

Evaluación Del Comportamiento Hidromecánico De Materiales Granulares Marginales De  
Subbase Identificados Como MGM-3.

Jhon Anderson Garzón Daza y Hector Edilson Sanchez Velandia

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniería Civil

Director

Allex Eduardo Alvarez Lugo,

Ingeniero Civil, Ph.D.

Codirector

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes,

Ingeniero Civil, Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	9
1. Objetivos .....	11
1.1 Objetivo General .....	11
1.2 Objetivos Específicos.....	11
2. Marco Teórico.....	12
2.1 Materiales granulares marginales (MGM).....	12
2.2 Estabilización de materiales granulares .....	12
2.3 Índice de plasticidad .....	14
2.4 Método giratorio de compactación .....	14
2.5 Locking Point.....	14
2.6 Ensayo de tracción indirecta .....	15
2.7 Suelo parcialmente saturado .....	15
2.8 Succión.....	15
2.9 Grado de saturación .....	16
2.10 Ensayo Papel Filtro .....	16
3. Metodología .....	17
3.1 Proyecto global .....	17
3.2 Propiedades y procedencia de material granular y otros materiales .....	18
3.2.1 Material de cantera y triturado.....	18
3.2.1 Caolinita y bentonita .....	19
3.3 Granulometría .....	19

3.4 Mezclas de fracción fina .....	20
3.5 Compactación .....	21
3.6 Ensayo de tracción indirecta .....	22
3.7 Toma de imágenes 2D y 3D.....	23
3.8 Medición de succión total .....	23
3.9 Granulometría final.....	24
4. Resultados.....	25
4.1 Granulometría .....	25
4.2 Mezclas de fracción fina .....	26
4.3 Compactación .....	28
4.4 Tracción indirecta .....	31
4.5 Medición de succión .....	34
4.6 Granulometría final.....	37
5. Conclusiones.....	39
6. Recomendaciones .....	40
Referencias Bibliográficas .....	41
Apéndices.....	43

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Tipos de MGMS</i> .....	17
Tabla 2 <i>Granulometría MGM3</i> .....	25
Tabla 3 <i>Granulometría SGB_C1</i> .....	26
Tabla 4 <i>Resultados IP para mezclas de bentonita, caolinita y material de cantera.</i> .....	26
Tabla 5 <i>Proporciones para mezcla de finos de MGM3</i> .....	27
Tabla 6 <i>Resultados de IP para mezclas de material de cantera y triturado</i> .....	28
Tabla 7 <i>Proporciones para mezcla de finos de SBG_C1</i> .....	28

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Curvas Granulométricas</i> .....	20
Figura 2 <i>IP vs Bentonita</i> .....	27
Figura 3 <i>Curva de compactación del material MGM3</i> .....	29
Figura 4 <i>Curva de compactación del material SBG_C1</i> .....	29
Figura 5 <i>Peso específico vs N<sup>a</sup> de giros material MGM3</i> .....	30
Figura 6 <i>Peso específico vs N<sup>a</sup> de giros material SBG_C1</i> .....	31
Figura 7 <i>Fuerza axial vs desplazamiento del material MGM3</i> .....	32
Figura 8 <i>Fuerza axial vs desplazamiento del material SBG_C1</i> .....	32
Figura 9 <i>Resistencia a la tracción indirecta del material MGM3</i> .....	33
Figura 10 <i>Resistencia a la tracción indirecta del material SBG_C1</i> .....	34
Figura 11 <i>Curva de retención del material MGM3</i> .....	35
Figura 12 <i>Curva de retención del material SGB_C1</i> .....	35
Figura 13 <i>Humedad Probeta vs Humedad Papel filtro del material MGM3</i> .....	36
Figura 14 <i>Humedad Probeta vs Humedad Papel filtro del material SBG_C1</i> .....	36
Figura 15 <i>Granulometría final del material MGM3</i> .....	37
Figura 16 <i>Granulometría final del material SBG_C1</i> .....	38

### Lista de Apéndices

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Procesamiento de datos para la generar la curva de compactación del material MGM3 .....	43
Apéndice B. Procesamiento de datos para la generar la curva de compactación del material SBG_C1 .....	44
Apéndice C. Procesamiento de datos en el ensayo de tracción indirecta para el material MGM3 .....	45
Apéndice D. Procesamiento de datos en el ensayo de tracción indirecta para el material SBG_C1 .....	47
Apéndice E. Procesamiento de datos obtenidos en el ensayo de succión para el material MGM3 .....	49
Apéndice F. Procesamiento de datos obtenidos en el ensayo de succión para el material SBG_C1 .....	50
Apéndice G. Granulometría final del material MGM3.....	51
Apéndice H. Granulometría final del material SGB_C1 .....	52
Apéndice I. Protocolo para toma de imágenes 2D y 3D.....	53
Apéndice J. Imágenes 2D para el material MGM3.....	59
Apéndice K. Imágenes 2D para el material SBG_C1 .....	60
Apéndice L. Imágenes 3D para el material MGM3.....	61
Apéndice M. Imágenes 3D para el material SBG_C1 .....	61
Apéndice N. Video Protocoló de imágenes 2D y 3D. ....	61
Apéndice O. Video Medición de succión. ....	61

## Resumen

**Título:** Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como MGM-3.\*

**Autor:** Jhon Anderson Garzón Daza y Hector Edilson Sanchez Velandia\*\*

**Palabras Clave:** Subbase, Tracción indirecta, Material granular marginal, Succión, Efecto crushing, Índice de plasticidad.

### Descripción:

El costo de construcción y mantenimiento de vías son afectados en gran medida por los materiales granulares, una alternativa es el uso de materiales granulares marginales para subbase presentes en la zona, especialmente en vías terciarias que tienen bajos niveles de tránsito y por ende un presupuesto limitado. Se propone analizar el comportamiento hidromecánico de un material granular marginal con 18% de fino e IP de 15% (MGM3) y una subbase de control con 8.5% de finos e IP de 0% (SBG\_C1), para el análisis se determina la curva de compactación, resistencia a la tracción indirecta, succión y efecto crushing, empleando cuatro muestras con variación de humedad, por tipo de material. De las curvas de compactación se estableció un peso específico de 19.2 KN y 19.7 KN, una humedad óptima del 11.65% y 11.35% para el MGM3 y el SBG\_C1, además se estableció una relación inversamente proporcional entre la resistencia a la tracción indirecta y la humedad, logrando mayor resistencia con el MGM3 en comparación al SBG\_C1.

---

\* Trabajo de Grado

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

### Abstract

**Title:** Evaluation of the hydromechanical behavior of subbase marginal granular materials identified as MGM-3.\*

**Author(s):** Jhon Anderson Garzón Daza y Hector Edilson Sanchez Velandia \*\*

**Key Words:** Subbase, Indirect traction, Marginal granular material, Suction, Crushing effect, Plasticity index.

### Description:

The cost of construction and maintenance of roads are greatly affected by granular materials, an alternative is the use of marginal granular materials for subbases present in the area, especially in tertiary roads that have low levels of traffic and therefore a limited budget. It is proposed to analyze the hydromechanical behavior of a marginal granular material with 18% fine and IP of 15% (MGM3) and a control sub-base with 8.5% fine and IP of 0% (SBG\_C1), for the analysis the curve is determined of compaction, resistance to indirect traction, suction and crushing effect, using four samples with humidity variation, by type of material. From the compaction curves, a specific weight of 19.2 KN and 19.7 KN was established, an optimal humidity of 11.65% and 11.35% for MGM3 and SBG\_C1, in addition, an inversely proportional relationship was established between the resistance to indirect traction and humidity, achieving greater resistance with the MGM3 compared to the SBG\_C1.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Civil Engineering. Director: Alex Eduardo Alvarez Lugo. Civil engineer. Ph.D. Co-director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Civil engineer. Ph.D.

## Introducción

En Colombia, las carreteras constituyen uno de los elementos de infraestructura más importantes para el transporte y el desarrollo económico, ya que la mayor parte de productos agrícolas, industriales, explotación minera y mercancía se transportan mediante vías terrestres por lo que la construcción y mantenimiento de estas es imperativo para el desarrollo del país. Entre las fechas más importantes en la historia de las carreteras en Colombia está el año 1905, en el cual se creó formalmente el Ministerio de Obras Públicas y Transporte; además, en 1994 se estableció el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) con el fin de ejecutar los lineamientos estipulados por el Ministerio de Transportes (Ministerio de Transporte (MT), 2011). De acuerdo con INVIAS, existen dos clasificaciones para las vías, teniendo en cuenta la funcionalidad y el tipo de terreno. La más conocida es aquella basada en funcionalidad, clasificando las vías en tres categorías, vías primarias, vías secundarias, y vías terciarias. Hasta 2017, el país contaba con un total de 204.855 km, de los cuales 142.284 son vías terciarias, vías en las que se enfocará esta investigación dado que representan un 69,5 % del total de las vías del país (Narvaez, 2017).

Entre los mayores problemas que afronta el desarrollo de vías terciarias (o vías de bajo volumen de tránsito) se encuentra su construcción y mantenimiento, dado que son vías que comunican cabeceras municipales y veredas entre sí y debido a su uso son vías con tránsitos bajos, por lo que el presupuesto destinado para estas es limitado. Para reducir el monto de las inversiones, a menudo se opta por reducir los costos en los materiales y se construyen en afirmado. No obstante, los mantenimientos se vuelven frecuentes, condicionados en buena medida por la influencia que tiene el clima (e.g., precipitación). Adicionalmente, los altos costos en materiales se dan porque los materiales granulares presentes en la zona no cumplen con las especificaciones dispuestas por

INVIAS. En busca de alternativas, se estudia la posibilidad de usar material granular marginal (MGM) para la construcción de vías terciarias. No obstante, previo a su uso es necesario analizar las variables que favorecen y que afectan el comportamiento mecánico de los MGM (e.g., grado de saturación, contenido de finos, índice de plasticidad), con el fin de potenciar su capacidad mecánica, generando una alternativa segura para la construcción de vías terciarias y con un costo asequible (Ariza y Romero, 2017).

