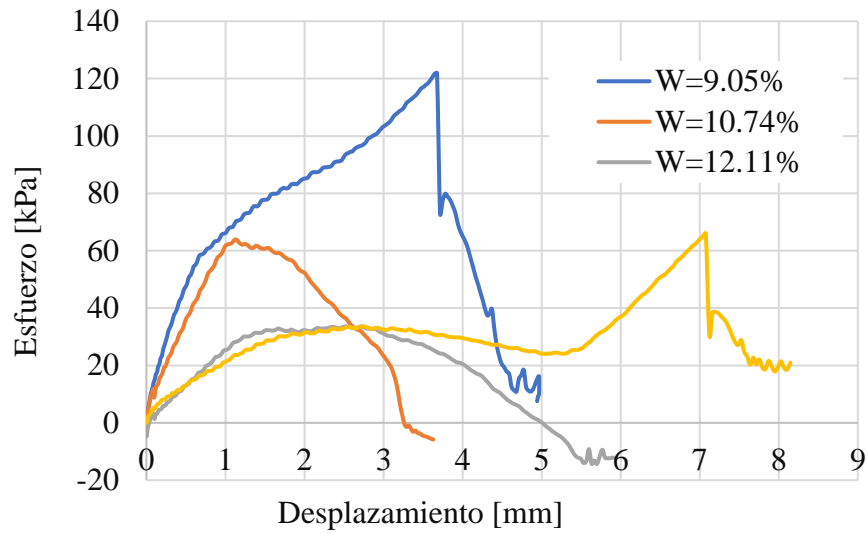


Figura 14. Curva esfuerzo vs desplazamiento ensayos de RTI para MGM2

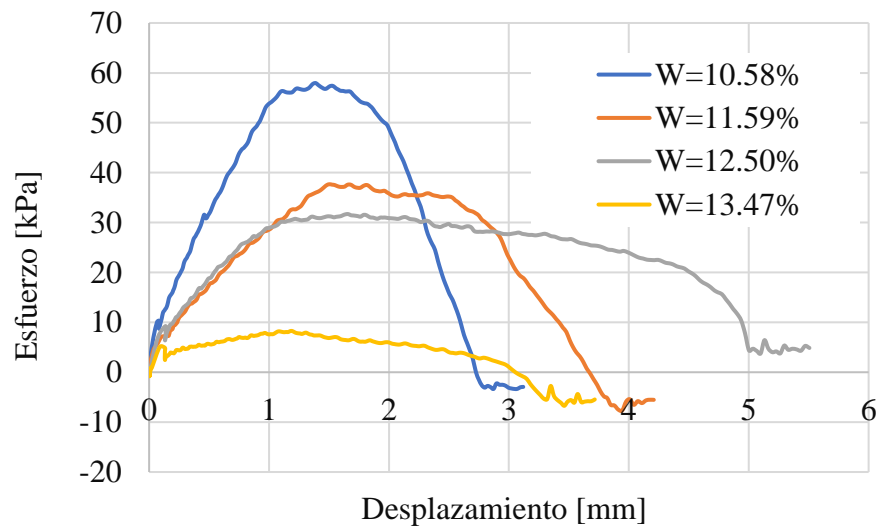


Figura 15. Curva esfuerzo vs desplazamiento ensayos de RTI para SBG\_C1

Con base en las respuestas exhibidas por los materiales no fue posible establecer una tendencia que defina el comportamiento del esfuerzo ante la variación de la humedad para los materiales de estudio. Sin embargo, se evidenció en el MGM1 que la probeta con mayor humedad (13.63%)

presenta un mejor comportamiento ya que resistió un esfuerzo de 170 kPa con un desplazamiento de 4.1 mm; caso contrario al MGM2 en el cual la probeta con menor humedad (9.05%) presentó un mejor comportamiento ya que resistió un esfuerzo de 121 kPa con un desplazamiento de 3.6 mm.

En razón de lo anterior, se deduce que los MGM1 y MGM2 tienen mayor resistencia a la tracción en comparación con el material de control SBG\_C1 ya que sus esfuerzos máximos son aproximadamente el doble que el esfuerzo presentado en el SBG\_C1.

#### **5.4. Succión**

En la figura 16 se muestran los resultados obtenidos de la medición de succión total para cada uno de los materiales de estudio. A partir de estos datos se observó en el SBG\_C1 que la probeta con humedad de 11.59% presentó el valor máximo de succión total correspondiente a 102.51 kPa (Apéndice K), lo que indica que este posee alta capacidad de retención del agua en comparación con las demás probetas de los demás materiales. A su vez se evidenció que las probetas del MGM2 presentaron altos valores de succión en comparación con el MGM 1; por lo tanto, entre los dos materiales marginales estudiados, el MGM2 es el que presenta mejor capacidad de retención del agua lo que podría conllevar a mejores respuestas mecánicas asociadas a los cambios de succión. Sin embargo, en la figura 17 se pudo evidenciar que no hubo tendencia entre el contenido de humedad del papel de filtro y el contenido de humedad de la probeta, ya que se esperaba un comportamiento proporcional entre dichas humedades.

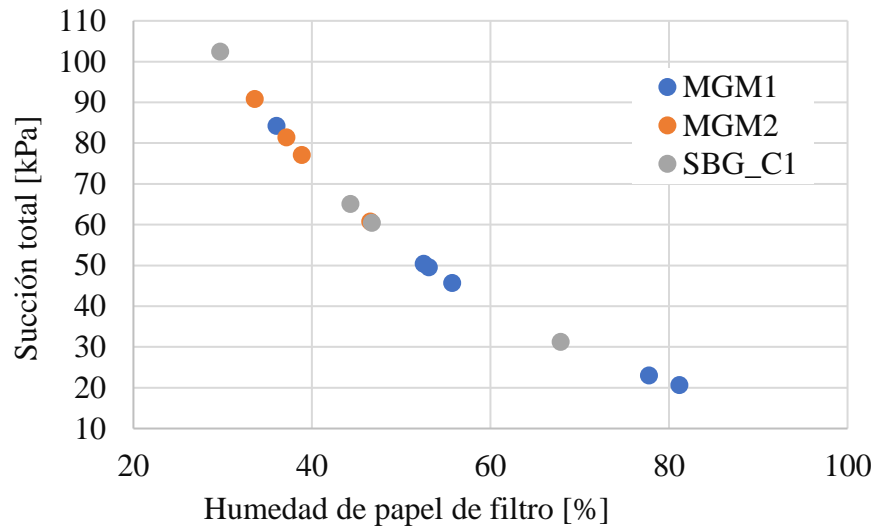


Figura 16. Relación humedad papel filtro-succión

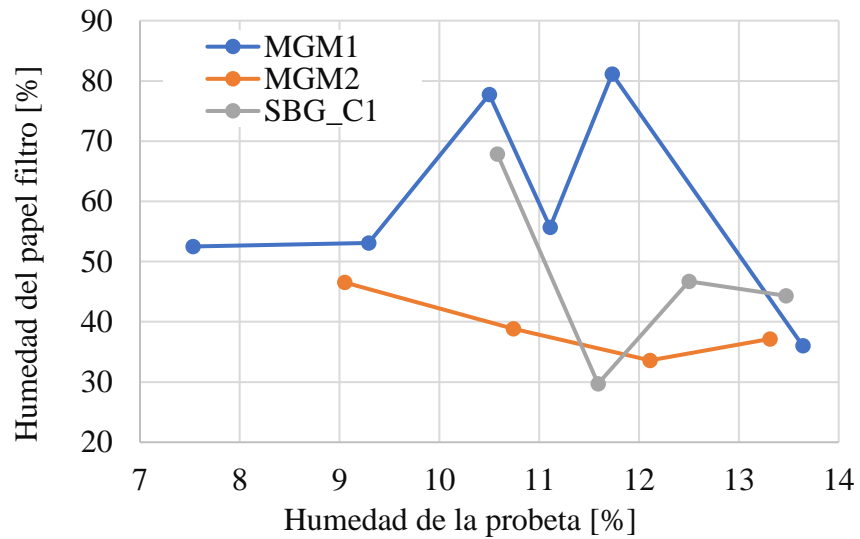


Figura 17. Humedad del papel filtro vs humedad de la probeta

5.5. Granulometría final

En las figuras 18, 19, y 20 se muestra la granulometría final obtenida después de haber sometido las probetas del MGM1, MGM2 y SBG\_C1 a los procesos de compactación y tracción indirecta.

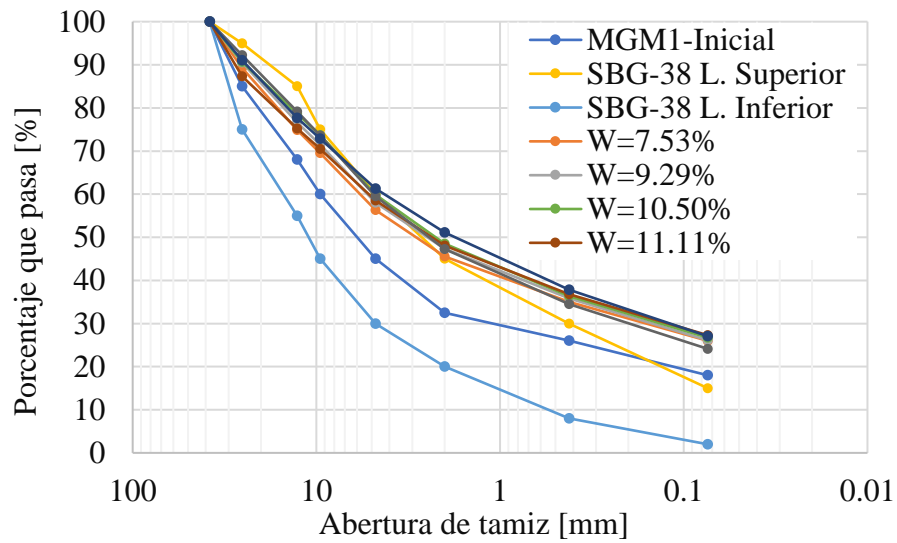


Figura 18. Granulometría final MGM1

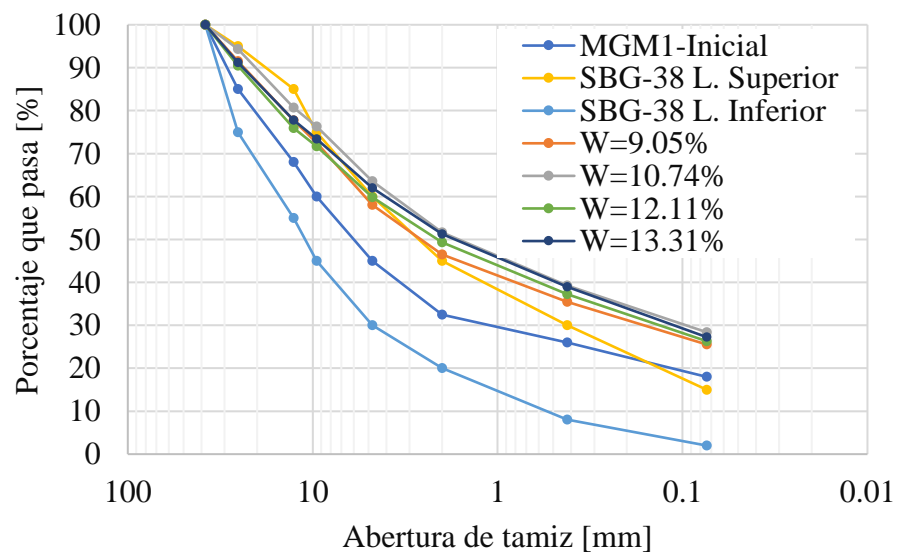


Figura 19. Granulometría final MGM2

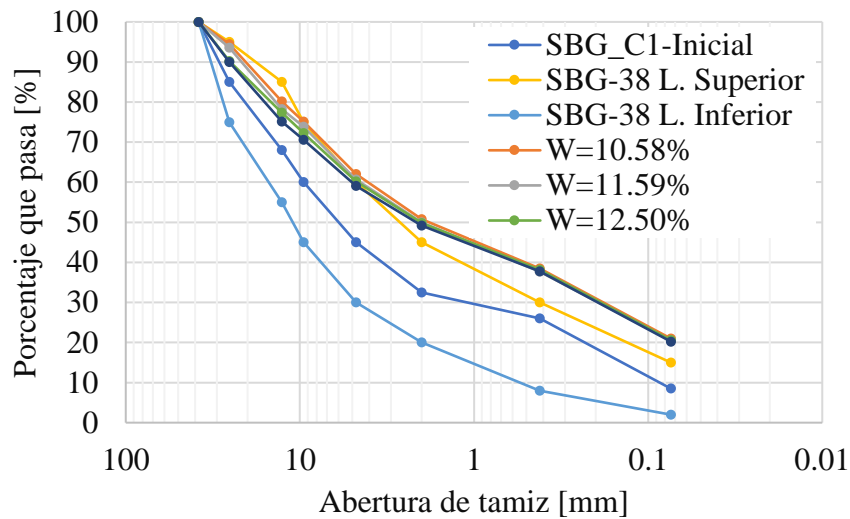


Figura 20. Granulometría final SBG\_C1

Se esperaba que los resultados presentaran variación con respecto a la granulometría de trabajo, lo cual se evidenció en las figuras 18, 19 y 20, donde la mayor variación se observó en las partículas con tamaños inferiores a 2 mm (tamiz N10). De igual forma, en la tabla 8 se logra cuantificar la variación de material en cada tamaño con respecto a la granulometría de trabajo (granulometría original).