En Perú, en el año 2007 se realizó una investigación (Espinoza & Benavente, 2020) con el fin de usar MGM para la construcción de una vía entre Arequipa y Moquegua. Inicialmente, se prepararon probetas de concreto hidráulico con resistencia esperada ( $f'c$ ) de 280 Kg/cm<sup>2</sup>, pero gracias al contenido de cenizas volcánicas contenidas en los MGM se potenció la relación entre cemento y agregados con lo que las probetas después 28 días de curado lograron una resistencia de 340 Kg/cm<sup>2</sup> (Espinoza y Benavente, 2020).

Tomando en cuenta los aspectos mencionados, se propone un proyecto global de investigación que realiza una campaña experimental con MGMs, empleando probetas compactadas mediante el método giratorio, con la intención de determinar la resistencia a la tracción indirecta, succión total y efecto crushing mediante ensayos de granulometría. Con el propósito de determinar la influencia del contenido de finos y el índice de plasticidad en el comportamiento hidromecánico del material.

En este proyecto se realiza la campaña experimental para el material MGM3 (con 18% de finos e índice de plasticidad de 15%) y SBG\_C1 (subbase de control con 8.5% de finos e IP de 0%).

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar el comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase MGM3 y subbase de control SBG\_C1.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Establecer las curvas de compactación de los materiales granulares MGM3 y SBG\_C1.

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 después de compactar.

Evaluar la influencia del contenido de humedad de compactación sobre resistencia a la tracción indirecta (TSI) en las muestras granulares identificadas como MGM3 y SBG\_C1.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1 Materiales granulares marginales (MGM)**

Son aquellos materiales que no cumplen con las especificaciones requeridas por una agencia vial. En el caso de Colombia está regido por el INVIAS para ser utilizados en las obras viales, aunque tienen el potencial de ser empleados en otras aplicaciones (Caceres y Rodriguez, 2021).

La normativa colombiana (Art. 320-13 Invias 2012), clasifica los suelos en cuatro grupos específicos (seleccionados, adecuados, tolerables, e inadecuados) dejando a los materiales marginales dentro del grupo de suelos inadecuados generando menos disponibilidad de materiales y mayor desperdicio de estos. Por otro lado, la normativa española, en el Art. 330 del PG-3, clasifica los suelos en cinco grupos específicos (seleccionados, adecuados, tolerables, marginales, e inadecuados) en función de las siguientes características: plasticidad, contenido de materia orgánica, colapsabilidad, expansividad, contenido de sales solubles, contenido de yeso, y granulometría (Caceres y Rodriguez, 2021).

### **2.2 Estabilización de materiales granulares**

La estabilización de un material es proceso que tiene como objetivo potenciar la calidad del material natural, obteniendo características físicas, químicas y mecánicas necesarias, teniendo en cuenta condiciones ambientales y de servicio. Entre las propiedades que se pueden alterar en los materiales con procesos de estabilización están: controlar la expansión, incrementar la resistencia, reducir la plasticidad, disminuir la permeabilidad, prevenir la erosión, incrementa la capacidad de soporte, aumentar la resistencia al corte entre otras propiedades. Existen diversos

métodos de estabilización que pueden clasificarse en estabilización mecánica, física y química o biológica (Rivera et al.,2020)

La estabilización mecánica consiste en aumentar la densidad, resistencia mecánica, disminuir porosidad y permeabilidad de un material por medio de compactación dinámica o estática. La compactación depende de la energía aplicada y la gradación del material, el grado de compactación es dependiente del porcentaje de humedad y se mide con el peso unitario seco (Rivera et al.,2020).

La estabilización física modifica las propiedades de los materiales interviniendo algunas propiedades para aportarle características estructurales nuevas al material granular. De los procedimientos más comunes es el uso de materiales geosintéticos como; geomallas, geomembranas láminas poliméricas impermeables. Estos elementos tienen como objetivo aislar y confinar los materiales mejorando la estabilidad y controlando la erosión (Rivera et al.,2020).

En la estabilización química se añaden productos químicos que modifican las propiedades de los materiales granulares por medio de una reacción fisicoquímica o con la aglomeración de partículas. Este tipo de estabilización incluye una amplia gama de estabilizantes entre los cuales el cemento y la cal son los más convencionales; sin embargo, existen otros productos como sales, escorias de alto horno, cenizas volantes que han mostrado resultados favorables dependiendo el tipo de suelo y la propiedad que se quiera mejorar (resistencia al corte, CBR, resistencia a la compresión, índice de plasticidad, módulo de elasticidad y durabilidad a ciclos de deshielo entre otras) (Rivera et al.,2020).

La estabilización biológica consiste en aumentar el grado de aglutinamiento y compactación de partículas de material mediante la adición de enzimas biológicas, este aumento se

da como consecuencia de un intercambio catiónico en la estructura del material generando procesos de cementado rápido (Rivera et al.,2020).

### **2.3 Índice de plasticidad**

Medida de la plasticidad de un suelo dado por el valor absoluto del rango de humedad en el que el suelo se comporta como un material plástico, numéricamente el índice de plasticidad es igual a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2013).

### **2.4 Método giratorio de compactación**

Este método consiste en la aplicar una fuerza de compresión a la muestra a compactar, mientras gira con un ángulo de inclinación con respecto al eje vertical, asemejando los procesos constructivos en obra (Fernanda y González, 2007).

En 1939 se desarrollaron las primeras compactaciones a mezclas asfálticas con un equipo giratorio en el Texas Highway Institute. Luego en 1987 se construyó el compactador giratorio LCPC en Francia, con los equipos en producción en la década de los noventa el programa de Investigación de Carreteras Estratégicas impulso un estudio en mezclas asfálticas, el cual permitió establecer la metodología Superpave usada en la actualidad, esta metodología estableció los valores de presión vertical en 600 KPa, ángulo de giro en 1.25 grados y velocidad de giro en 30 rpm (Fernanda y González, 2007).

### **2.5 Locking Point**

Locking Point fue desarrollado por el departamento de carreteras de Illinois, EE. UU para evitar la sobrecompactación de las mezclas durante la compactación giratoria. Se define como el giro a partir del cual la compactación resulta en la degradación de los agregados y poca

densificación adicional, este concepto se desarrolló a partir de la recolección de datos de mezclas Marshall y Superpave durante 3 años (NASCIMENTO, 2008).

VAVRIK y CARPENTER en 1998 definieron el Locking point como el primer giro de una secuencia de 3 giros de la misma altura, precedidos por 2 pares de giros de la misma altura (NASCIMENTO, 2008).

## **2.6 Ensayo de tracción indirecta**

El ensayo de tracción indirecta es un ensayo brasileño que permite obtener la resistencia a tracción de materiales frágiles, como el hormigón, la roca y materiales similares a rocas. Este ensayo simula la condición de tensiones en la fibra inferior de la probeta a ensayar, aplicando una carga vertical diametral a lo largo de dos generatrices opuestas, provocando un esfuerzo de tracción uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y así llevarla a rotura, con el objetivo de conocer la carga a compresión diametral máxima que soporta (Villar, 1965).

## **2.7 Suelo parcialmente saturado**

El suelo puede constituir un sistema de dos fases: partículas sólidas-agua y partículas sólidas-aire, pero también existe el caso intermedio donde el suelo está parcialmente saturado, en el cual se involucra tres fases: partículas sólidas-agua- aire. Los suelos en esta condición se encuentran entre la zona del suelo seco y la franja capilar (franja más cercana al nivel freático) donde el agua y el aire ocupan los poros del suelo de forma continua y el grado de saturación es menor a 100%. Debido a esto, la presión ejercida en los poros del suelo es negativa, causado por la diferencia de presión entre ambas fases (agua-aire) (Meza, 2012).

## **2.8 Succión**

Se define como la cantidad de energía asociada a la capacidad del suelo para retener agua. La succión se puede expresar en función de dos componentes, la succión matricial (diferencia entre

la presión de aire de poros y la presión de agua de poros) y la succión osmótica (asociada a la presencia de sales disueltas en el agua) (Meza, 2012). La succión total tiene unidades de presión y su ecuación es:

$$St = Sm + Sosm \quad (Ec. 1)$$

$$Sm = ua - uw \quad (Ec. 2)$$

Donde  $St$  es la succión total,  $Sm$  es la succión matricial,  $Sosm$  es la succión osmótica,  $uw$  es la presión del agua en los poros y  $ua$  es la presión del aire en los poros.

En la práctica geotécnica, la succión total se da en términos de la succión matricial ya que la mayoría de los problemas ingenieriles son el resultado de cambios ambientales, mientras que la succión osmótica es relevante al comportamiento del suelo en casos donde se presentan sales por efecto de contaminación química (Meza, 2012).

## 2.9 Grado de saturación

Se define como la relación entre el volumen del agua y el volumen de vacíos. Usualmente se expresa como un porcentaje del volumen de poros que está ocupado por el agua (“Grado de Saturación”, 2020).

$$Sr = Vw/Vv * 100(\%) \quad (Ec. 3)$$

Donde  $Sr$  es el grado de saturación,  $Vw$  es el volumen del agua y  $Vv$  es el volumen de vacíos.

## 2.10 Ensayo Papel Filtro

Este ensayo permite la medición del contenido de agua presente en un papel filtro que se encuentra en contacto o equilibrio con la humedad presente en el suelo dentro de un recipiente hermético (INVIAS, 2013).