Tabla 8

Degradación de fracciones para los materiales MGM1, MGM2 y SBG\_C1

Tamiz Pasa	Degradación [%]		
	MGM1	MGM2	SBG_C1
1"	6,3%	8,1%	8,3%
1/2"	13,7%	14,8%	13,7%
3/8"	20,5%	22,4%	21,0%
N4	32,1%	35,2%	33,6%
N10	49,7%	52,9%	52,5%
N40	41,9%	45,1%	44,8%
N200	51,1%	49,3%	137,7%

A partir de los resultados mostrados en la tabla 8 se determinó que el material que presentó una menor degradación con respecto a su granulometría de trabajo fue el MGM1, de igual forma el MGM1 tuvo menor degradación con respecto a los resultados obtenidos para el material SBG\_C1.

## 6. Conclusiones

A partir de la revisión de literatura se puede concluir que los materiales considerados inadecuados por el INVIAS para subbases granulares en cuanto a límites de consistencia son considerados adecuados por otras agencias viales tales como NCh, Austroroads, TxDOT, y FHWA, debido a que presentan un rango más amplio de aceptación. Esto trae un efecto negativo al país en cuanto a factores económicos debido a las limitaciones que establece el INVIAS para el empleo de materiales granulares en proyectos de pavimentación.

Tras el análisis de las curvas de compactación se pudo determinar que el material MGM2 presenta un mayor peso unitario seco que el material MGM1. A su vez, este no supera el peso unitario seco máximo obtenido para el material de control SBG\_C1; sin embargo, se logró evidenciar un comportamiento cercano en la rama húmeda, mientras que en la rama seca la brecha entre estos materiales es más amplia.

Con relación a los resultados expuestos del ensayo de tracción indirecta se estableció que el material MGM1 resistió un esfuerzo mayor con poca deformación en comparación con los materiales MGM2 y SBG\_C1, por lo tanto, el MGM1 tuvo mayor resistencia a la tracción

indirecta. Así mismo este material presentó menor degradación después de ser sometido a compactación y ensayo de tracción indirecta.

Como conclusión del ensayo de succión se definió que el material de estudio que presentó un mayor valor de succión total es el material MGM2, por lo tanto, este posee mejor capacidad de retención de agua.

## **7. Recomendaciones**

Para próximas investigaciones en el tema se recomienda:

Hacer la granulometría de trabajo con lavado para garantizar que la fracción fina sea exacta al momento de realizar la mezcla de fracciones para fabricar las probetas. Esto debido a que las partículas finas adheridas al material grueso hacen que el porcentaje de finos aumente.

Realizar un estudio más amplio en cuanto al análisis del comportamiento del locking point, debido a que el material MGM2 no presenta una tendencia definida con respecto a la variación de humedad.

Mejor las condiciones de aislamiento para las muestras en el ensayo de succión, garantizando que los recipientes en los que se almacenan permanezcan bien sellados para evitar variación en la humedad y a su vez se recomienda prolongar el tiempo de equilibrio de la humedad. De esta forma se espera mejorar el protocolo implementado para el ensayo de succión total.

**Referencias bibliográficas**

- Acosta , M., & Alarcón, P. (2017). *Análisis de la cantidad y el estado de las vías terciarias en Colombia y la oportunidad de la ingeniería civil para su construcción y mantenimiento* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co>
- Alvarez, A., Mora, J., & Espinosa, L. (2018). Quantification of stone-on-stone contact in permeable friction course mixtures based on image analysis. *Construction and Building Materials*, 165, pp. 462-471.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2016). *Agregados. Designation T96-02. Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. AASHTO.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *Designation D8225. Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature*. ASTM.
- Anónimo. (21 de Mayo 2022). *Especial Movilidad Y Transporte. Vías terciarias y la deuda con quienes viven en los territorios más alejados*. Semana. <https://www.semana.com/mejor-colombia/articulo/vias-terciarias-y-la-deuda-con-quienes-viven-en-los-territorios-mas-alejados/202200/>
- Austroroads. (2008). R40 Pavement base and subbase. *Roadworks specification* (pp. 18-20).
- Barrera, M., & Garnica, P. (2002). Capítulo 2: comportamiento de suelos no saturados. *Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres* (pp. 22-25). Instituto Mexicano del transporte.

- Bustos, G. (2010). Artículo 330: Terraplenes. *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes* (p.166). Liteam.
- 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), pp. 67-81.
- Cano, H., & Perucho, Á. (2015). Experiencias de utilización de materiales marginales y especiales en terraplenes viarios en España. *Ingeniería Civil*, 179, pp. 115-130.
- Cepeda, G. (2019). *Lineamientos de seguridad vial para vías terciarias en placa huella incorporando el diseño geométrico, señalización y sistemas de contención lateral* [Tesis de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. Repositorio Institucional Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://repositorio.escuelaing.edu.co>
- García, A., Aguilar, A., Córdoba, A., Sánchez, L., Campos, A., Zamora, H., & Azuara, J. (2017). Estimación de la succión total en arcilla expansiva. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, pp. 1-15.
- Garrote, E. (2006). Capítulo 2: Ensayo de tracción indirecta. *Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas* [Tesis de maestría Universidad Politécnica de Cataluña]. Repositorio Universidad Politecnica de Cataluña. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3324>
- Gelves, R. (2021). *Evaluación exploratoria de la caracterización mecánica e hidráulica de un material granular marginal a emplear en estructuras de pavimento*. [Tesis de maestría, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Universidad Industrial de Santander.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-159: determinación de la succión de un suelo usando papel de filtro. *Normas de ensayos de materiales para carretera*. INVIAS.

- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-125: determinación del límite líquido de los suelos. *Norma de ensayos de materiales para carreteras*. INVIAS.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-126: Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. *Norma de ensayos de materiales para carreteras*. INVIAS.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Artículo 320: sub-base granular. *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. INVIAS.
- Kipman, A. (2010). *Kinect para-Xbox 360*. Microsoft.
- Li, w., Wilson, D., Larkin, T., & Black, P. (2017). Permanent strain behavior of marginal granular material. *Transportation Research Record*, 2655(1), pp. 54-63.
- Liebenberg, J., & Visser, A. (2003). Stabilization and structural design of marginal materials for use in low-volume roads. *Transportation Research Record* 1819(1), pp.166-172.
- Ministerio de vivienda y urbanismo. (2018). Sección 03: bases y subbases de pavimentos. *Códigos de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación* (pp. 41-45). MINVU.
- MTOP. (2013). Sección 403: bases y subbases. *Especificaciones generales especificaciones generales para la construcción para la construcción de caminos y puentes* (pp. 340-392). Ministerio de transporte y obras públicas del Ecuador.
- Pande, P., Khandeshwar, S., Bajad, S., & Raut, s. (2019). Calibration of filter paper for measuring total soil suction. *SN Applied Sciences*, 1(7), pp. 1-7.
- 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, pp. 264-266.
- Redmon. (2011). *SDK de Kinect para-Windows*. Microsoft.

- Sandoval, R., Goolam, L., Lappe, I., Pérez N., Mittiga, E., Perucho, A., Heyer, D., Aguayo, O., Yu, Z., Raoul G., BerchE, V. & Boman, M. (2019). Review of practices using marginal and secondary material in rural and industrial areas. *World Road Association (PIARC)*, pp. 5-6.
- Texas Department of Transportation. (2014). Subgrade treatments and base. *Standard Specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets, and Bridges (p.126)*. TxDOT.
- U.S. Department of Transportation. (2014). Section 703.05: subbase, Base, and Surface Course Aggregate. *Standard Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highway Projects (p. 655)*. FHWA.

## Apéndices

### **Apéndice A. Ensayo de límite líquido y límite plástico - norma INVIAS 125 -13 y 126 -13**

El siguiente video describe el procedimiento para realizar los ensayos de límite líquido y límite plástico, tomando como referencia la norma INV E 125 -13 e INV E 126 -13.

Enlace del video: <https://youtu.be/O-2HRdkwatA>

### **Apéndice B. Protocolo de preparación de mezclas y ensayo de compactación giratoria para la generación de curvas de compactación**

El presente documento es una guía básica para la preparación de mezclas de suelo con diferentes porcentajes de índice plasticidad (IP). Así mismo, se describe la fabricación de probetas de 15 cm de diámetro y 20 cm de altura utilizando la metodología de compactación giratoria, la cual consiste en la aplicación de acciones simultáneas como la presión vertical y la acción giratoria, con un ángulo de inclinación con respecto al eje vertical, ejercidas por el equipo, asemejando los procesos constructivos en obra.

A continuación, se presenta el protocolo para la elaboración de las probetas.

## 1. Granulometría

### 1.1. Marco de referencia

Se tamiza el material proveniente de la cantera, tomando como referencia la granulometría que establece el INVIAS para una subbase SBG-38; al trabajar con la granulometría fina, es decir SBG-38, se debe separar el material en los tamices de 1", ½", 3/8", #4, #10, #40, #200, y pasa tamiz #200.

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)								
	50.0 2"	37.5 1 ½"	25.0 1"	12.5 1/2"	9.5 3/8"	4.75 No. 4	2.00 No. 10	0.425 No. 40	0.075 No. 200
	% PASA								
SBG-50	100	70-95	60-90	45-75	40-70	25-55	15-40	6-25	2-15
SBG-38	-	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%	

Figura B1. Franja granulométrica del material de subbase granular

Fuente: tomado de INVIAS, 2013, Art. 320 -3

### 1.2. Determinación de la granulometría de diseño

➤ Se trabaja con una curva granulométrica sensiblemente paralela a la curva de granulometría promedio de la especificación INVIAS para SBG-38.

➤ Se determina la masa requerida de cada fracción (1", ½", 3/8", #4, #10, #40, #200, y fondo). Para ello se debe tener en cuenta la altura, el diámetro, y la densidad seca objetivo de la probeta; estos datos se deben ingresar en la hoja de cálculo nombrada como: GRANULOMETRIA\_MGM.xlsx. (ver figura B2)

Para ejemplificar el proceso se harán los cálculos correspondientes al material MGM1\_C1.

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						

Datos a ingresar

Metodo de Compactación	DENSIDAD SECA OBJETIVO (t/m3)			
	Muestra de control	% Finos de estudio		
	8.5%	18%	21%	24%
Giratorio		2		

Probeta		
Metodo de compactación	Giratorio	
Parametro	Valor	Unidad
Altura	0.2	m
Diámetro	0.15	m
Área	0.0177	m <sup>2</sup>
Volumen	0.00353	m <sup>3</sup>
Masa	7269	g

AJUSTAR CELDA D19 SEGÚN EL MATERIAL A ENSAYAR

Figura B2. Datos a ingresar en la hoja de cálculo de granulometría

*Nota:* Cabe aclarar que, para fabricar la probeta con los datos óptimos obtenidos de la curva de compactación, es necesario ajustar la densidad seca objetivo (fila 9 de la hoja de cálculo) con la densidad seca máxima obtenida de dicha curva, este valor depende del porcentaje de finos de estudio.

Para determinar la masa seca inicial ( $m_o$ ), la hoja de cálculo utiliza la ecuación de densidad ( $\rho$ ), donde esta se define como la relación entre la masa y el volumen teórico (V) de la probeta, como se muestra a continuación en la ecuación 1:

$$\rho = \frac{m_o}{V} \quad \text{Ec. 1}$$

$$m_o = \rho * V$$

$$m_o = 2 \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] * 3534.29 [\text{cm}^3]$$

$$m_o = 7069 [\text{g}]$$

Finalmente, a la masa seca inicial ( $m_o$ ) se le debe agregar la masa necesaria para realizar las mediciones de humedad, las cuales se deben efectuar justo antes de la compactación. Para este fin se consideran 200 g como un valor representativo para dicha medición, por lo tanto, se tiene que.

$$m_{\text{seca}} = 7069[\text{g}] + 200 [\text{g}]$$

$$m_{\text{seca}} = 7269 [\text{g}]$$

A partir de los cálculos anteriores, en el mismo archivo de Excel se obtienen las cantidades de masa seca necesarias por fracción para fabricar una probeta, esto se puede ver en la figura B3.

18%	TAMIZ										
TIPO DE GRANULOMETRÍA	1" 1/2"	1"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	Fondo	Total	
	% PASA										
	100	85	68	60	45.00	32.50	26.00	18.00	0		
	% RETENIDO ACUMULADO										
SBG-38-18% finos	0	15.00	32.00	40.00	55.00	67.50	74.00	82.00	100.00		
	% RETENIDO										
	0.0	15.0	17.0	8.0	15.0	12.5	6.5	8.0	18.0	100.00	
Masa (g)	0	1090	1236	581	1090	909	472	581	1308	7269	

Figura B3. Tabla de masa seca necesaria para una probeta

### 1.3. Determinación de la fracción pasa No. 200 (fondo)

En esta etapa se presenta la metodología para realizar mezclas de material pasa tamiz N°. 200 (fondo) con el fin de obtener variaciones en el índice de plasticidad (IP) (i.e., 4%, 8%, 12%, 15%). Para llevar a cabo este proceso se debe tener en cuenta la cantidad necesaria de fondo (ver figura B3), la cual debe ser distribuida entre los diferentes materiales finos (caolinita, bentonita, cantera, y/o material triturado).

A continuación, se muestra la ecuación para alcanzar el índice de plasticidad de 4% y 8%, teniendo en cuenta que esta mezcla se realiza con material fino (pasa N°200) de cantera y triturado, así mismo se presenta la ecuación para alcanzar los índices de plasticidad de 12% y 15% cuya mezcla se constituye de material fino (pasa N°200) de cantera, bentonita y caolinita.

#### 1.3.1. Índice de plasticidad de 0% y 8%

➤ Para alcanzar este índice de plasticidad es necesario realizar mínimo tres ensayos de límite líquido (INV 125-13) y límite plástico (INV 126-13). La mezcla a ensayar se realiza con material pasa N°200 de cantera y material pasa N°200 de triturado; en cada ensayo se debe variar el porcentaje de material triturado para analizar el comportamiento del IP ante esta variación.

*Nota:* teniendo en cuenta que para la determinación del límite líquido se requieren tres mediciones con aumento de humedad en la mezcla, es necesario dejar un tiempo de curado de 40

minutos entre cada medición con el fin de que la humedad en la mezcla sea homogénea y se estabilice.

➤ Una vez realizados los ensayos, se procede a graficar el IP versus porcentaje de material triturado, como se ejemplifica en la figura B4, a esta gráfica se le asocia la línea de tendencia que más se ajuste con el fin de obtener la ecuación 2, la cual permite obtener diferentes IPs en función de la cantidad de material triturado.

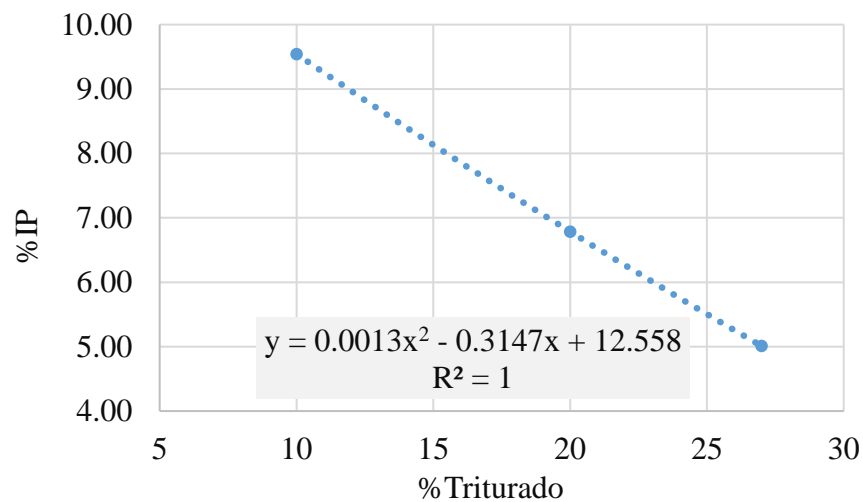


Figura B4. Índice de plasticidad vs % de material triturado

$$IP = -0.0013 * (\%_{\text{triturado}})^2 - 0.3147 * (\%_{\text{triturado}}) + 12.558 \quad \text{Ec. 2}$$

A continuación, se ejemplifica el uso de la ecuación 2 para alcanzar un IP de 8%, para ello se sustituye este porcentaje en la ecuación y se despeja el porcentaje de material fino triturado.

$$0.08 * 100 = -0.0013 * (\%_{\text{triturado}})^2 - 0.3147 * (\%_{\text{triturado}}) + 12.558$$

$$\%_{\text{triturado}} = 15.5 \%$$

Debido a que la mezcla de finos se compone solo de material de cantera y triturado, el 84.5 % de material restante corresponde a finos de cantera. A continuación, se presentan las masas de cada material correspondientes a la fracción pasa tamiz No. 200 (fondo) para la fabricación de una probeta.

Tabla B1.

*Masas correspondientes de cada material para alcanzar IP de 0% y 8%*

Fondo [g]	IP		Cantera	Triturado	
	[%]	[%]	[g]	[%]	[g]
1308	0	40	523	60	785
	8	84.5	1105	15.5	203

### 1.3.2. Índices de plasticidad 12% y 15%

- Para alcanzar estos índices de plasticidad es necesario realizar mínimo tres ensayos de límite líquido (INV 125-13) y límite plástico (INV 126-13). La mezcla a ensayar se realiza con material pasa N°200 de cantera, material pasa N°200 de caolinita y material pasa N°200 de bentonita; en cada ensayo se debe variar el porcentaje de bentonita para analizar el comportamiento del IP ante esta variación.

*Nota:* teniendo en cuenta que para la determinación del límite líquido se requieren tres mediciones con aumento de humedad en la mezcla, es necesario dejar un tiempo de curado de 60 minutos entre cada medición, debido a que la bentonita es altamente plástica y absorbe mucha agua en su estructura interna.

➤ Una vez realizados los ensayos, se procede a graficar el IP versus porcentaje de bentonita (ver gráfica 2), a esta gráfica se le asocia la línea de tendencia que más se ajuste con el fin de obtener la ecuación número 3, la cual permite obtener diferentes IPs en función de la cantidad de bentonita.

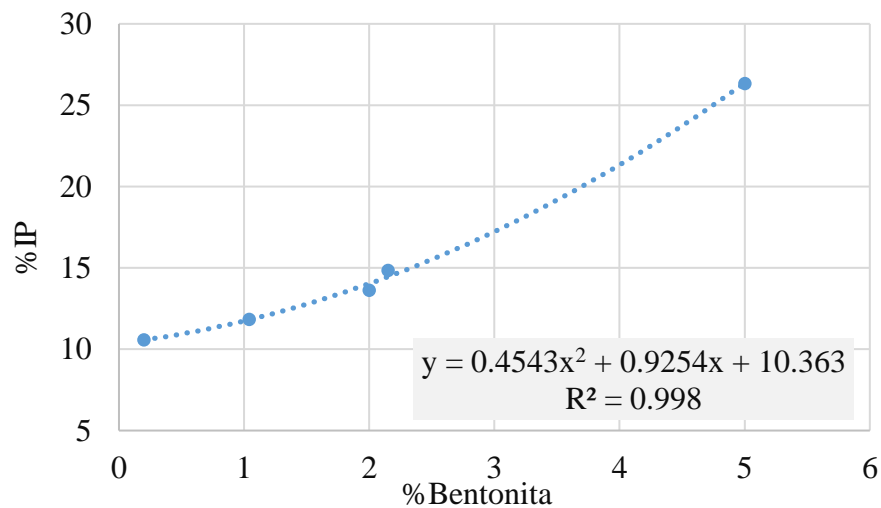


Figura B5. Índice de plasticidad vs % de bentonita

$$IP = 0.4543 * [\%_{bentonita}]^2 + 0.9254 * \%_{bentonita} + 10.363$$

Ec. 3

A continuación, se ejemplifica el uso de la ecuación 3 para alcanzar un IP de 12%, para ello se sustituye este porcentaje en la ecuación y se despeja el porcentaje de material fino triturado.

$$0.12 * 100 = 0.4543 * [\%_{\text{bentonita}}]^2 + 0.9254 * \%_{\text{bentonita}} + 10.363$$

$$\%_{\text{bentonita}} = 1.14\%$$

➤ Debido a que la mezcla de finos se compone de material de cantera, bentonita y caolinita, por lo tanto, el 98.86% de material restante corresponde a finos de cantera y caolinita. Teniendo en cuenta que estos dos materiales presentan aproximadamente el mismo IP, se deben agregar en la misma proporción como se muestra a continuación:

$$100\% = \%_{\text{bentonita}} + \%_{\text{cantera}} + \%_{\text{caolinita}}$$

$$100\% = 1.14\% + 49.43\% + 49.43\%$$

➤ A continuación, se presentan las masas de cada material (cantera, caolinita y bentonita) correspondientes para la fabricación de una probeta.

Tabla B2.

*Masas correspondientes de cada material para alcanzar IP de 12% y 15%*

Fondo [g]	IP	Bentonita		Cantera		Caolinita	
	[%]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]
1308	12	1.14	15	49.43	646.5	49.43	646.5
	15	2.34	31	48.83	638.7	48.83	638.7

## 2. Secado del material

➤ Una vez obtenida la granulometría de diseño, se procede a seleccionar el material necesario para la elaboración de las probetas deseadas, el cual se debe depositar en bandejas de aluminio, como se muestra a continuación.



*Figura B6.* Material necesario para la elaboración de cuatro probetas

➤ Posteriormente, el material debe secarse al horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 18 a 24 horas como se observa en la figura B7, de tal forma que el material tenga una humedad inicial de 0%. Esto con el fin de calcular la masa de agua que se debe adicionar a la mezcla para obtener la humedad deseada partiendo de una humedad del 0%.



*Figura B7.* Colocación del material dentro del horno

### 3. Preparación de la mezcla

#### 3.1. Pesaje del material seco

- Una vez se ha cumplido el tiempo de secado del material, se saca del horno y se deja reposar durante diez minutos.
  
- Se pesa la cantidad de material necesario de cada fracción correspondiente a la fabricación de una probeta, estas cantidades fueron las obtenidas de la hoja de cálculo GRANULOMETRIA\_MGM.xlsx., de igual forma estos resultados se pueden evidenciar en la figura B3.
  
- Una vez realizado el paso anterior, se debe almacenar el material en bolsas herméticas (dos) de tal forma que los cierres queden a 180°, esto con el fin de que se conserve la humedad del 0%; este material se deja en las bolsas hasta que este sea llevado a la mezcladora.

*Nota:* este proceso se debe realizar para cada una de las probetas que se deseen hacer.

#### 3.2. Determinación de la cantidad de agua a adicionar a la masa seca

A partir del paso anterior, se debe calcular la cantidad de agua que se le debe agregar a cada probeta teniendo en cuenta que se van a realizar cuatro probetas con diferentes humedades y así elaborar la curva de compactación.

La ecuación 4 permite determinar la masa de agua ( $m_{\text{agua}}$ ), para ello es necesario tener en cuenta que la masa seca ( $m_{\text{seca}}$ ) a tomar como referencia es la calculada en la sección 1.2.

A continuación, se ejemplifica el uso de la ecuación 4 empleando un valor de humedad del 7%.

$$m_{\text{agua}} = m_{\text{seca}} * \% \text{humedad} \quad \text{Ec. 4}$$

$$m_{\text{agua}} = 7269 \text{ [g]} * 0.07$$

$$m_{\text{agua}} = 509 \text{ [g]}$$

Finalmente, la masa húmeda ( $m_{\text{húmeda}}$ ) es igual a la suma entre la masa seca ( $m_{\text{seca}}$ ) y la masa de agua ( $m_{\text{agua}}$ ), cómo se evidencia en la ecuación 5.

$$m_{\text{húmeda}} = m_{\text{seca}} + m_{\text{agua}} \quad \text{Ec. 5}$$

$$m_{\text{húmeda}} = 7269 \text{ [g]} + 509 \text{ [g]}$$

$$m_{\text{húmeda}} = 7778 \text{ [g]}$$

### 3.3. Mezclado del material

➤ Se mezcla el material seleccionado en el paso 3.1 en una mezcladora mecánica durante 1 minuto verificando que la mezcla esté homogénea.

➤ Posteriormente, con un aspersor se va agregando la cantidad de agua determinada en el paso 3.2. Este proceso se realiza mientras se continúa el mezclado durante 5 minutos, cabe aclarar que esta adición se hace de forma uniforme sobre el área superficial del suelo expuesto en la mezcladora.



*Figura B8.* Mezclado del material en la mezcladora mecánica

### **3.4. Almacenamiento de la mezcla suelo – agua**

➤ Una vez obtenida la mezcla suelo-agua, se debe guardar en dos bolsas herméticas, la segunda bolsa debe tener el cierre en la parte opuesta a 180 grados de la primera. El uso de guantes latex o de un material que no absorba humedad es indispensable con el fin de retirar el material que queda adherido en el recipiente y la pala de la mezcladora.

*Nota:* es indispensable que el balde de la mezcladora quede totalmente limpio, evitando pérdida de material, así mismo si se desea iniciar el mezclado de una nueva probeta se debe verificar que el balde este completamente limpio y seco para no afectar la humedad deseada.

➤ Se debe marcar la bolsa exterior con la nomenclatura de la probeta y se dejan curar las mezclas de 18 a 24 h con el fin de homogeneizar la humedad.



*Figura B9.* Almacenamiento de la mezcla suelo -agua en bolsas herméticas con cierres a 180 grados

#### 4. Medición de la humedad

Pasado el tiempo de curado se procede a extraer una porción de aproximadamente 200 gramos del material húmedo (determinado con la ecuación 5) para determinar su humedad. Para este fin, esta masa es llevada al horno a 110° durante 12 a 16 h [2]; después de este tiempo se saca, se pesan y mediante la ecuación 4 se determina el porcentaje de humedad.

$$\%_{\text{humedad}} = \frac{\text{peso humedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} * 100 \quad \text{Ec. 6}$$



*Figura B10.* Muestra medición de humedad

## 5. Compactación de las probetas

### 5.1. Encender el equipo:

- Se enciende el computador.
  
- Se da energía al compactador giratorio con la ayuda del botón OFF/ON que se encuentra en la parte superior del espaldar de la máquina.
  
- Se verifica que el botón de emergencia no este oprimido (el botón se encuentra en la parte superior de la cara lateral derecha de la máquina).
  
- Se da ingreso de aire al sistema abriendo la llave de paso que se encuentra en la pared, justamente detrás de la máquina.

- Se verifica que el pistón que extrae la muestra suba y baje correctamente.
- Se verifica que la perilla ubicada en la parte inferior de la cara derecha del equipo este marcando 150 mm.



*Figura B11.* Botón OFF/ON, botón de emergencia, Perilla (150mm)

## 5.2. Preparación del molde

- Limpiar el molde.
- Aplicar una película fina de separol con una brocha sobre las paredes del molde de tal manera que no haya escurrimiento; este aceite funciona como líquido lubricante para facilitar la extracción de la probeta.
- Introducir la base (platina circular metálica que se soporta sobre el diente interno que posee el molde) y sobre esta se coloca un recorte circular de hoja reciclada que facilite la extracción del espécimen.

### 5.3. Masa final a colocar en el molde

➤ Se debe pesar la masa húmeda final que se va a colocar en el molde, esta corresponde a la masa húmeda (determinada con la ecuación 5) menos los 200 gramos extraídos para la medición de humedad, esto con el fin de corroborar el valor de masa que va ingresar al compactador y que se debe registrar en el software.

➤ Se divide la masa húmeda final en tres partes iguales y se agrega por capas al molde del compactador. Al agregar la primera capa es necesario colocar una subcapa de un centímetro de espesor, esta no debe tener partículas de la fracción gruesa con el fin de evitar segregaciones en la cara inferior de la probeta.

*Nota:* durante la aplicación de las capas se debe evitar que las partículas gruesas queden contra la pared del molde.