Esto permite evaluar la succión matricial y total del suelo, por ende, se puede determinar de forma indirecta la succión osmótica, una medición de energía libre del agua de los poros o esfuerzo de tensión que ejerce los poros por la matriz de suelo sobre el agua (INVIAS, 2013).

### 3. Metodología

#### 3.1 Proyecto global

Este proyecto hace parte de un proyecto global que realiza una campaña experimental con MGMs, con el propósito de determinar la influencia del contenido de finos y el índice de plasticidad en el comportamiento hidromecánico del material, en la tabla 1 se presenta los tipos MGMs a analizar en el proyecto global. Dado lo anterior, en este proyecto se realiza la campaña experimental para el material MGM3 (con 18% de finos e índice de plasticidad de 15%) y SBG\_C1 (subbase de control con 8.5% de finos e IP de 0%).

**Tabla 1**

*Tipos de MGMs*

Material	%Finos	%IP
MGM1	18	8
MGM2	18	12
<b>MGM3</b>	<b>18</b>	<b>15</b>
MGM4	21	8
MGM5	21	12
MGM6	21	15
MGM7	24	8
MGM8	24	12
MGM9	24	15
<b>SBG_C1</b>	<b>8.5</b>	<b>0</b>

Para la fabricación de probetas y almacenamientos de datos se estableció la siguiente codificación: para el material granular marginal MGM3\_18\_15, donde el 18 hace referencia al porcentaje de finos y el 15 hace referencia al índice de plasticidad, el segundo material que es el de control se codifica como SBG\_C1\_8.5\_0, donde el 8.5 hace referencia al porcentaje de finos y el 0 hace referencia al índice de plasticidad.

### **3.2 Propiedades y procedencia de material granular y otros materiales**

Con el fin de obtener las mezclas con las características de índice de plasticidad que se propone estudiar se usa un material granular principal (material de cantera) que aporta la mayor parte de la granulometría de las mezclas y 3 materiales (bentonita, caolinita y material triturado) de los que se usa la fracción que pasa el tamiz No.200 y permiten ajustar el índice de plasticidad de la mezcla.

#### **3.2.1 Material de cantera y triturado**

El material de cantera y triturado provienen de la cantera Paviandi que se encuentra en el kilómetro 4,5 vía Piedecuesta – Aratoca, Santander. El material de cantera se extrae directamente del yacimiento de Paviandi, tiene un valor de DMA de 60.73%, pérdida por sulfatos de 3.70%, un equivalente de arena de 48% y en su fracción fina (pasa tamiz No.200) presenta un índice de plasticidad de 11%. El material triturado es la fracción fina que resulta de la trituración de la roca en la planta asfáltica de la cantera Paviandi, y presenta un índice de plasticidad nulo.

Si bien el valor de DMA del material de cantera supera la especificación del Invias con un valor mayor al 50%, se toma como material de control haciendo énfasis en que este satisface las especificaciones Invias para los aspectos asociados a plasticidad y contenido de finos. En investigaciones futuras se caracterizará un material de control que satisfaga la totalidad de especificaciones Invias para subbase de bajo tránsito (INVIAS, 2013).

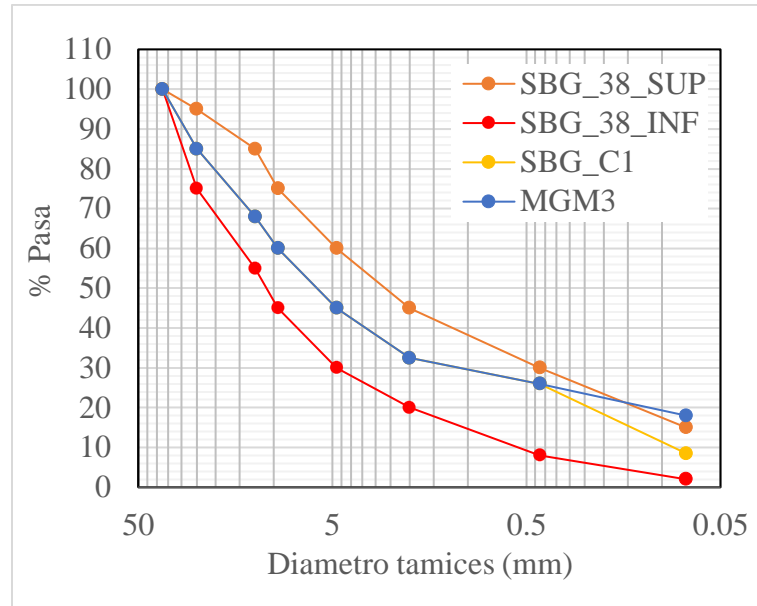
### 3.2.1 Caolinita y bentonita

La caolinita y bentonita se obtuvieron con la empresa Comercial Fox S.A.S con sede en la vía Mosquera – Soacha, Cundinamarca, la fracción fina de estos materiales que se usa en las mezclas de material para el proyecto, presenta un IP de 360% para la bentonita y 11,68% para la caolinita.

### 3.3 Granulometría

Debido que el material de cantera en estado natural no tiene una granulometría homogénea se realiza un tamizado inicial de todo el material a usar separándolo en fracciones retenidas en los tamices (1", ½", 3/8", No.4, No.10, No.40, No.200 y pasa No.200) con el fin de realizar mezclas con granulometría controlada.

Se toma como referencia la granulometría de una subbase granular clasificada en artículo 312 de las especificaciones de INVIAS como SBG-38 (INVIAS, 2013), se establecen los porcentajes de material que pasa los tamices que conforman la granulometría de la mezcla manteniendo los valores dentro de los rangos que se especifican para la SBG-38, excepto para el porcentaje que pasa el No.200 del MGM3 que corresponde a un 18% de finos, para la SBG\_C1 se establece un 8,5% de finos cumpliendo totalmente con la granulometría para una SBG-38 ya que es el material de control, las curvas granulométricas se pueden observar en la figura 1.

**Figura 1***Curvas Granulométricas*

Con la curva granulométrica establecida se calculan los porcentajes retenidos en cada tamiz para cada mezcla y se determina la masa seca requerida para cada probeta con su respectiva granulometría, para el cálculo de la masa seca se usa como base una altura de 0.2 m y un diámetro de 15 cm para la probeta, y se propone una densidad seca inicial de 20 KN/m<sup>3</sup>.

### 3.4 Mezclas de fracción fina

Para generar las mezclas con los índices de plasticidad que se desean analizar, se debe realizar una combinación de la fracción pasa No.200 de 4 materiales (caolinita, bentonita, cantera y triturado), cada uno con sus proporciones adecuadas teniendo en cuenta el índice de plasticidad requerido y de cada material.

Para el MGM3 que tiene un IP 15%, se realizan ensayos de Atterberg de acuerdo con la norma INV E-125 y INV E-126 a 5 mezclas de fracción fina las cuales se les varía el porcentaje de bentonita que se agrega a una mezcla que ya contiene 50% de material de cantera y 50% de

caolinita, con los resultados de IP de las mezclas se determina una relación entre IP y porcentaje de bentonita, la cual permite calcular las proporciones a mezclar de cada material para obtener una mezcla con IP de 15%.

En el caso de la SBG\_C1 que debe tener un IP menor que 6% y limite líquido menor que 25% para cumplir con especificaciones del INVIAS para subbase granular (INVIAS, 2013), se realizaron ensayos de Atterberg a mezclas de fracción fina de material de cantera y triturado variando el porcentaje de triturado para determinar relación del IP con porcentaje de triturado y de limite liquido con porcentaje de triturado.

### **3.5 Compactación**

Para obtener la curva de compactación se fabrican 4 probetas de 15 cm de diámetro por material con diferente humedad usando el compactador giratorio Superpave el cual compacta con los siguientes parámetros; presión vertical de 600 KPa, ángulo de giro de 1.25 grados y velocidad de giro 30 rpm.

Antes de realizar la compactación se secan las fracciones de material en el horno a  $110 \pm 5$  °C durante 18 a 24 h para obtener masa seca, luego se realiza la mezcla de las fracciones dependiendo la granulometría en estudio, seguido se adiciona el agua dependiendo de la humedad que se plantee para cada probeta y se homogeniza por medio de una mezcladora, el proceso de mezclado tarda alrededor de 5 minutos, como fase final del proceso de mezclado se almacena el material para cada probeta en bolsas de cierre hermético y se deja en proceso de curado durante 18 a 24 horas, con el fin de generar absorción de agua para todos los materiales y tener la plasticidad real del material durante el proceso de compactación.

Finalizado el proceso de mezclado se compacta, como paso inicial se extraen 200 g de la mezcla para medir humedad y se realiza control de la masa a compactar, después se coloca el

material en el molde en 3 capas verificando que no se presente acumulación de partículas gruesas, finalmente se lleva el molde a compactar y finalizado el proceso de compactación se aísla la probeta con papel vinipel y se almacena en cavas para conservar la humedad.

### 3.6 Ensayo de tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta se realiza con un cabezal de Lottman adaptado a una prensa MTS-647, permitiendo determinar la carga a compresión diametral máxima que soporta un material en específico, este proceso se lleva a cabo de acuerdo con la norma NLT-346/90 ( Normas de Laboratorio de Transportes (NLT), 1990).

Para ejecutar el ensayo se coloca la probeta en medio de las franjas transmisoras de carga garantizando el paralelismo, luego se ubica la mitad de un tubo de PVC de 6” a cada lado de las franjas para evitar dejar caer las dos partes de la probeta fallada y conservar su superficie de falla, finalmente se aplica la carga con una velocidad de 50,8 mm/min hasta la rotura de la probeta.

Finalmente, con los datos obtenidos en el ensayo y la ecuación 1 se calcula la resistencia a la tracción indirecta para cada muestra (NLT, 1990).

$$RTI = (2 * P)/(\pi * h * d) \quad (Ec 4)$$

Donde:

RTI = Resistencia a la tracción indirecta, (N/mm<sup>2</sup>).

P = Carga máxima de rotura, (N).

$\pi$  = Constante 3.14159...

h = Altura de la probeta, (mm).

d = Diámetro de la probeta, (mm).

### **3.7 Toma de imágenes 2D y 3D**

Para el desarrollo de la adquisición de imágenes 2D y 3D de probetas MGM se realizan tres fases, las imágenes 2D se tomaron con la ayuda de una cámara de 20,1 mega pixeles, un fondo negro e iluminación con luz led blanca; las imágenes 3D se tomaron con un Kinect de Xbox 360 controlado por el software SKD versión 1.8 de Microsoft para Windows.

La primera fase se realiza antes de la tracción indirecta como modelo de entrada, con tomas de la vista superior y frontal de la probeta ubicando la cámara a una distancia de 16 cm de la probeta, un fondo negro e iluminación con luz led blanca.

La segunda fase se realiza después de que la probeta MGM es fallada por tracción indirecta, con tomas en ambas superficies de falla en la probeta y usando el proceso anteriormente descrito.

Finalmente, la fase tres se realiza la adquisición de las imágenes 3D de las dos superficies de falla de la probeta ubicando el Kinect a una distancia de 68 cm de la probeta.

El análisis de las imágenes esta fuera del alcance de este proyecto, se realiza con el fin de recolectar datos para el proyecto global el cual llevara a cabo el análisis en un futuro, por lo tanto, las imágenes y el protocolo para la toma de las mismas se incluirán como un anexo en este proyecto.

### **3.8 Medición de succión total**

El método de papel filtro para medir la succión total se ejecuta de una fracción de suelo compactada luego del ensayo de tracción indirecta, este procedimiento está basado en la norma INV E-159-13 (INVIAS, 2013) y ASTM D 5298-16 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2016).

Inicialmente se seca el papel filtro en recipientes de aluminio en un horno durante 16 a 24 horas a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ , posteriormente se almacenan en bolsas herméticas.

Se coloca una muestra de suelo fallada libre de fragmentos de 300 a 400 g de masa en un recipiente hermético, sobre la muestra se coloca un disco de acrílico perforado de 6 cm de diámetro y 0.5 cm de espesor, posteriormente el papel filtro se coloca sobre el disco perforado y arriba de este un disco de acrílico sin perforar, esto con el fin de que no haya contacto entre la muestra y el papel filtro, y así se pueda realizar la correcta medición de succión total, después se almacena el recipiente hermético que contiene la muestra de suelo en una cava durante 7 días para que se alcance el equilibrio de humedad entre la muestra y el papel filtro.

Terminado el periodo de equilibrio de humedad se determina la masa de la bolsa plástica hermética donde se va a depositar el papel filtro con una precisión de 0.0001 g, se transfiere el papel filtro a la bolsa plástica lo más rápido posible para disminuir la pérdida de humedad y se determina la masa nuevamente de la bolsa plástica con el papel filtro en su interior, posteriormente se extrae el papel filtro para ponerlo a secar en un horno mínimo 2 horas a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ , luego del secado se introduce el papel filtro en una bolsa plástica y se determina la masa total, se extrae el papel filtro de la bolsa y se determina la masa de la bolsa plástica.

### **3.9 Granulometría final**

Para el desarrollo de la granulometría final se utilizó el material de la probeta ensayada en la tracción indirecta sin contar con los 200 a 300 g usados para la medición de succión, esto con el objetivo de analizar el cambio de la granulometría del material de cada probeta, luego de someterse a compactación y ensayo de tracción indirecta. Como paso inicial se mide la masa de material disponible, luego se seca el material en un horno durante 24 horas a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ , posteriormente se lava el material para retirar los finos adheridos a las gravas y nuevamente se vuelve a secar durante 24 horas y se realiza control de masa para cuantificar el contenido de finos.

Terminadas las 24 horas se saca el material del horno y se deja reposar para luego tamizarlo de forma mecánica durante 5 minutos, se determina la masa de cada fracción retenida en cada tamiz con una precisión de 0,1g.

## 4. Resultados

### 4.1 Granulometría

De acuerdo con lo descrito en la sección 3.3 se estableció una masa seca de 7269g para cada probeta, en las tablas 2 y 3 se prestan las fracciones de masa retenida en cada tamiz para realizar la mezcla de una probeta de MGM3 y SBG\_C1.

**Tabla 2**

*Granulometría MGM3*

<b>Material</b>	<b>MGM3</b>		
<b>Tamiz</b>	<b>% Pasa</b>	<b>% Retenido acumulado</b>	<b>Masa retenida (g)</b>
<b>1" 1/2"</b>	100%	0%	0
<b>1"</b>	85%	15%	1090
<b>1/2"</b>	68%	32%	1236
<b>3/8"</b>	60%	40%	582
<b>No. 4</b>	45%	55%	1090
<b>No. 10</b>	33%	68%	909
<b>No. 40</b>	26%	74%	472
<b>No. 200</b>	18%	82%	582
<b>Fondo</b>	0%	100%	1308
<b>Total</b>			7269

**Tabla 3***Granulometría SGB\_C1*

Material	SBG_C1			
	Tamiz	% Pasa	% Retenido acumulado	Masa retenida (g)
1" 1/2"	100%	0%		0
1"	85%	15%		1090
1/2"	68%	32%		1236
3/8"	60%	40%		582
No. 4	45%	55%		1090
No. 10	33%	68%		909
No. 40	26%	74%		472
No. 200	8.5%	92%		1272
Fondo	0%	100%		618
Total				7269

#### 4.2 Mezclas de fracción fina

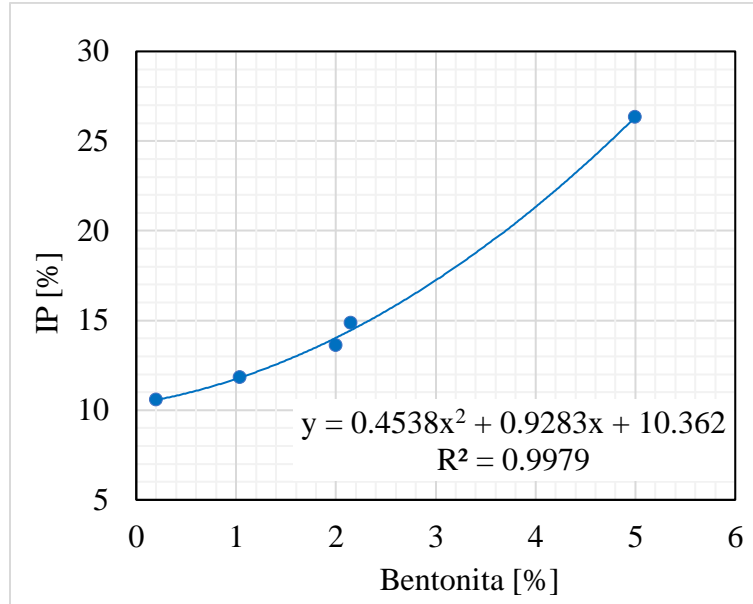
Los valores de índice de plasticidad con respecto al porcentaje de bentonita realizados a las mezclas como se indicó en la sección 4.3, para determinar las proporciones de bentonita, caolinita y material de cantera se presentan en la tabla 4 y figura 2, con estos datos se determinó la ecuación 5 que representa la relación entre el IP y porcentaje de bentonita.

**Tabla 4***Resultados IP para mezclas de bentonita, caolinita y material de cantera.*

Bentonita [%]	Caolinita [%]	Cantera [%]	LL [%]	LP [%]	IP [%]
0.20	49.90	49.90	39.75	29.17	10.58
1.04	49.48	49.48	39.97	28.15	11.83
2.00	49.00	49.00	42.99	29.37	13.62
2.15	48.93	48.93	44.34	29.49	14.85
5.00	47.50	47.50	53.56	27.22	26.34

**Figura 2**

*IP vs Bentonita*



$$IP = 0.4538 * \% bentonita^2 + 0.9283 * \% bentonita + 10.362 \quad (Ec. 5)$$

Empleando la ecuación 5 se determinó el porcentaje de bentonita, necesario para obtener una mezcla con IP de 15% que corresponde al MGM3, el porcentaje restante de la mezcla es conformado por caolinita y bentonita en la igual proporción, los valores de porcentajes para cada material se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Proporciones para mezcla de finos de MGM3*

Fondo [g]	IP [%]	Cantera		Caolinita		Bentonita	
		%	g	%	g	%	g
1308	15	48.83	639	48.83	639	2.34	31

Para la mezcla de finos del SBG\_C1 se buscó replicar el proceso anterior, los resultados de índices de plasticidad para tres mezclas de material de cantera y triturado se presenta en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Resultados de IP para mezclas de material de cantera y triturado*

Cantera [%]	Triturado [%]	LL [%]	LP [%]	IP [%]
73	27	34	28	6
80	20	33	26	7
90	10	36	26	10

Teniendo en cuenta la necesidad de cumplir con un límite líquido menor que 25% y como no se observó una tendencia favorable con las primeras tres mezclas se realizaron cuatro mezclas más con 55%, 60%, 70% y 80% de triturado las cuales mostraron que para mezclas con porcentajes mayores a 55% de triturado la mezcla tiene un comportamiento no líquido y no plástico, por lo anterior se estableció un 60 % de triturado para la mezcla de finos del SBG\_C1 como se muestra en la tabla 7.