➤ Después de cada capa se deben dar cinco golpes con la espátula de 2" de ancho de forma distribuida sobre la superficie; la última capa debe quedar totalmente plana para que la presión del pistón sea aplicada correctamente.

➤ Finalmente se coloca otro recorte circular de papel reciclado y sobre él se coloca la platina circular metálica.

*Nota:* se debe tener en cuenta que el molde tiene una altura de 30 cm, pero la altura final de la muestra variará para cada material acorde al factor de compactación del mismo, razón por la cual se recomienda realizar probetas de prueba para determinar la altura final que se puede obtener. La altura de referencia es 20 cm.



*Figura B12.* Molde 30 cm de altura y nivelación de la superficie de la probeta

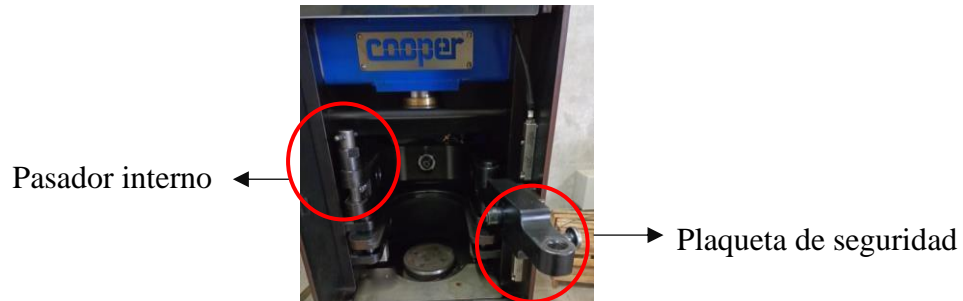
#### 5.4. Montaje de la probeta

➤ Lo primero es abrir la cámara de compactación y para esto se gira la perilla de seguridad y se baja la placa inferior, para posteriormente subir el vidrio de seguridad.



*Figura B13.* Perilla de seguridad, placa inferior, vidrio de seguridad

- Una vez abierta la cámara se sube el pasador interno y se hala la plaqueta de seguridad hacia afuera.



*Figura B14.* Plaqueta de seguridad hacia afuera

- Introducir el molde con el material y cerrar la plaqueta de seguridad, verificando que el pasador interno este completamente ajustado.



*Figura B15.* Molde dentro de la cámara de compactación

- Posteriormente se baja el vidrio de seguridad y se sube la placa inferior asegurando y dejando listo para comenzar la compactación.



Figura B16. Cámara de compactación cerrada

### 5.5. Ejecución del software

➤ Abrir el software “Gyratory Compactor” y dar clic en la opción “System Check Panel” el cual muestra una nueva ventana donde se debe verificar que en la opción “Mould Diameter” se encuentre en 150 mm que indica el diámetro deseado de la probeta en este proyecto.

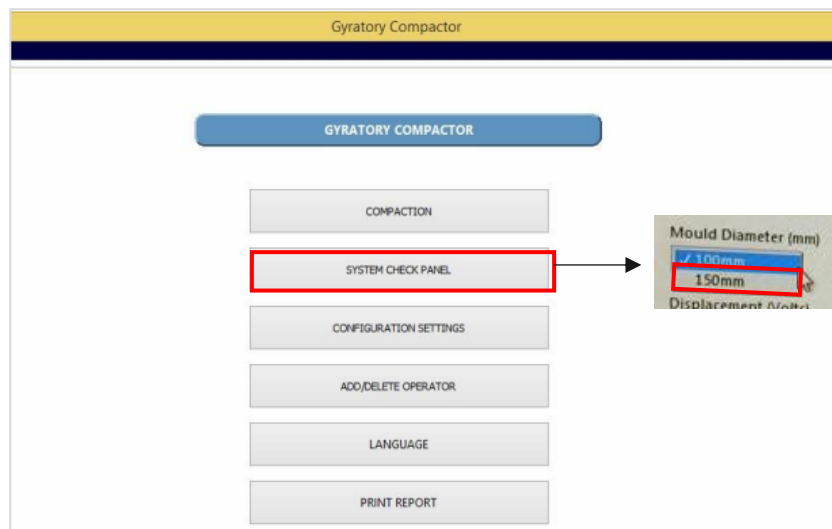
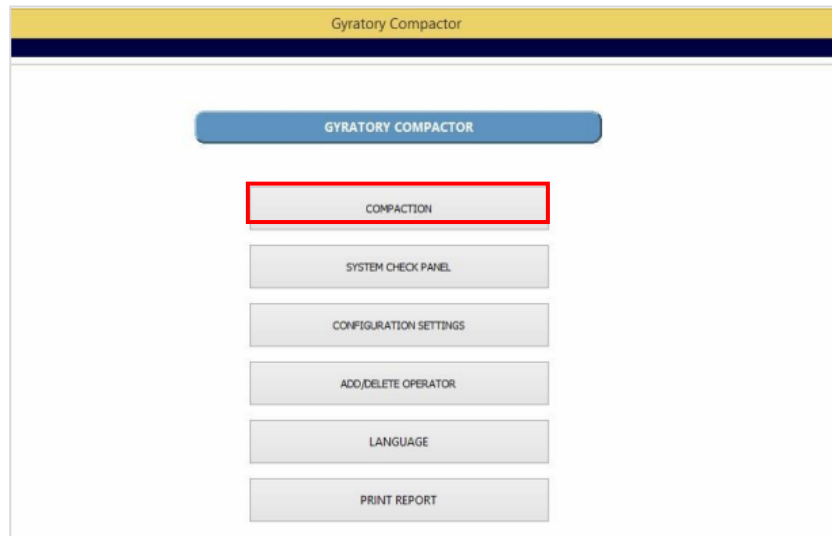


Figura B17. Software Gyratory Compactor

Nota: tomado de OPERATING INSTRUCTIONS Superpave Gyratory Compactor 45-6750

➤ Una vez verificado el diámetro se regresa al menú principal y se selecciona la opción “Compaction” el cual abre una nueva ventana para completar los parámetros de compactación.



*Figura B18.* Software Giratory Compactor

*Nota:* tomado de OPERATING INSTRUCTIONS Superpave Gyrotory Compactor 45-6750

➤ A continuación, se indica como se debe completar cada parámetro y su incidencia en la compactación.

- **Compaction type:** este parámetro hace referencia a la norma con la cual se desea trabajar; para este proyecto se selecciona la norma EN 12697-31 [1].

- **Data file path:** en esta opción se elige la ubicación del archivo de datos de la compactación.

- **Specimen reference:** nombre del archivo (igual al código de identificación de la probeta).
- **Mould diameter:** seleccionar el diámetro deseado del molde; para este proyecto se selecciona 150 mm.
- **Target number of gyrations:** se inserta el número de giros deseados; para fabricar probetas para la curva de compactación se aconseja utilizar los siguientes números de giros de acuerdo a los porcentajes de humedad:

Humedad 1 (7%): 180 giros

Humedad 2 (9%): 140 giros

Humedad 3 (11%): 140 giros

Humedad 4 (13%): 180 giros

Cabe resaltar que para este estudio se decidió establecer el número de giros como criterio de detención de la compactación.

- **Target Height:** si se ingresa un valor aquí, la compactación finalizará si se alcanza la altura objetivo (incluso si no se alcanza el número de giros establecido); para este proyecto se inserta el valor de 0 debido a que no se desea que la compactación se detenga por este criterio.
- **Mass of material (kg):** cantidad de material que se depositó en el molde, correspondiente al determinado en el paso 5.3. Este parámetro lo utilizará el software para calcular la densidad.

- **Mould spacer height (mm):** en esta casilla se debe colocar 0.
- **Target mixture density (kg/m<sup>3</sup>):** en esta casilla se coloca la densidad deseada; para este proyecto se ingresa un valor mayor al esperado al finalizar la compactación, esto con el fin de que la compactación no se detenga por este criterio.

Figura B19. Parámetros de compactación

Nota: tomado de OPERATING INSTRUCTIONS Superpave Gyratory Compactor 45-6750

➤ Una vez verificado estos parámetros se da clic en “Next”. Posteriormente el software abre una ventana nueva donde se debe seleccionar “comenzar compactación”, enseguida se oprime el botón circular que se encuentra en la parte frontal de la maquina justo al lado del manómetro, el botón se encuentra marcando color rojo y tan pronto se oprima cambiará a color verde y la compactación iniciará automáticamente mostrando en el PC las gráficas de altura vs giros y densidad vs giros.

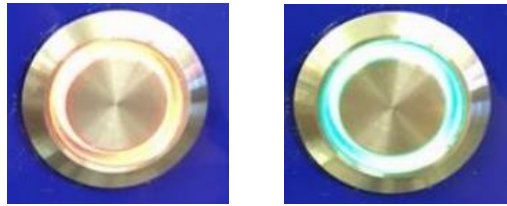


Figura B20. Botón de inicio para la compactación

Nota: tomada de OPERATING INSTRUCTIONS Superpave Gyrotory Compactor 45-6750

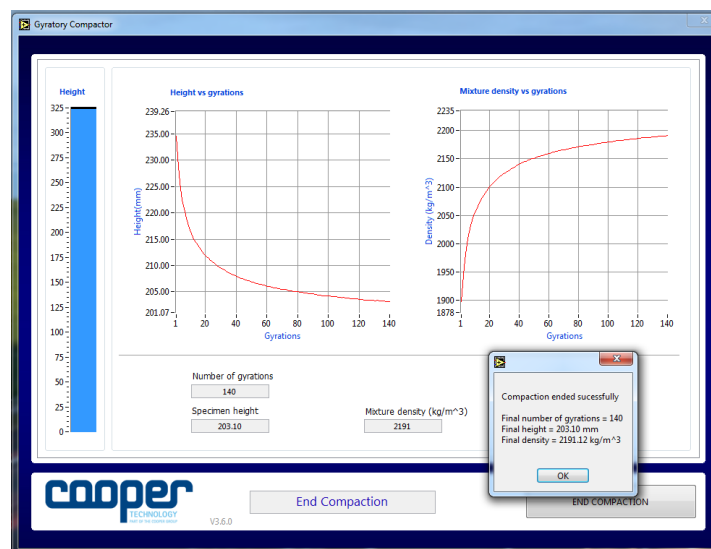


Figura B21. Gráficas de altura vs giros y densidad vs giros

## 5.6. Extracción de la probeta

➤ Una vez finalizada la compactación se cierra el software, se abre la cámara de compactación, para ello se gira la perilla de seguridad, se baja la placa inferior y se sube el vidrio de seguridad. Posteriormente, se sube el pasador interno y se hala la plaqueta de seguridad hacia afuera.

➤ Deslizar el molde sobre el ariete de extracción, asegurando que se asiente debajo del borde de retención. Posteriormente, se gira la perilla verde que se encuentra en la parte frontal del ariete de extracción y automáticamente saldrá la probeta.



*Figura B22.* Extracción de probeta

➤ Una vez haya salido la probeta se procede a retirarla y pesarla con el fin de tomar la masa húmeda final, la cual se usará en cálculos posteriores.

➤ Posteriormente, la probeta se envuelve en papel vinipel con el fin de no perder material fino y conservar la humedad. Así mismo, se debe marcar y almacenar la probeta en un cava para utilizarla en estudios posteriores.

*Nota:* Este paso se hace únicamente si no es posible realizar inmediatamente el ensayo de resistencia a la tracción indirecta y toma de imágenes.



Figura B23. Almacenamiento de las probetas en la cava

➤ Se vuelve a accionar la perilla del gato para bajarlo y posteriormente retirar y limpiar el molde.

### 5.7. Extracción y tratamiento de datos

➤ Una vez terminada la compactación, los datos quedan almacenados como formato de texto en la carpeta que se seleccionó en el paso 5.5, estos datos se deben extraer en una USB para el posterior tratamiento.

```

MGM1_18_8_C1: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Gyratory compaction software V3.6.0

EN 12697-31 (Specimen preparation)

Time & date: 9/4/2013 - 6:04 AM
Mixture identification:
Mould diameter (mm): 150
Mass Of material (g): 7556.00
Mould spacer height (mm) 0.0
Speed (Rev/min) 30.00
Compaction internal angle (Degrees) 1.16
Compaction Stress (KPa) 600.00

Gyrations Height (mm) Density (kg/m^3)
1 239.076 1788.478
2 233.178 1833.713

```

Figura 24. Datos extraídos del compactador giratorio en formato txt

- A partir de los datos de compactación se pueden generar las curvas densidad seca versus giros y la curva de compactación (densidad seca versus humedad).

### **Apéndice C. Proceso de compactación de probetas suelos mediante compactador giratorio Superpave.**

El siguiente video describe el procedimiento a realizar para compactar probetas de suelo mediante el uso de compactador giratorio Superpave, el cual se encuentra en el laboratorio de caracterización de materiales de construcción de la Universidad Industrial de Santander.