**Tabla 7**

*Proporciones para mezcla de finos de SBG\_C1*

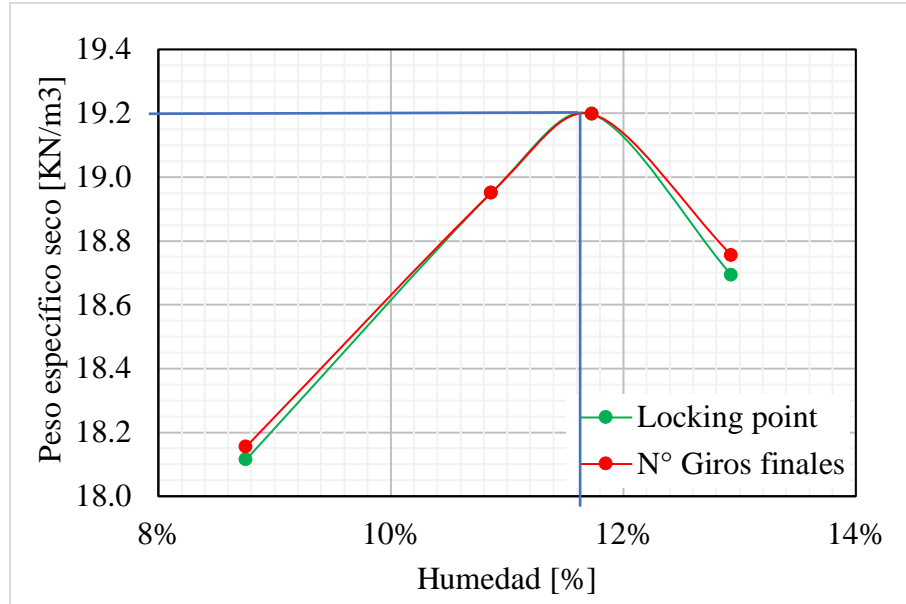
Fondo [g]	IP [%]	Cantera		Triturado	
		%	g	%	g
618	0	40	247	60	371

### 4.3 Compactación

En las figuras 3 y 4 se presentan las curvas de compactación de peso específico seco vs humedad de cada material MGM3 y SBG\_C1.

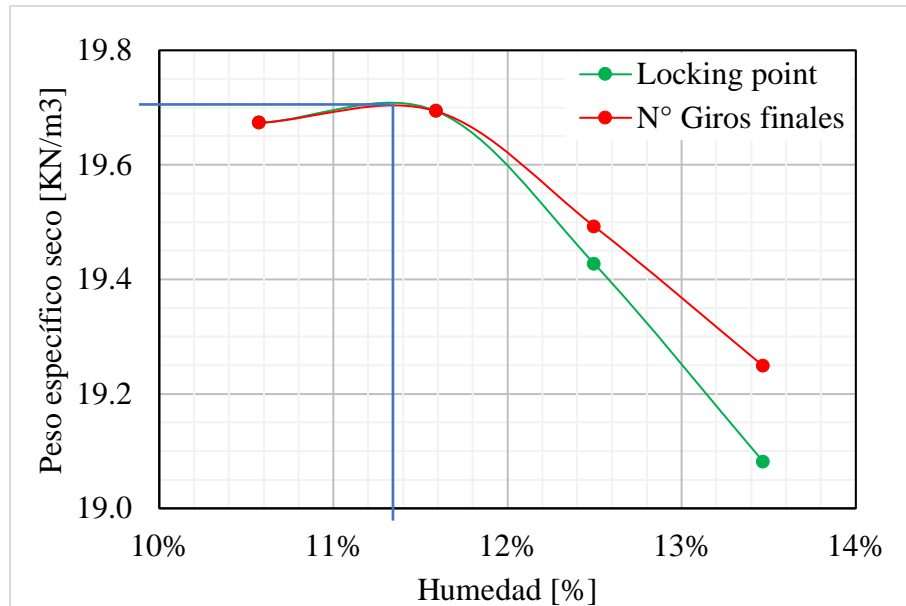
**Figura 3**

*Curva de compactación del material MGM3*



**Figura 4**

*Curva de compactación del material SBG\_C1*

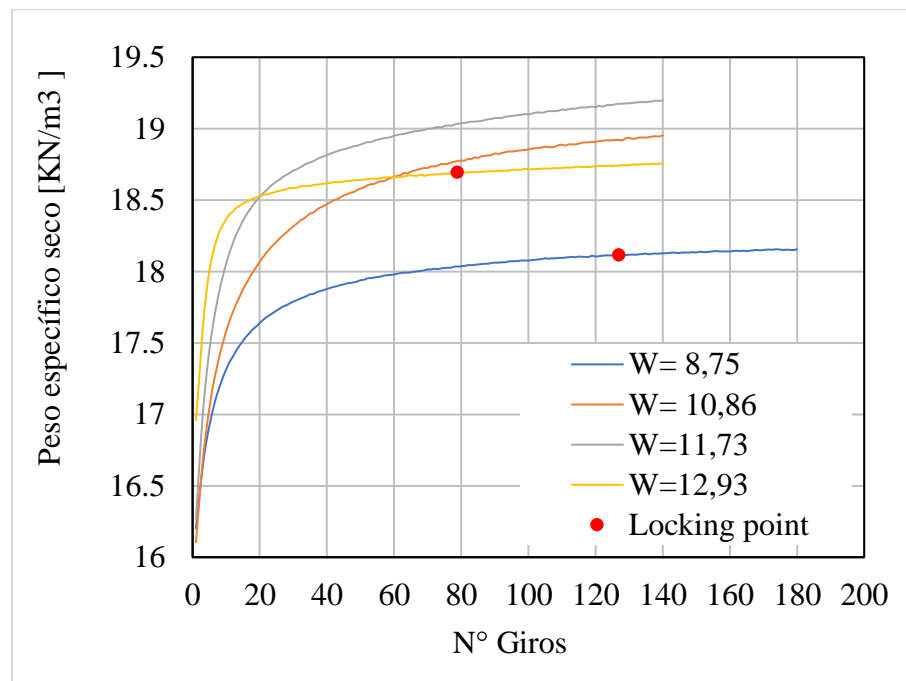


Tomando en cuenta las curvas de compactación se obtiene un peso específico seco máximo de 19.2 KN/m<sup>3</sup> y humedad óptima de 11.65% para el MGM3, y un peso específico seco máximo de 19.7 KN/m<sup>3</sup> y humedad óptima de 11.35% para el SBG\_C1. De lo anterior resalta que el SBG\_C1 tiene un peso específico seco máximo mayor que el MGM3 y una humedad óptima de compactación menor, además en las gráficas 3 y 4 se observa que el peso específico seco del material MGM3 es afectado en mayor proporción por la humedad que para el material SBG\_C1.

En las figuras 5 y 6 se presentan los resultados de peso específico seco vs número de giros de cada una de las probetas compactadas para el material MGM3 y SBG\_C1, adicionalmente se presenta el locking point para las curvas que lo presentaron.

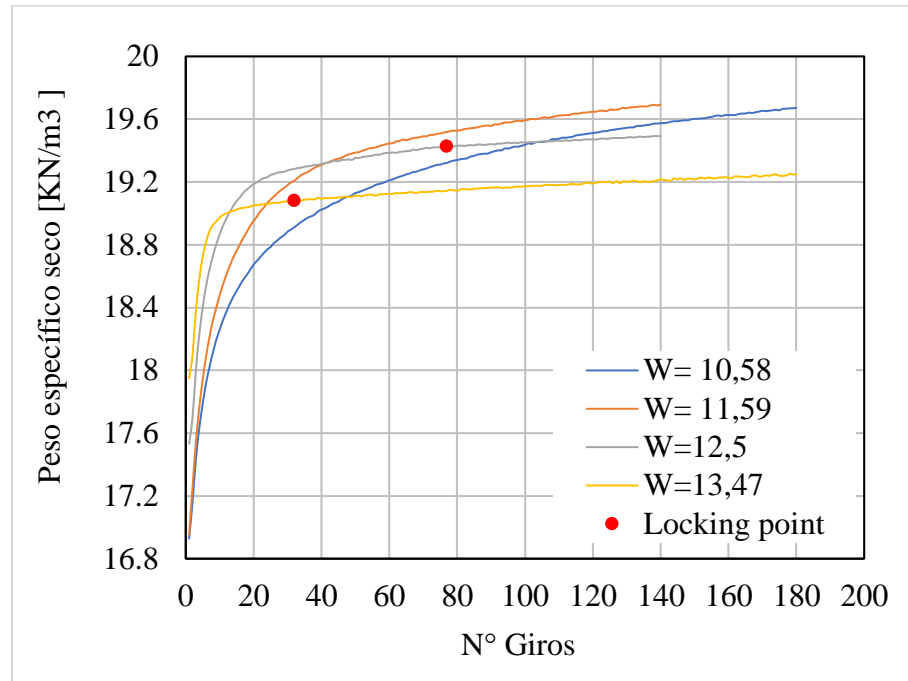
**Figura 5**

*Peso específico vs N<sup>a</sup> de giros material MGM3*



**Figura 6**

*Peso específico vs N° de giros material SBG\_C1*



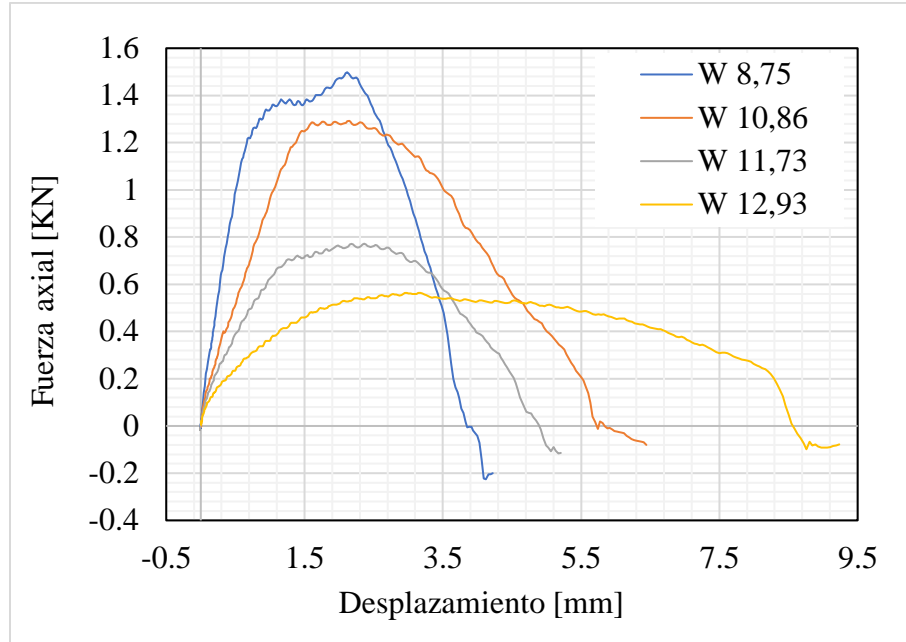
Con base en las figuras 5 y 6 se puede afirmar que para todas las probetas tanto de MGM3 y SBG\_C1 se alcanza la mayor parte de la compactación a los 20 giros alrededor de un 90 % del peso específico seco logrado con la totalidad de los giros aplicados, otro aspecto a resaltar es que solo fue posible alcanzar el locking point en dos de las cuatro probetas de cada material en estudio.

#### 4.4 Tracción indirecta

En las figuras 7 y 8 se presentan los datos de fuerza axial vs desplazamiento para las probetas de MGM3 y SBG\_C1.

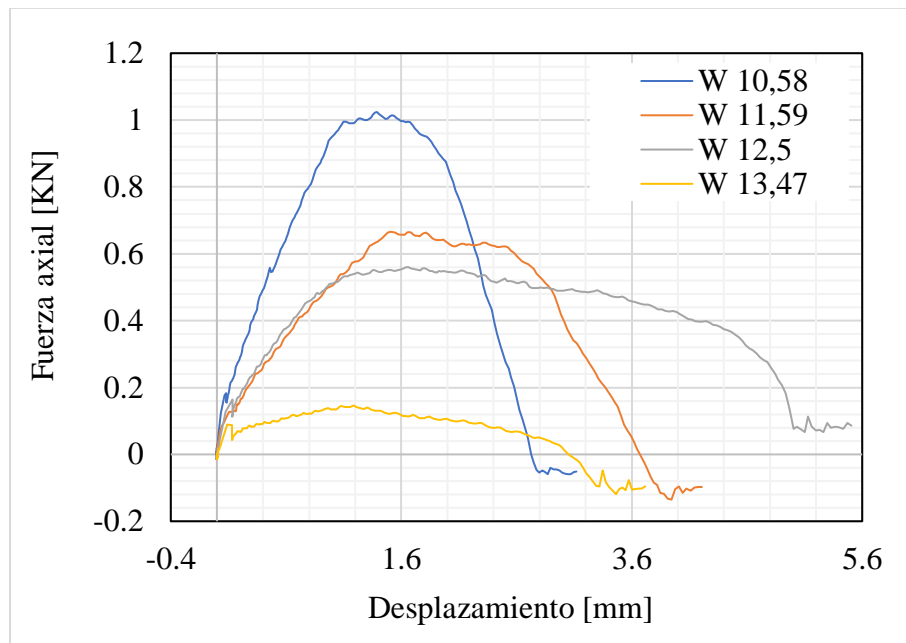
**Figura 7**

*Fuerza axial vs desplazamiento del material MGM3*



**Figura 8**

*Fuerza axial vs desplazamiento del material SBG\_C1*

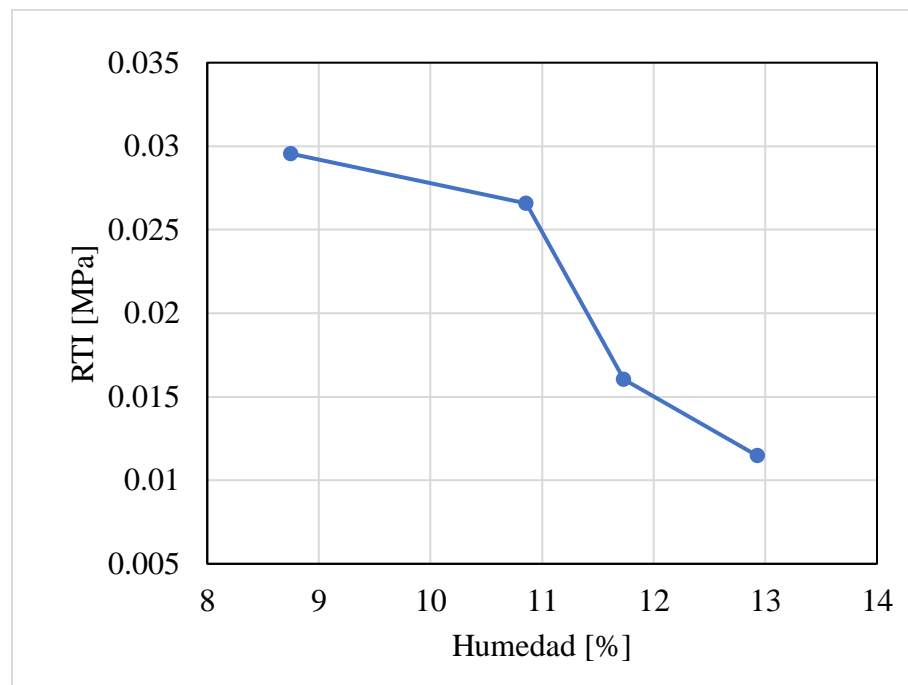


En las figuras 7 y 8 se puede observar que a mayor humedad en la probeta menor es la fuerza axial máxima que soporta la probeta, además la probeta SBG\_C1 de humedad 12.5% y la probeta de 12.93% de MGM3 se obtiene el mayor desplazamiento antes de la falla.

En las figuras 9 y 10 se presenta los valores de resistencia a la tracción indirecta vs humedad para el material MGM3 y SBG\_C1.

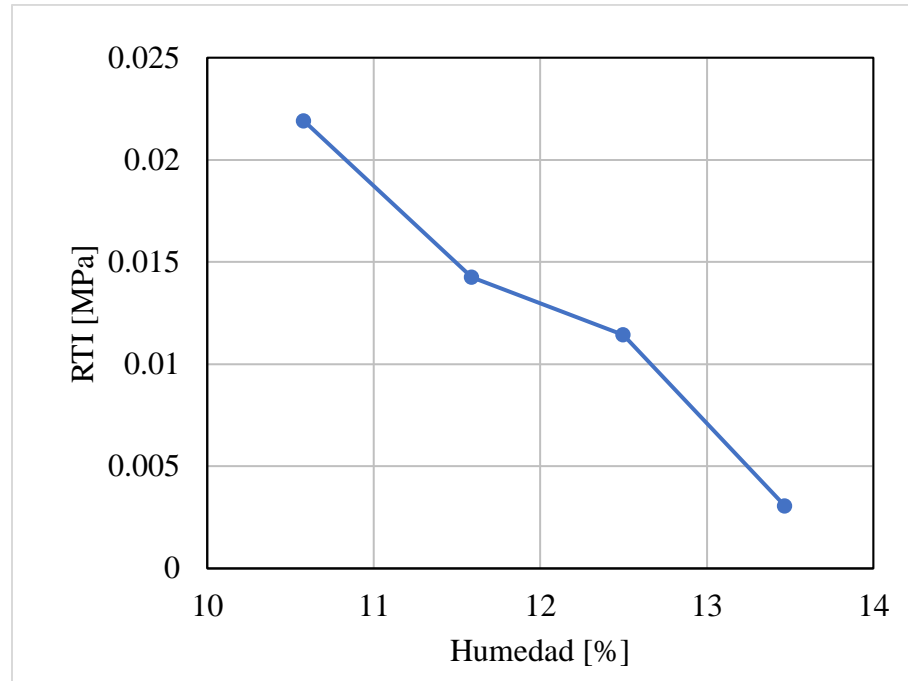
### Figura 9

*Resistencia a la tracción indirecta del material MGM3*



**Figura 10**

*Resistencia a la tracción indirecta del material SBG\_C1*



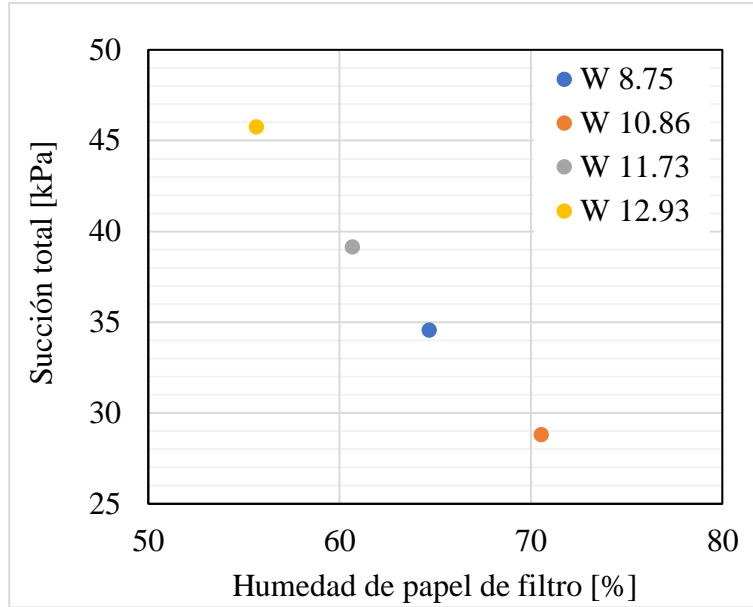
Las figuras 9 y 10 muestran una relación inversamente proporcional entre las dos variables, donde a mayor humedad menor resistencia a la tracción indirecta, con una pérdida de resistencia para el MGM3 de más del 50% y para el SBG\_C1 de más del 80%, entre la probeta de menor y mayor humedad, también se evidencia mayor resistencia en el material MGM3 para un mismo porcentaje de humedad.