Enlace del video: <https://youtu.be/o0LI3RHqJUU>

### **Apéndice D. Granulometría de trabajo**

Tabla D1

*Parámetros para el cálculo de masa de las probetas de los materiales MGM1, MGM2 y SBG\_C1*

<b>Probeta</b>		
<b>Método de compactación</b>	Giratorio	
<b>Parámetro</b>	Valor	Unidad
Altura	0.2	m
Diámetro	0.15	m
Área	$1.77 \times 10^{-2}$	m <sup>2</sup>
Volumen	$3.53 \times 10^{-3}$	m <sup>3</sup>
Masa	7269	g

Tabla D2

*Granulometría de los materiales MGM1 y MGM2*

18%	Tamiz									
Tipo de granulometría	1" 1/2"	1"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	Fondo	Total
MGM1 Y MGM2	% Pasa									
	100	85	68	60	45.00	32.50	26.00	18.00	0	
	% Retenido acumulado									
	0	15	32	40	55	68	74	82	100	
% Retenido										
	0.0	15.0	17.0	8.0	15.0	12.5	6.5	8.0	18.0	100
Masa (g)	0	1090	1236	581	1090	909	472	581	1308	7269

Tabla D3

*Granulometría del material de control SBG\_C1*

8.5%	Tamiz									
Tipo de granulometría	1" 1/2"	1"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	Fondo	Total
SBG_C1	% Pasa									
	100	85	68	60	45	32.5	26	8.50	0	
	% Retenido acumulado									
	0	15	32	40	55	67.5	74	91.5	100.00	
% Retenido										
	0.0	15.0	17.0	8.0	15.0	12.5	6.5	17.5	8.5	100.00
Masa (g)	0	1090	1236	581	1090	909	472	1272	618	7269

Tabla D4

*Cantidad de material fino (pasa No. 200) por probeta de cada material*

Material necesario de pasa #200 por probeta										
%Finos	Fondo	%IP	Cantera		Caolinita		Bentonita		Triturado	
			%	g	%	g	%	g	%	g
18%	1308	8	84.5	1106	0	0	0	0	15.5	203
		12	49.43	647	49.43	647	1.14	15	0	0
8.5%	618	0	84.34	521	0	0	0	0	15.66	97

Tabla D5

*Granulometría MGMs, material SBG\_C1 y límites granulométricos establecidos para una SBG-38*

Tamiz		% Finos SBG_C1 Y MGMs		% Finos serie SBG-38	
		8,5%	18%	2%	15%
No. Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1-1/2"	38,1	100	100	100	100
1"	25,4	85,0	85,0	75	95
1/2"	12,70	68,0	68,0	55	85
3/8"	9,525	60,0	60,0	45	75
No. 4	4,76	45,0	45,0	30	60
No. 10	2	32,5	32,5	20	45
No. 40	0,42	26,0	26,0	8	30
No. 200	0,074	8,5	18,0	2	15

### Apéndice E. Ensayos de índices de plasticidad para IP 8%

Tabla E1

*Datos para graficar la ecuación 6*

Masa total [g]	200
----------------	-----

Cantera %	Cantera [g]	% Triturado	Triturado [g]	%LL	%LP	% IP experimental
73	146	27	54	33.53	28.52	5.01
80	160	20	40	33.19	26.41	6.78
90	180	10	20	35.94	26.40	9.54

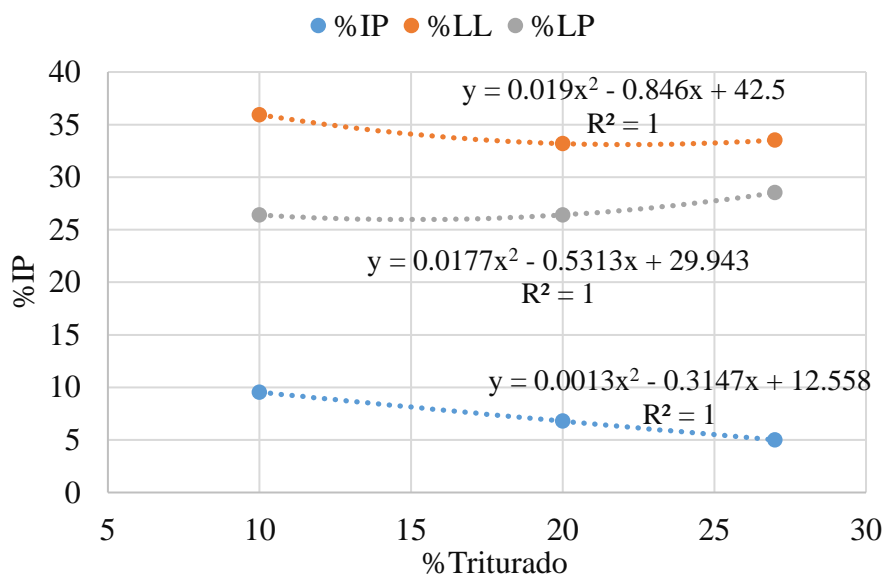


Figura E1. Límites de consistencia para definir ecuación 6

Tabla E2

Datos obtenidos del ensayo de límites de consistencia para IP 8%

	Límite Líquido			Límite plástico		
	1	2	3	1	2	
Nº tara	1	2	3	1	2	
Nº de golpes	31	22	17	---	---	
Peso tara	6.43	6.86	8.26	6.9	6.78	
Peso tara + suelo húmedo (g)	29.74	24.57	24.43	13.29	13.86	
Peso tara + muestra seca (g)	23.75	19.91	20.1	11.93	12.33	
Peso del agua	5.99	4.66	4.33	1.36	1.53	
Peso suelo seco	17.32	13.05	11.84	5.03	5.55	
Contenido de humedad (%)	34.58	35.71	36.57	27.04	27.57	27.30

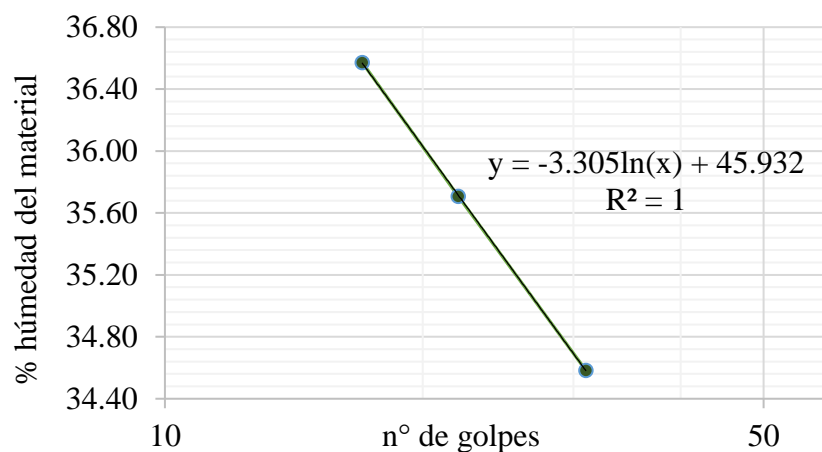


Figura E2. Límite líquido IP 8%

Tabla E3

*Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad*

Límite líquido	35.29	%
Límite plástico	27.30	%
Índice de plasticidad	7.99	%

### Apéndice F. Ensayos de índices de plasticidad para IP 12%

Tabla F1

*Datos para graficar la ecuación 7*

Masa total [g]		200				
Bentonita [%]	Bentonita [g]	Cantera [g]	Caolinita [g]	%LL	%LP	% IP experimental
0.20	0.40	100	99.60	39.75	29.17	10.58
1.04	2.08	98.96	98.96	39.97	28.15	11.83
2.00	4.00	98.00	98.00	42.99	29.37	13.62
2.15	4.30	97.85	97.85	44.34	29.49	14.85
5.00	10.00	95.00	95.00	53.56	27.22	26.34

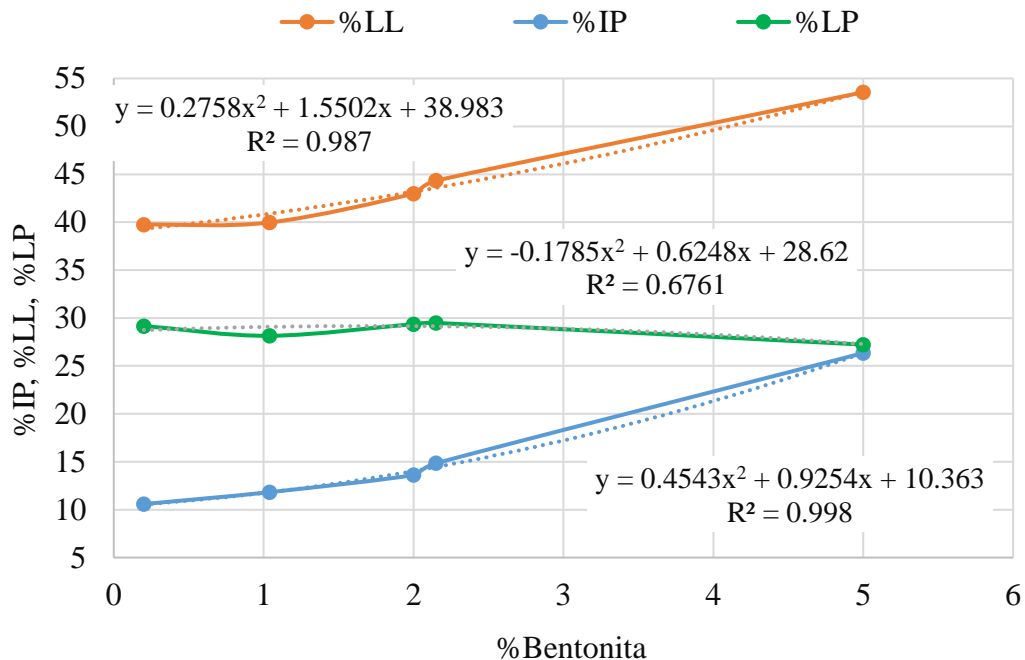


Figura F1. Límites de consistencia para definir ecuación 6

Tabla F2.

Datos obtenidos del ensayo de límites de consistencia para IP 12%

N° tara	Límite líquido			Límite plástico		
	1	2	3	1	2	
N° de golpes	27	24	18	---	---	
Peso tara	6.96	6.99	6.8	6.89	6.67	
Peso tara + suelo húmedo (g)	20.84	20.57	19.62	13.35	13.65	
Peso tara + muestra seca (g)	16.91	16.66	15.9	11.91	12.14	
Peso del agua	3.93	3.91	3.72	1.44	1.5	
Peso suelo seco	9.95	9.67	9.1	5.02	5.47	
Contenido de humedad (%)	39.50	40.43	40.88	28.69	27.61	28.15

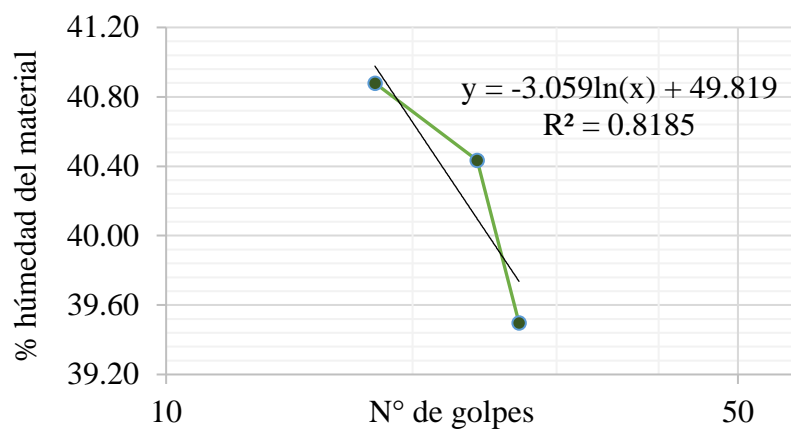


Figura F2. Límite líquido

Tabla F3.

*Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad*

Límite líquido	39.97	%
Límite plástico	28.15	%
Índice de plasticidad	11.83	%

### Apéndice G. Datos compactación MGM1

Tabla G1

*Datos para determinación de humedad final de cada probeta del MGM1*

Probeta	MGM1_C1	MGM1_C2	MGM1_C5	MGM1_C6	MGM1_C3	MGM1_C4
Humedad teórica	7%	9%	9.7%	10.5%	11%	13%
Peso Tara	5	5	5	5	5	5
Peso Tara + Masa húmeda [g]	205	205	205	205	205	205
Peso Tara + Masa seca [g]	191	188	186	185	184	181
Peso agua	14	17	19	20	21	24
Peso seco	186	183	181	180	179	176
Humedad final [W]	7.53%	9.29%	10.50%	11.11%	11.73%	13.64%
Variación de la humedad	0.53%	0.29%	0.80%	0.61%	0.73%	0.64%

Tabla G2

*Resumen datos obtenidos del compactador giratorio para el MGMI*

Código de la probeta	N° Giros	Humedad	densidad húmeda [Kg/m <sup>3</sup> ]	Peso unitario seco [KN/m <sup>3</sup> ]	Locking point			Comentarios	
					N° Giros	densidad húmeda [Kg/m <sup>3</sup> ]	Peso unitario seco [KN/m <sup>3</sup> ]	Looking Point	Expulsión de agua
MGM1_C1	180	7.53%	1975	18.4	86	1966	18.3	SI	NO
MGM1_C2	140	9.29%	2054	18.8	92	2046	18.7	SI	NO
MGM1_C5	140	10.50%	2104	19.0	99	2096	19.0	SI	NO
MGM1_C6	140	11.11%	2171	19.5	112	2163	19.5	SI	SI
MGM1_C3	140	11.73%	2191	19.6	127	2188	19.6	SI	SI
MGM1_C4	180	13.64%	2207	19.4	170	2206	19.4	SI	SI

Tabla G3

*Relación de vacíos, porosidad y saturación del MGMI*

Código de la probeta	Peso húmedo [g]	Humedad	densidad húmeda [Kg/m <sup>3</sup> ]	densidad seca [Kg/m <sup>3</sup> ]	Relación de vacíos [e]	Porosidad [n]	% Saturación [S]
MGM1_C1	7545	7.53%	1975.00	1836.75	0.47	0.32	43.24
MGM1_C2	7694	9.29%	2053.81	1879.24	0.44	0.30	57.43
MGM1_C5	7755	10.50%	2103.55	1903.71	0.42	0.29	67.76
MGM1_C6		11.11%	2170.62	1953.56	0.38	0.28	78.51
MGM1_C3	7861	11.73%	2191.12	1961.05	0.38	0.27	84.06
MGM1_C4	7968	13.64%	2206.75	1941.94	0.39	0.28	94.32

**Apéndice H. Datos compactación MGM2**

Tabla H1

*Datos para determinación de humedad final de cada probeta del MGM2*

Probeta	MGM2_C1	MGM2_C2	MGM2_C3	MGM2_C4
Humedad teórica	8.5%	10.5%	11.5%	12.5%
Peso Tara	6	6	6	6
Peso Tara + Masa húmeda [g]	206	206	206	206
Peso Tara + Masa seca [g]	189.4	186.6	184.4	182.5
Peso agua	16.6	19.4	21.6	23.5
Peso seco	183.4	180.6	178.4	176.5
Humedad final	9.05%	10.74%	12.11%	13.31%
Variación de la humedad	0.55%	0.24%	0.61%	0.81%