#### **4.5 Medición de succión**

En las figuras 11 y 12 se presenta los datos obtenidos de la medición de succión total del material MGM3 y SBG\_C1.

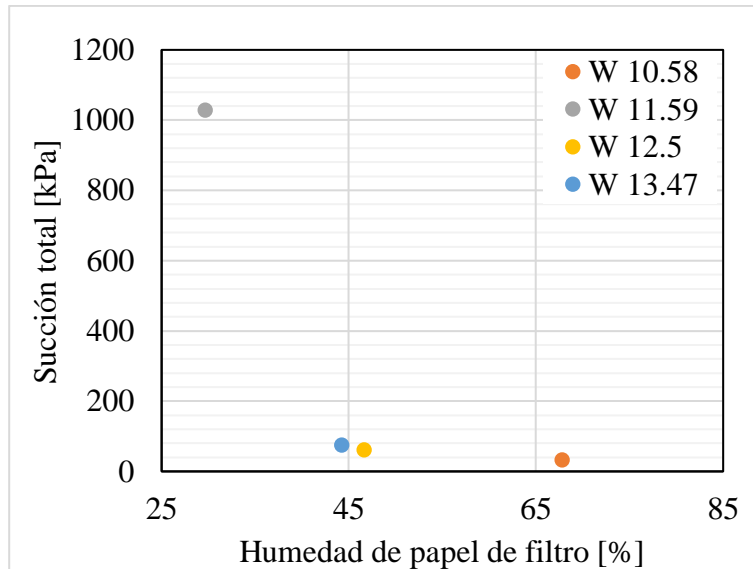
**Figura 11**

*Curva de retención del material MGM3*



**Figura 12**

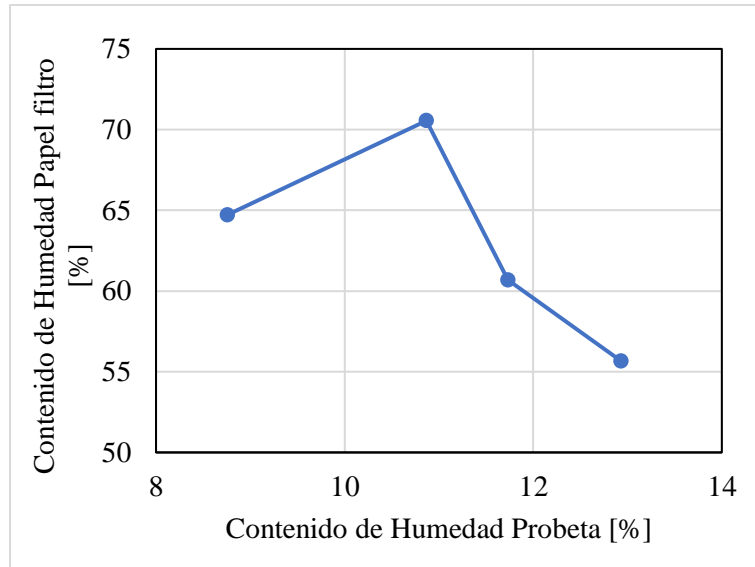
*Curva de retención del material SGB\_C1*



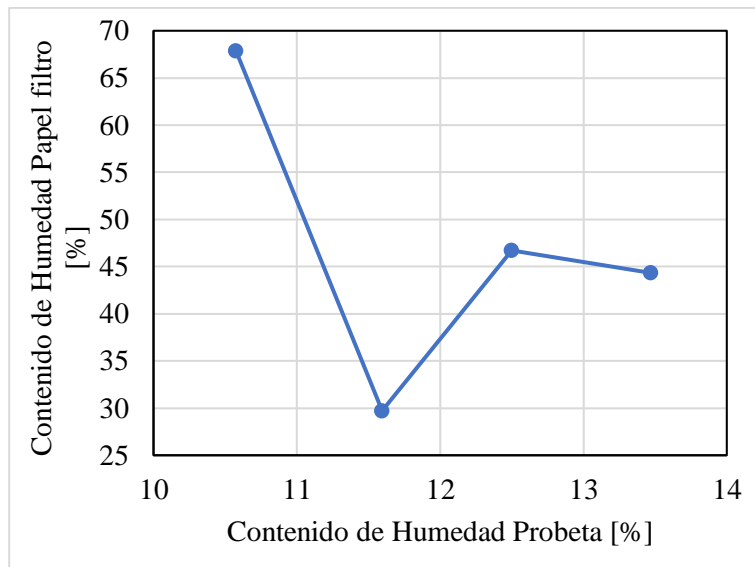
En las figuras 13 y 14 se presentan los datos de contenido de humedad del papel filtro vs el contenido de humedad de compactación de cada probeta para el material MGM3 y SGB\_C1.

**Figura 13**

*Humedad Probeta vs Humedad Papel filtro del material MGM3*

**Figura 14**

*Humedad Probeta vs Humedad Papel filtro del material SBG\_C1*



En las figuras 11 y 12 se evidencia una tendencia errónea en la humedad del papel filtro con respecto a la humedad de compactación de cada probeta, ya que en teoría a mayor humedad

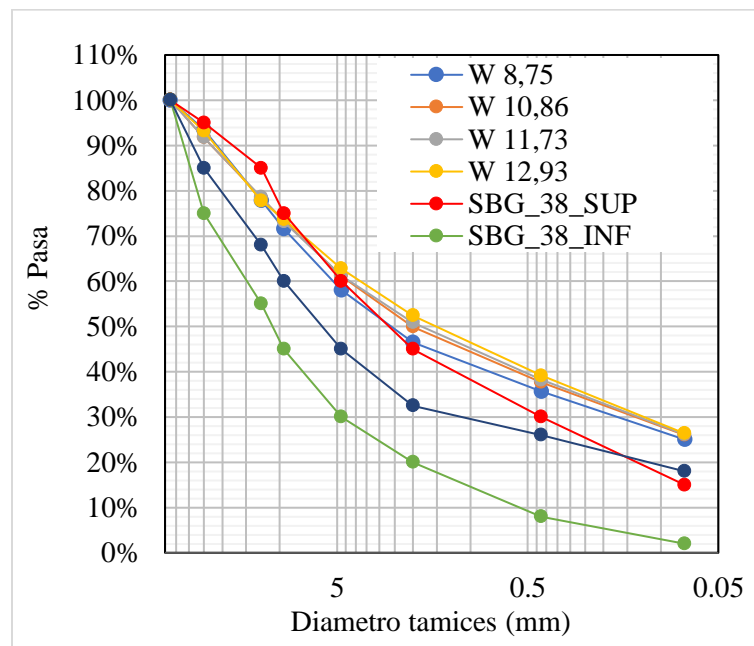
de la probeta mayor humedad del papel filtro, este comportamiento se puede ver con mayor detalle en las figuras 13 y 14, además en la figura 12 se presenta un dato atípico de succión para la probeta de material SBG\_C1 con humedad de 11.59 %, lo anterior indica que el proceso de estabilización de humedad de la muestra con el papel filtro no se dio como se esperaba si no que hubo pérdidas y ganancias de humedad en los recipientes a causa de falta de sellado y aislamiento de los mismos.

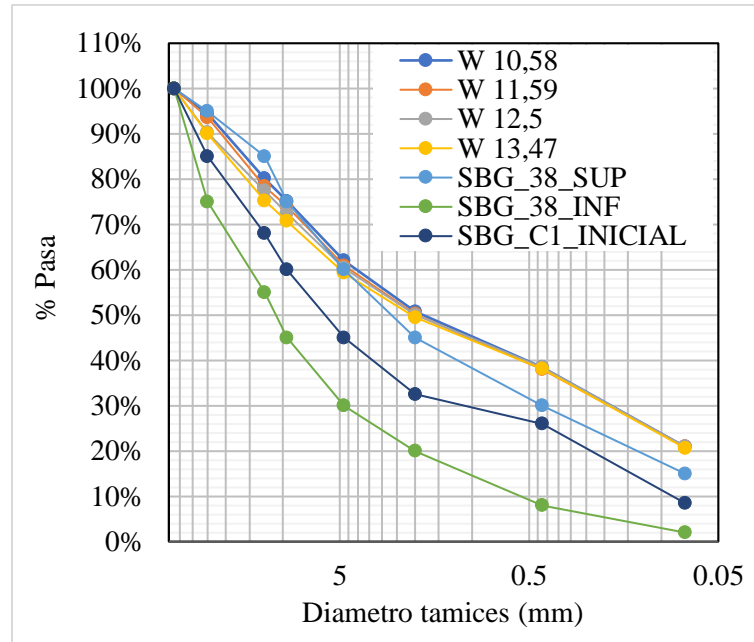
#### 4.6 Granulometría final

En las figuras 15 y 16 se presentan la granulometría post ensayo de las probetas de MGM 3 y SBG\_C1.

#### Figura 15

*Granulometría final del material MGM3*



**Figura 16***Granulometría final del material SBG\_C1*

Las figuras 15 y 16 muestran un aumento de los porcentajes que pasan en comparación de la granulometría inicial, evidenciándose una degradación del material por procesos de mezclado, compactación y ensayo de tracción indirecta con mayor impacto en las muestras de mayor humedad en el caso del MGM3 y menor impacto en las muestras de mayor humedad para el SBG\_C1, además se evidencia un mayor aumento en el porcentaje de finos en material SBG\_C1 que en el material MGM3, pasando de 8.5% a alrededor de 21% para el SBG\_C1 y de 18% a alrededor del 25% en el caso del MGM3.