Tabla H2

*Resumen datos obtenidos del compactador giratorio para el MGM2*

Código de la probeta	N° Giros	Humedad	densidad húmeda [Kg/m <sup>3</sup> ]	Peso unitario seco [KN/m <sup>3</sup> ]	Locking point			Comentarios	
					N° Giros	densidad húmeda [Kg/m <sup>3</sup> ]	Peso unitario seco [KN/m <sup>3</sup> ]	Looking Point	Expulsión de agua
MGM2_C1	140	9.05%	2024.67	18.57	140	2024.67	18.57	NO	NO
MGM2_C2	140	10.74%	2151.42	19.43	131	2149.17	19.41	SI	NO
MGM2_C3	140	12.11%	2219.04	19.79	90	2205.91	19.68	SI	SI
MGM2_C4	180	13.31%	2218.11	19.57	142	2213.46	19.53	SI	SI

Tabla H3

*Relación de vacíos, porosidad y saturación del MGM2*

Código de la probeta	Peso húmedo [g]	% humedad	densidad húmeda [Kg/m <sup>3</sup> ]	densidad seca [Kg/m <sup>3</sup> ]	Relación de vacíos [e]	Porosidad [n]	% Saturación [S]
MGM2_C1	7674	9.1%	2024.67	1856.63	0.45	0.31	53.80
MGM2_C2	7822	10.7%	2151.42	1942.73	0.39	0.28	74.41
MGM2_C3	7873	12.1%	2219.04	1979.38	0.36	0.27	89.79
MGM2_C4	7938	13.3%	2218.11	1957.48	0.38	0.28	94.77

**Apéndice I. Datos compactación SBG\_C1**

Tabla I1

*Datos para determinación de humedad final de cada probeta del SBG\_C1*

Probeta	SBG_C1_C1	SBG_C1_C2	SBG_C1_C3	SBG_C1_C4
Humedad teórica	10.0%	11.0%	12.0%	13.0%
Peso Tara	5.6	6	5.7	5.1
Peso Tara + Masa húmeda [g]	205.3	209.1	206.4	205.6
Peso Tara + Masa seca [g]	186.2	188	184.1	181.8
Peso agua	19.1	21.1	22.3	23.8
Peso seco	180.6	182	178.4	176.7
Humedad final	10.58%	11.59%	12.50%	13.47%
Variación de la humedad	0.58%	0.59%	0.50%	0.47%

Tabla I2

*Resumen datos obtenidos del compactador giratorio para el SBG\_C1*

Código de la probeta	N° Giros	Humedad	densidad húmeda [Kg/m3]	Peso unitario seco [KN/m3]	Locking point		Comentarios		
					N° Giros	densidad húmeda [Kg/m3]	Peso unitario seco [KN/m3]	Looking Point	Expulsión de agua
SBG_C1_C1	180	10.58%	2217.50	20.05	180	2217.50	20.05	No	No
SBG_C1_C2	140	11.59%	2240.21	20.07	140	2007.47	17.99	No	SI
SBG_C1_C3	140	12.50%	2235.31	19.87	77	2227.81	19.80	Si	SI
SBG_C1_C4	140	13.47%	2226.40	19.62	32	2207.06	19.45	Si	SI

Tabla I3

*Relación de vacíos, porosidad y saturación del MGM2*

Probeta	Peso húmedo [g]	% humedad	densidad húmeda (Kg/m3)	densidad seca (Kg/m3)	Relación de vacíos (e)	Porosidad (n)	% Saturación (S)
SBG_C1_C1	7545	7.5%	2217.50	2005.41	0.346	0.26	58.68
SBG_C1_C2	7694	9.3%	2240.21	2007.47	0.345	0.26	72.71
SBG_C1_C3	7861	11.7%	2235.31	1986.94	0.359	0.26	88.27
SBG_C1_C4	7968	13.6%	2226.40	1962.12	0.376	0.27	97.90

**Apéndice J. Ensayo de tracción indirecta**

Tabla

*Resultados de resistencia a la tracción indirecta de los materiales MGM1, MGM2 y SBG\_C1*

<b>Material</b>	<b>Diámetro [mm]</b>	<b>Altura [mm]</b>	<b>humedad [%]</b>	<b>RTI [kPa]</b>	<b>Peso unitario seco [KN/m3]</b>
MGM1_C1	150	216,5	7,5%	16,33	18,37
MGM1_C2	150	212,0	9,3%	18,45	18,79
MGM1_C5	150	208,7	10,5%	52,23	19,04
MGM1_C6	150	203,5	11,1%	30,18	19,54
MGM1_C3	150	203,1	11,7%	55,03	19,61
MGM1_C4	150	205,3	13,6%	62,11	19,42
MGM2_C1	150	214,6	9,1%	42,60	18,57
MGM2_C2	150	206,0	10,7%	23,28	19,43
MGM2_C3	150	201,4	12,1%	12,52	19,79
MGM2_C4	150	203,9	13,3%	24,27	19,57
SBG_C1_C1	150	198,4	10,6%	21,91	18,57
SBG_C1_C2	150	198,4	11,6%	14,24	19,43
SBG_C1_C3	150	200,7	12,5%	11,84	19,79
SBG_C1_C4	150	203,2	13,5%	3,05	19,57

**Apéndice K. Ensayo de succión**

Tabla K1

*Succión total del material MGM1*

Material	húmedo		Seco		Mf	Mw	Wf	curva de calibración		succión total [Log kPa]	succión total [kPa]
	Peso bolsa [g]	Peso bolsa+Papel [g]	Peso bolsa [g]	Peso bolsa+Papel [g]				m	b		
MGM1_C1	2,0516	2,3891	2,1548	2,3761	0,22	0,12	52,51	-0,0135	2,412	1,70	50,48
MGM1_C2	2,1966	2,4732	2,3094	2,4901	0,18	0,10	53,07	-0,0135	2,412	1,70	49,61
MGM1_C5	2,1533	2,5475	2,2228	2,4446	0,22	0,17	77,73	-0,0135	2,412	1,36	23,05
MGM1_C6	2,1841	2,5199	2,2209	2,4366	0,22	0,12	55,68	-0,0135	2,412	1,66	45,74
MGM1_C3	2,1862	2,5722	2,2492	2,4623	0,21	0,17	81,14	-0,0135	2,412	1,32	20,73
MGM1_C4	2,2126	2,5351	2,2583	2,4954	0,24	0,09	36,02	-0,0135	2,412	1,93	84,28

Tabla K2

*Succión total del material MGM2*

Material	húmedo		Seco		Mf	Mw	Wf	curva de calibración		succión total [Log Kpa]	succión total [kPa]
	Peso bolsa [g]	Peso bolsa+Papel [g]	Peso bolsa [g]	Peso bolsa+Papel [g]				m	b		
MGM2_C1	2,0255	2,3656	1,9926	2,2247	0,23	0,11	46,53	-0,0135	2,412	1,78	60,79
MGM2_C2	1,9991	2,3207	1,9894	2,221	0,23	0,09	38,86	-0,0135	2,412	1,89	77,16
MGM2_C3	1,9841	2,2931	1,9902	2,2215	0,23	0,08	33,59	-0,0135	2,412	1,96	90,89
MGM2_C4	2,077	2,3544	1,9987	2,201	0,20	0,08	37,12	-0,0135	2,412	1,91	81,44

Tabla K3

*Succión total del material SBG\_C1*

Material	húmedo		Seco		Mf	Mw	Wf	curva de calibración		succión total [Log Kpa]	succión total [kPa]
	Peso bolsa [g]	Peso bolsa+Papel [g]	Peso bolsa [g]	Peso bolsa+Papel [g]				m	b		
SBG_C1_C1	2,01	2,387	1,9871	2,2117	0,22	0,15	67,85	-0,0135	2,412	1,50	31,33
SBG_C1_C2	2,0716	2,3217	1,9655	2,1583	0,19	0,05	29,72	-0,0135	2,412	2,01	102,51
SBG_C1_C3	2,0346	2,3748	1,9617	2,1936	0,23	0,10	46,70	-0,0135	2,412	1,78	60,47
SBG_C1_C4	2,032	2,3883	2,0869	2,3338	0,24	0,10	44,31	-0,0135	2,412	1,81	65,14

**Apéndice L. Granulometría final**

Tabla L1

*Granulometría final de las probetas del material MGM1*

Material	Tamiz	1 1/2"	1"	1/2"	3/8"	N4	N10	N40	N200	Fondo
	Abertura tamiz	38,1	25,4	12,70	9,525	4,76	2	0,42	0,074	-
MGM1_C1	Material retenido	0	713	955	352	879	715	696	599	1720
MGM1_C2		0	628	921	347	889	707	767	642	1708
MGM1_C5		0	838	807	313	790	696	749	630	1992
MGM1_C6		0	518	865	367	938	812	846	687	1750
MGM1_C3		0	617	797	331	919	752	805	639	1860
MGM1_C4		0	593	886	322	768	672	882	715	1918
MGM1_C1	%retenido	0	10,7	14,4	5,3	13,3	10,8	10,5	9,0	25,9
MGM1_C2		0	9,5	13,9	5,2	13,4	10,7	11,6	9,7	25,8
MGM1_C5		0	12,3	11,8	4,6	11,6	10,2	11,0	9,2	29,2
MGM1_C6		0	7,6	12,7	5,4	13,8	12,0	12,5	10,1	25,8
MGM1_C3		0	9,2	11,9	4,9	13,7	11,2	12,0	9,5	27,7
MGM1_C4		0	8,8	13,1	4,8	11,4	9,9	13,1	10,6	28,4
MGM1_C1	%pasa	100,0	89,3	74,9	69,5	56,3	45,5	35,0	26,0	-
MGM1_C2		100,0	90,5	76,6	71,4	57,9	47,2	35,6	25,9	-
MGM1_C5		100,0	87,7	75,9	71,3	59,7	49,5	38,5	29,3	-
MGM1_C6		100,0	92,4	79,6	74,2	60,4	48,4	36,0	25,8	-
MGM1_C3		100,0	90,8	79,0	74,0	60,4	49,2	37,2	27,7	-
MGM1_C4		100,0	91,2	78,1	73,3	62,0	52,0	39,0	28,4	-

Tabla L2

*Granulometría final de las probetas del material MGM2*

Material	Tamiz	1 1/2"	1"	1/2"	3/8"	N4	N10	N40	N200	Fondo
	Abertura tamiz	38,1	25,4	12,70	9,525	4,76	2	0,42	0,074	-
MGM2_C1	Material retenido	0	568	923	353	966	774	741	663	1706
MGM2_C2		0	381	913	295	851	802	829	726	1899
MGM2_C3		0	647	982	284	805	710	818	738	1773
MGM2_C4		0	593	901	299	765	721	829	790	1835
MGM2_C1	%retenido	0	8,48	13,78	5,27	14,42	11,56	11,06	9,90	25,47
MGM2_C2		0	5,69	13,63	4,40	12,70	11,97	12,37	10,84	28,35
MGM2_C3		0	9,57	14,52	4,20	11,90	10,50	12,10	10,91	26,22
MGM2_C4		0	8,81	13,38	4,44	11,36	10,71	12,31	11,73	27,25
MGM2_C1	%pasa	100	91,52	77,74	72,47	58,05	46,49	35,43	25,53	-
MGM2_C2		100	94,31	80,68	76,28	63,58	51,60	39,23	28,39	-
MGM2_C3		100	90,43	75,91	71,71	59,81	49,31	37,22	26,30	-
MGM2_C4		100	91,19	77,81	73,37	62,01	51,30	38,99	27,25	-

Tabla L3

*Granulometría final de las probetas del material SBG\_C1.*

Material	Tamiz	1 1/2"	1"	1/2"	3/8"	N4	N10	N40	N200	Fondo
	Abertura tamiz	38,1	25,4	12,70	9,525	4,76	2	0,42	0,074	-
SBG_C1_C1	Material retenido	0	371	958	338	876	755	825	1173	1403
SBG_C1_C2		0	429	1028	294	885	719	825	1149	1414
SBG_C1_C3		0	657	862	340	811	693	780	1180	1413
SBG_C1_C4		0	673	996	303	770	663	767	1175	1392
SBG_C1_C1	%retenido	0	5,53	14,29	5,04	13,07	11,26	12,31	17,50	20,93
SBG_C1_C2		0	6,40	15,34	4,39	13,20	10,73	12,31	17,14	21,10
SBG_C1_C3		0	9,80	12,86	5,07	12,10	10,34	11,64	17,60	21,08
SBG_C1_C4		0	10,04	14,86	4,52	11,49	9,89	11,44	17,53	20,77
SBG_C1_C1	%pasa	100	94,47	80,17	75,13	62,06	50,80	38,49	20,99	-
SBG_C1_C2		100	93,60	78,26	73,88	60,67	49,95	37,64	20,50	-
SBG_C1_C3		100	90,20	77,34	72,27	60,17	49,83	38,19	20,59	-
SBG_C1_C4		100	89,96	75,10	70,58	59,09	49,20	37,76	20,23	-

Tabla L4

*Desgaste promedio de cada fracción para los materiales de estudio.*

Material	Tamiz	1 1/2"	1"	1/2"	3/8"	N4	N10	N40	N200
	Abertura tamiz	38,1	25,4	12,70	9,525	4,76	2	0,42	0,074
MGM1_C1	Desgaste [%]	-	5,00%	10,08 %	15,91 %	25,10 %	40,05 %	34,70 %	44,40 %
MGM1_C2		-	6,48%	12,64 %	18,92 %	28,71 %	45,34 %	37,10 %	44,14 %
MGM1_C5		-	6,85%	16,12 %	23,39 %	34,14 %	51,31 %	43,06 %	53,83 %
MGM1_C6		-	7,32%	14,87 %	22,24 %	37,73 %	60,11 %	49,93 %	57,78 %
MGM1_C3		-	3,19%	11,59 %	18,82 %	32,68 %	52,31 %	48,15 %	62,68 %
MGM1_C4		-	8,67%	17,09 %	23,69 %	34,20 %	48,99 %	38,29 %	43,51 %
<b>MGM1</b>		Promedio	-	6,25%	13,73 %	20,49 %	32,09 %	49,68 %	41,87 %
MGM2_C1	Desgaste [%]	-	7,67%	14,32 %	20,78 %	28,99 %	43,05 %	36,26 %	41,83 %
MGM2_C2		-	10,96 %	18,65 %	27,13 %	41,28 %	58,78 %	50,88 %	57,73 %
MGM2_C3		-	6,39%	11,64 %	19,52 %	32,91 %	51,73 %	43,14 %	46,14 %
MGM2_C4		-	7,29%	14,43 %	22,28 %	37,80 %	57,84 %	49,95 %	51,41 %
<b>MGM2</b>	Promedio	-	8,08%	14,76 %	22,43 %	35,25 %	52,85 %	45,06 %	49,28 %
SBG_C1_C1	Desgaste [%]	-	11,1%	17,9%	25,2%	37,9%	56,3%	48,0%	146,9 %
SBG_C1_C2		-	10,1%	15,1%	23,1%	34,8%	53,7%	44,8%	141,2 %
SBG_C1_C3		-	6,1%	13,7%	20,4%	33,7%	53,3%	46,9%	142,2 %
SBG_C1_C4		-	5,8%	10,4%	17,6%	31,3%	51,4%	45,2%	138,0 %
<b>SBG_C1</b>	Promedio	-	8,30%	14,29 %	21,61 %	34,44 %	53,67 %	46,23 %	142,08 %

**Apéndice M. Toma de imágenes MGM1**



*Figura M1.* Probeta con humedad de 7.53% - toma lateral



*Figura M2.* Probeta con humedad de 7.53% - toma cara superior



*Figura M3.* Probeta con humedad de 7.53% - toma después de la falla



*Figura M4.* Probeta con humedad de 7.53% - superficie de falla 3D



*Figura M5.* Probeta con humedad de 9.29% - toma lateral



*Figura M6.* Probeta con humedad de 9.29% - toma cara superior



*Figura M7.* Probeta con humedad de 9.29% - toma después de la falla



*Figura M8.* Probeta con humedad de 9.29% - superficie de falla 3D



*Figura M9.* Probeta con humedad de 10.50% - toma lateral



*Figura M10.* Probeta con humedad de 10.50% - toma cara superior



*Figura M11.* Probeta con humedad de 10.50% - toma después de la falla



*Figura M12.* Probeta con humedad de 10.50% - superficie de falla 3D



*Figura M13.* Probeta con humedad de 11.11% - toma lateral



*Figura M14.* Probeta con humedad de 11.11% - toma cara superior



*Figura M15.* Probeta con humedad de 11.11% - toma después de la falla



*Figura M16.* Probeta con humedad de 11.11% - superficie de falla 3D



*Figura M17.* Probeta con humedad de 11.73% - toma lateral



*Figura M18.* Probeta con humedad de 11.73% - toma cara superior



*Figura M19.* Probeta con humedad de 11.73% - toma después de la falla



*Figura M20.* Probeta con humedad de 11.73% - superficie de falla 3D



*Figura M21.* Probeta con humedad de 13.64% - toma lateral



*Figura M22.* Probeta con humedad de 13.64% - toma cara superior



*Figura M23.* Probeta con humedad de 13.64% - toma después de la falla

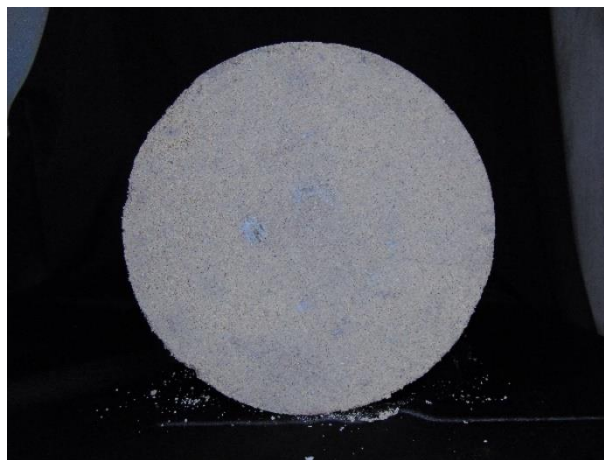


*Figura M24.* Probeta con humedad de 13.64% - superficie de falla 3D

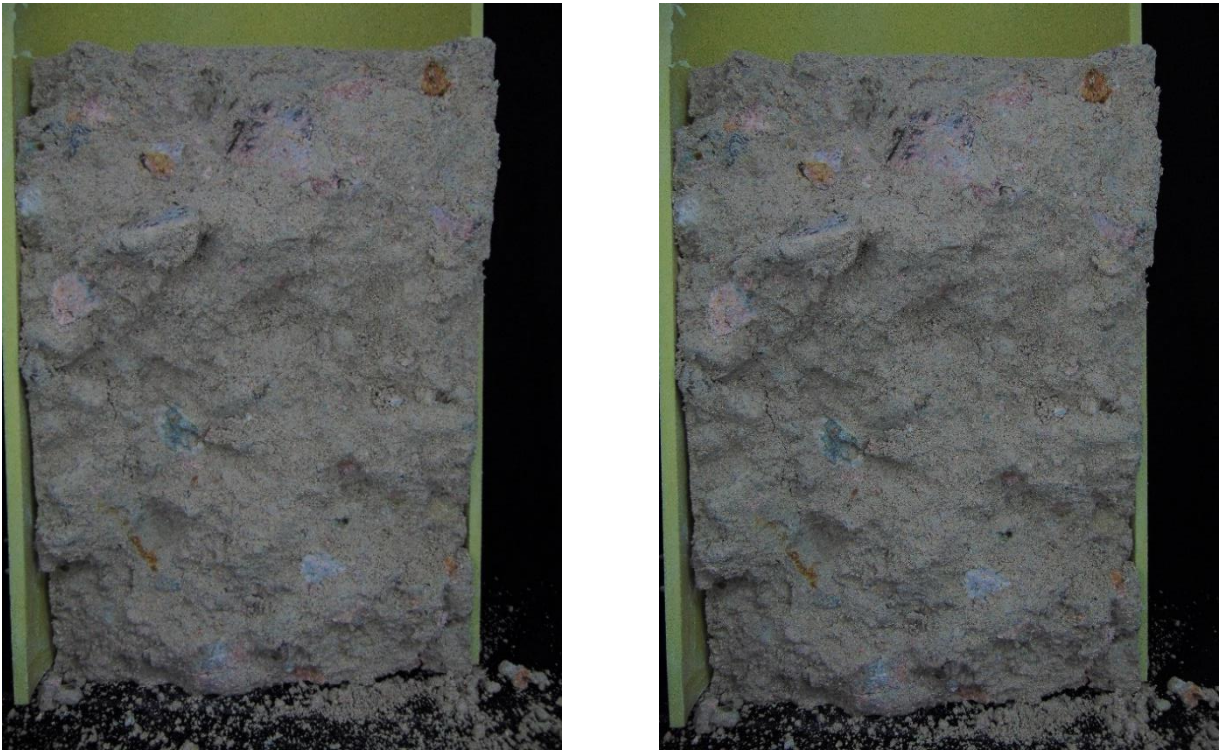
**Apéndice N. Toma de imágenes MGM2**



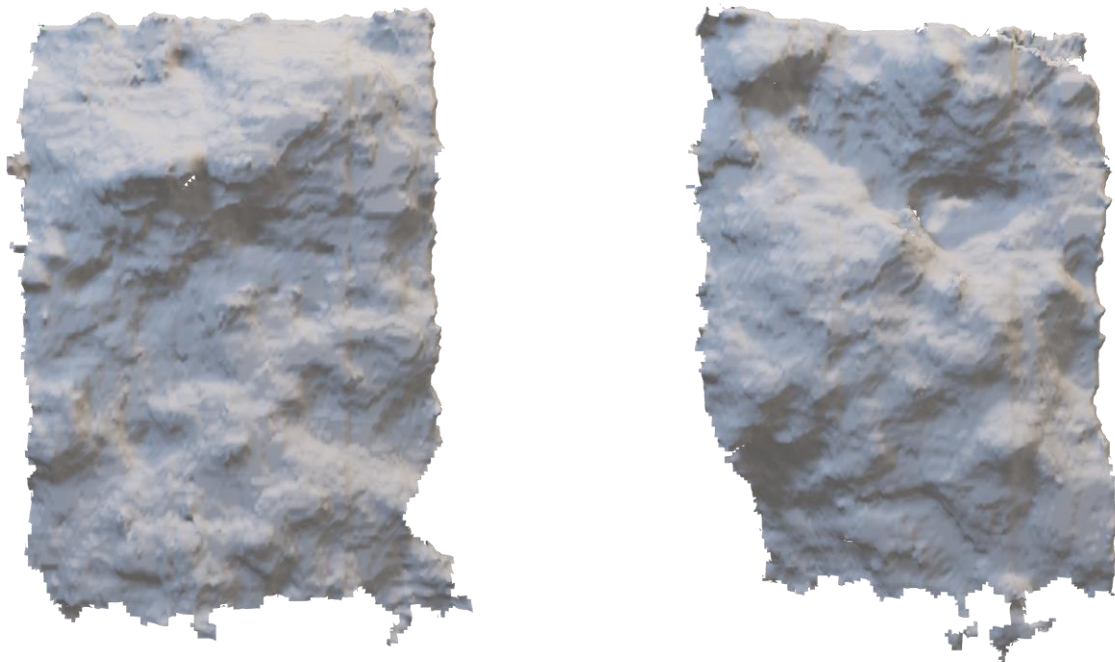
*Figura N1.* Probeta con humedad de 9.05% - toma lateral



*Figura N2.* Probeta con humedad de 9.05% - toma cara superior



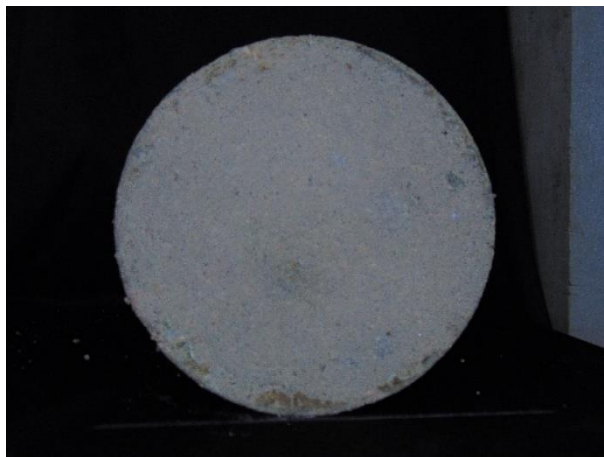
*Figura N3.* Probeta con humedad de 9.05% - toma falla 1 y falla 2



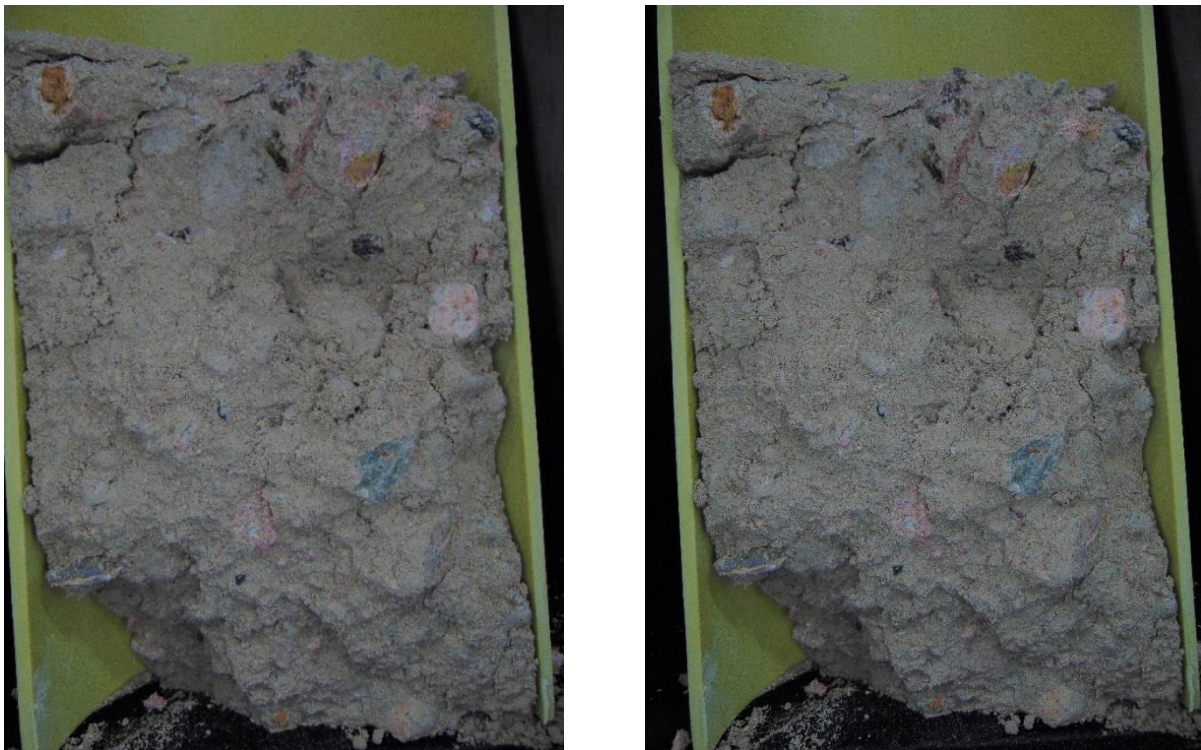
*Figura N4.* Probeta con humedad de 9.05% - superficie de falla 1 y falla 2 en 3D



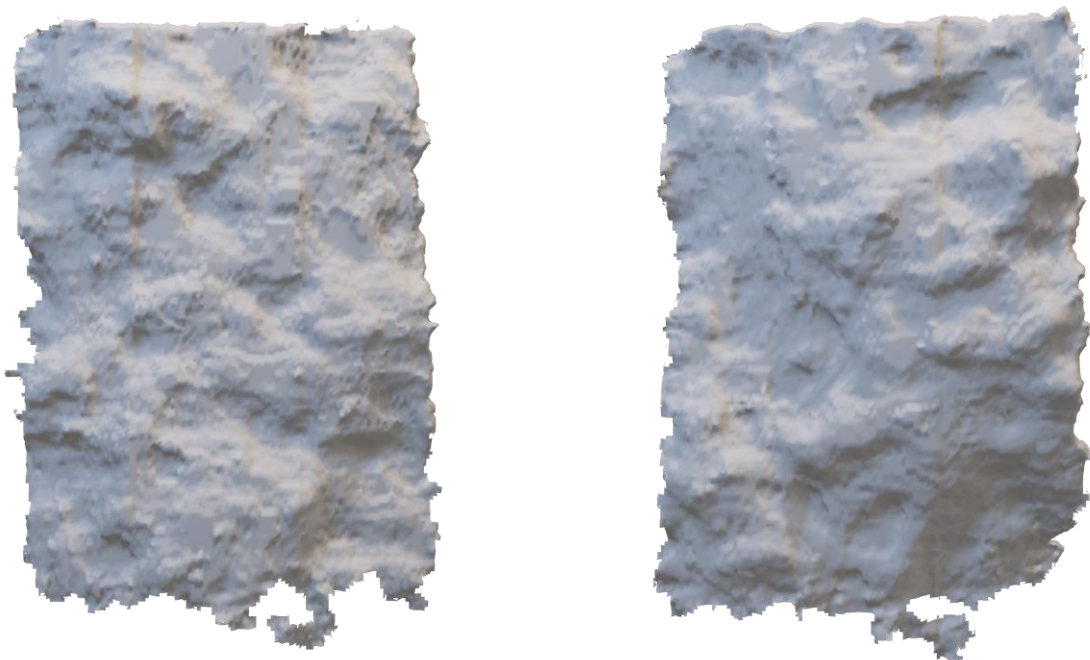
*Figura N5.* Probeta con humedad de 10.74% - toma lateral



*Figura N6.* Probeta con humedad de 10.74% - toma cara superior



*Figura N7.* Probeta con humedad de 10.74% - toma falla 1 y falla 2



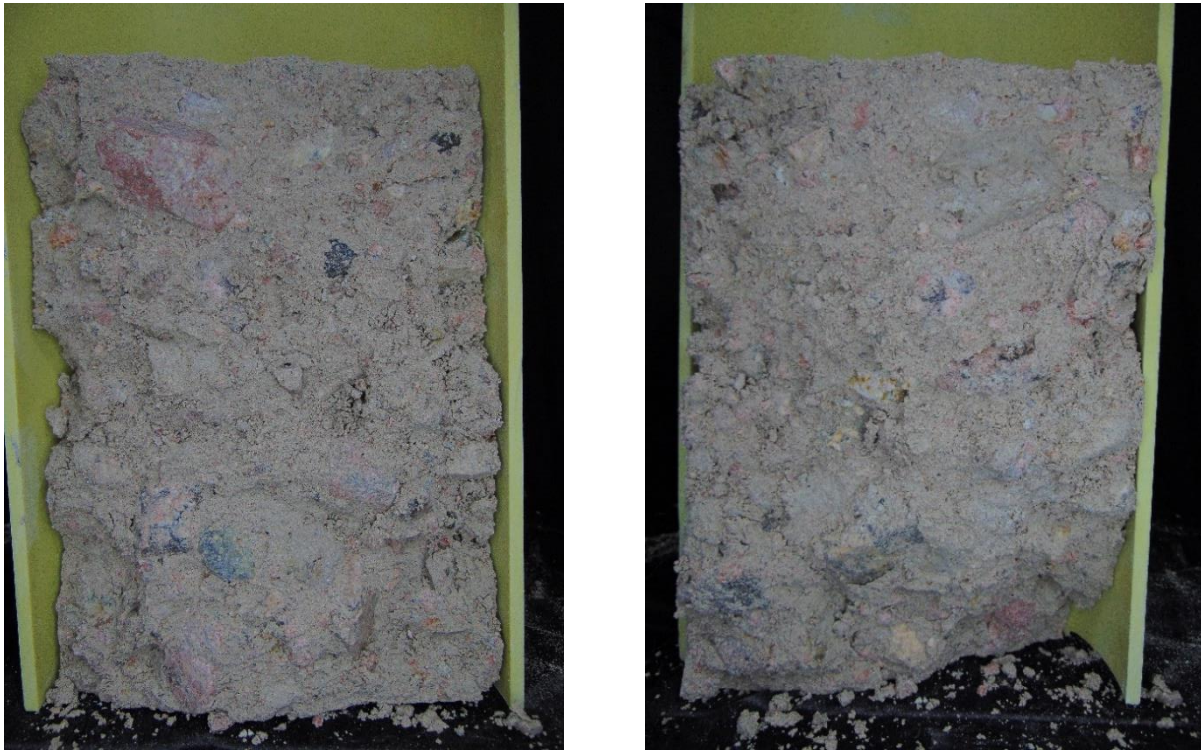
*Figura N8.* Probeta con humedad de 10.74% -superficie de falla 1 y falla 2 en 3D



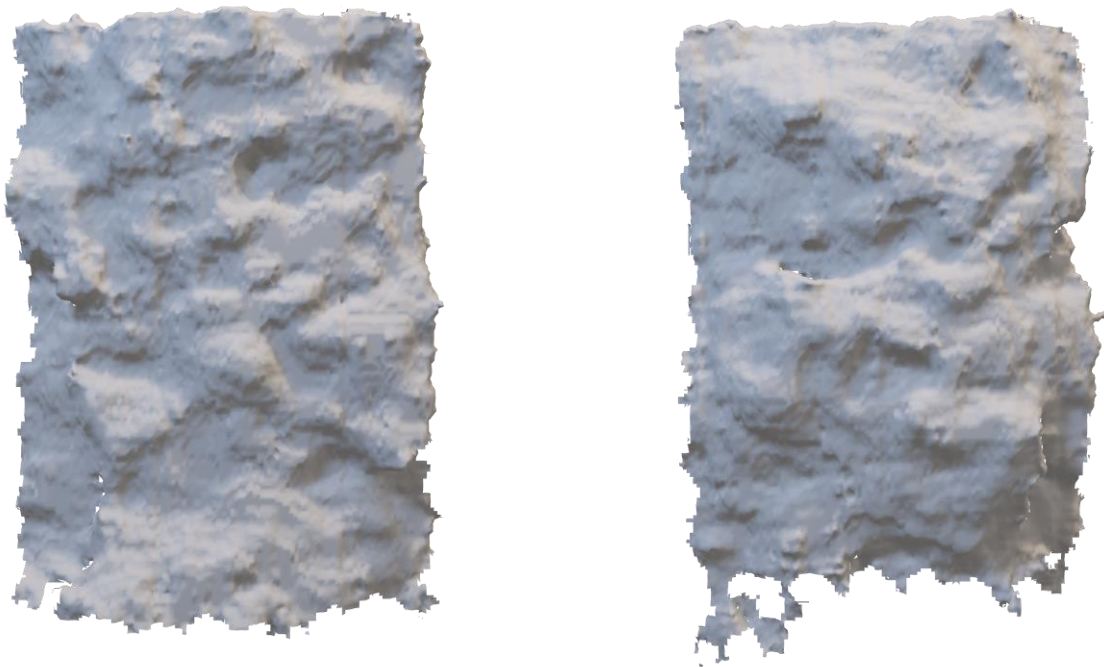
*Figura N9.* Probeta con humedad de 12.11% - toma lateral



*Figura N10.* Probeta con humedad de 12.11% - toma cara superior



*Figura N11.* Probeta con humedad de 10.74% - toma falla 1 y falla 2



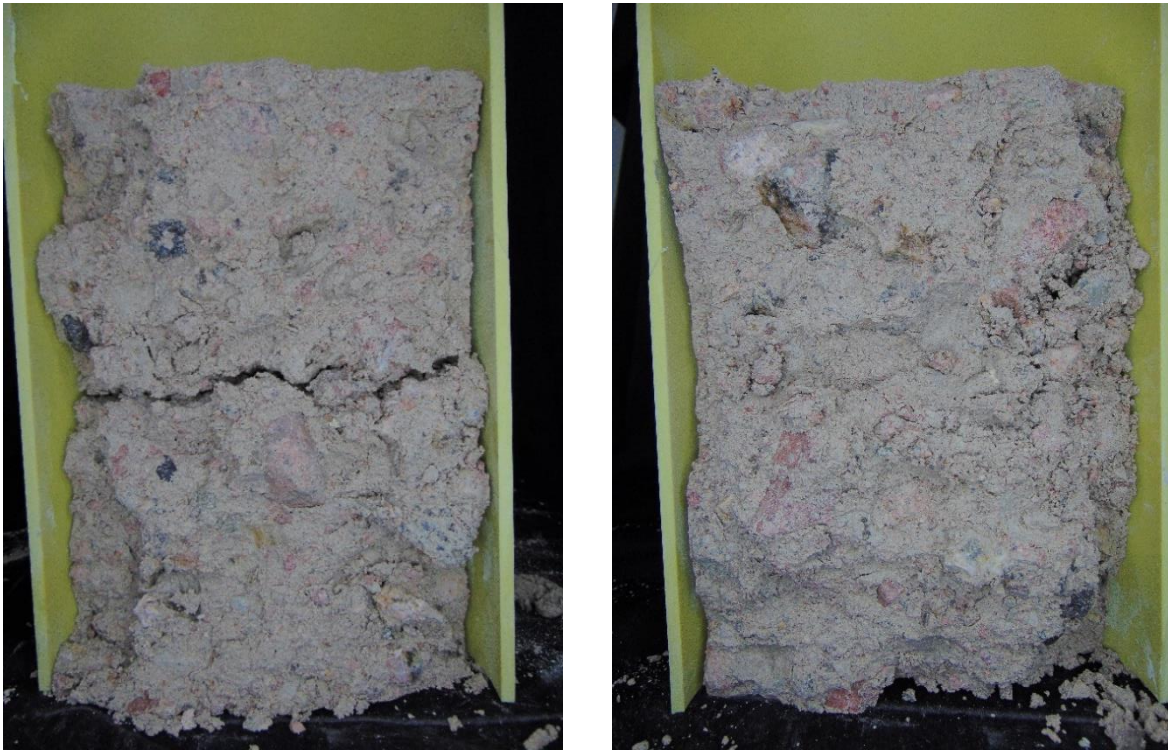
*Figura N12.* Probeta con humedad de 10.74% - superficie de falla 1 y falla 2 en 3D



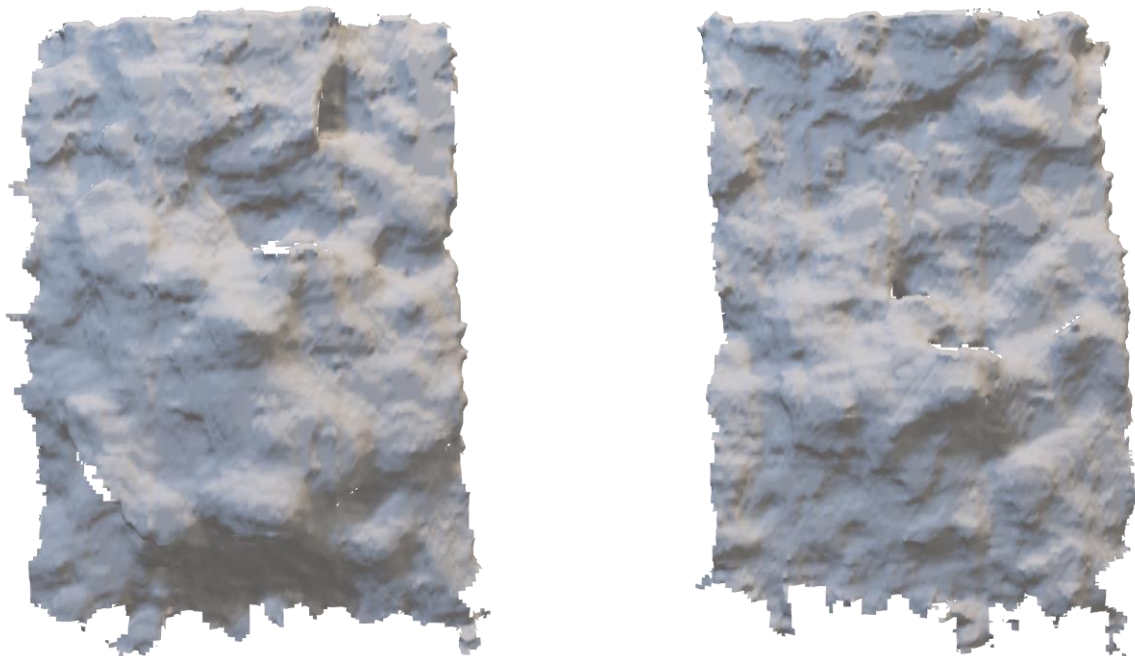
*Figura N13.* Probeta con humedad de 13.31% - toma lateral



*Figura N14.* Probeta con humedad de 13.31% - toma cara superior



*Figura N15.* Probeta con humedad de 13.31% - toma falla 1 y falla 2



*Figura N16.* Probeta con humedad de 13.31% - superficie de falla 1 y falla 2 en 3D