## 5. Conclusiones

El MGM3 muestra un comportamiento más favorable que el SBG\_C1, ya que tiene mayor resistencia a la tracción indirecta además menor pérdida de la misma con el aumento de humedad presente en el material, otro punto a favor del MGM3 es que presenta menor aumento de la fracción fina que el SBG\_C1. A pesar de que tiene menor peso específico seco que el SBG\_C1 (material de control).

Con los datos obtenidos en los ensayos de compactación no fue posible establecer un índice de compactabilidad para materiales granulares marginales, ya que no se observó un punto de inflexión en el peso específico seco que permita caracterizar un número de giros óptimo para alcanzar una compactación ideal sin generar degradación excesiva, además el criterio de locking point determinado por Vavrik y Carpenter se considera no aplicable para el material en estudio ya que no fue posible evidenciarlo en todos los ensayos.

El desempeño que se observó para las probetas de los materiales MGM3 y SBG\_C1 en el ensayo de tracción indirecta, no fue el esperado ya que se dio una tendencia de disminución de la resistencia a la tracción indirecta con el aumento de la humedad, sin observarse un incremento en la resistencia de las probetas cercanas a la humedad óptima de compactación.

Los datos obtenidos en los ensayos de succión no se usan para caracterizar el comportamiento hidromecánico de los materiales en estudio ya que no describen una tendencia lógica que permita comparar la succión de los materiales, debido a fallas en el proceso de estabilización de humedad en los recipientes que contenían la muestra y el papel filtro.

## 6. Recomendaciones

Para próximas investigaciones en el tema se recomienda:

Realizar una campaña de investigación enfocada en la compactación giratoria de materiales granulares para determinar un protocolo de compactación analizando aspectos como índice de compactibilidad, presión vertical, velocidad de giros entre otras.

El uso de recipientes herméticos o que permitan un sellado total que certifique el aislamiento de las condiciones de humedad interna y externa para el proceso de medición de succión además se recomienda tomar más de una medición de succión para cada probeta con el fin de minimizar errores en la toma de datos y generar resultados que permitan analizar el comportamiento real de los materiales en estudio.

Incluir en las campañas experimentales ensayos de confinamiento, con el fin de caracterizar otras propiedades mecánicas, que permitan analizar un comportamiento más generalizado del material en estudio.

### Referencias Bibliográficas

- A. D. Cáceres, Ó. D. & Rodríguez (2021), Estimación de la resistencia monotónica en materiales granulares marginales como alternativa para la construcción de vías., vol. 4, no. 1. 2017.
- ASTM D5298–16. (2016). Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Astm International, 04.08(November 1994), 1–6.
- Espinoza, A., Estefanny, L., & Benavente, V. (2020). Propuesta de diseño de un pavimento rígido conformado de agregados marginales con presencia de cenizas volcánicas para el proyecto: Mejoramiento de carretera Moquegua – Omate - Arequipa, Tramo II , sector 1. 124.
- Fernanda, D., & González, M. (2007). Ensayo De Compactación Giratoria En Suelos Como Alternativa Al Ensayo De Compactación Proctor Gyratory Compaction Test in Soils As Alternative To the Proctor Compaction Test. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 17, 67–81.
- Grado de Saturación | Diccionario. (2020. Mayo 10). Diccionario. <https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/grado-de-saturacion/>.
- INVIAS. (2013). Capítulo 3 - Afirmados, subbases y bases. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, 1, 900–906.
- INVIAS. (2013). Determinación de la succión de un suelo usando papel de filtro. Normas de ensayos de materiales para carreteras E-159.
- INVIAS. (2013). Determinación de la succión de un suelo usando papel de filtro. Normas de ensayos de materiales para carreteras E-159.
- INVIAS. (2013). LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS. Invias, Cd, 50–150.

- J. Carrasco, "Implementación De Ensayos De Succión En Suelos Parcialmente Saturados Y Análisis De Resultados En Suelos Residuales," vol. 4, p. 84, 2017, [Online]. Available: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148022>.
- L. Narvaez, "Vías Terciarias: Motor Del Desarrollo Económico Rural," *Rev. Ing.*, no. 45, pp. 80–87, 2017, doi: 10.16924/revinge.45.11.
- M. A. Acosta Ariza and P. A. Alarcon Romero, "Las Vias Terciarias En Colombia, Una Oportunidad Para La Ingeniería Vial Y El Desarrollo Del País," *Repos. Inst. - Univ. Católica Colomb.*, vol. 1, p. 24, 2017, [Online]. Available: [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15205/3/Artic V3 COL OPORT ING VIAL x Acosta y Alarcon 29 11 2017.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15205/3/Artic%20V3%20COL%20OPORT%20ING%20VIAL%20x%20Acosta%20y%20Alarcon%2029%2011%202017.pdf).
- Ministerio de Transporte. (2011. Mayo 8.). Ministerio de Transporte. <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/40/historia/>
- NASCIMENTO, L. A. H. do. (2008). *Nova Abordagem Da Dosagem De Misturas Asfálticas Densas Com Uso Do Compactador Giratório E Foco Na Deformação Permanente*. Universidade Federal Do Rio de Janeiro, 227.
- NLT-346/90 . "Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas".
- Rivera, J. F., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador Técnico*, 84(2), 43–67.
- V. Meza Ochoa, "Suelos Parcialmente Saturados: De La Investigación A La Cátedra Universitaria," *Boletín Ciencias la Tierra*, vol. 0, no. 31, pp. 23–38, 2012.
- Villar, E. G. (1965). Ensayo de tracción indirecta. 5–14.

Apéndices

Apéndice A. Procesamiento de datos para la generar la curva de compactación del material MGM3

CURVA DE COMPACTACIÓN

Probeta	8.5%	10.5%	11.5%	12.5%
Peso Tara	5.6	6	7.6	5.5
Peso Tara + Masa húmeda (g)	205.6	206	207.6	205.5
Peso Tara + Masa seca (g)	189.5	186.4	186.6	182.6
Peso agua	16.1	19.6	21	22.9
Peso seco	183.9	180.4	179	177.1
Humedad	8.75%	10.86%	11.73%	12.93%
Variación de la humedad	0.25%	0.36%	0.23%	0.43%

Codigo de la probeta	Altura [mm]	Nº Giros	Humedad	densidad húmeda (Kg/m³)	Peso específico seco (KN/m³)	LOCKING POINT			Comentarios	
						Nº Giros	densidad húmeda (Kg/m³)	Peso específico seco (KN/m³)	Looking Point	Expulsión de agua
MGM3_18_15_C1	215.17	180	8.75%	2012.702	18.16	127	2008.207	18.115	Si	No
MGM3_18_15_C2	206.44	140	10.86%	2141.678	18.95	140	2141.678	18.951	No	Insignificante
MGM3_18_15_C3	208.79	140	11.73%	2186.455	19.20	140	2186.455	19.197	No	Minima
MGM3_18_15_C4	203.00	140	12.93%	2159.043	18.76	79	2151.83	18.692	Si	Baja

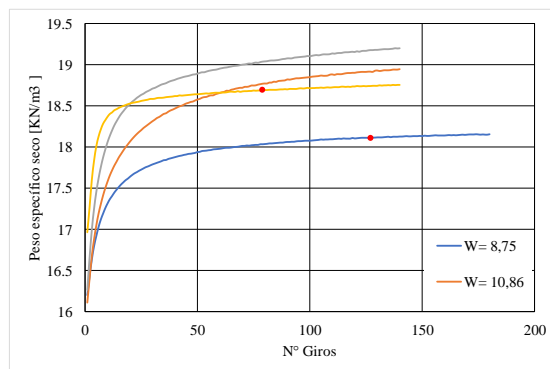
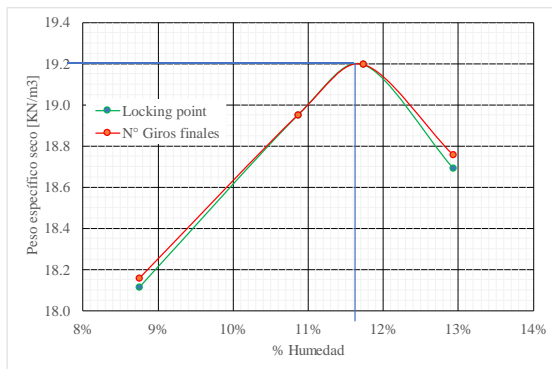
	Teórico	Locking point
Humedad Óptima	11.65%	11.65%
Peso Específico Seco Máximo [KN/m³]	19.2	19.2

CÁLCULO DE POROSIDAD Y SATURACIÓN

Gravedad específica de sólidos (Gs)	2.65
-------------------------------------	------

Densidad del agua	1000	kg/m3
-------------------	------	-------

Probeta	Peso húmedo [g]	% humedad	densidad húmeda (Kg/m³)	densidad seca (Kg/m³)	Relación de vacíos (e)	Porosidad (n)	% Saturación (S)
7%	7545	8.8%	1974.997	1816.01	0.459	0.315	50.518
9%	7694	10.9%	2053.809	1852.54	0.430	0.301	66.884
11%	7861	11.7%	2191.120	1961.05	0.351	0.260	88.494
13%	7968	12.9%	2206.751	1954.08	0.356	0.263	96.215



**Apéndice B.** Procesamiento de datos para la generar la curva de compactación del material

**SBG\_C1**

**CURVA DE COMPACTACIÓN**

Probeta	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	10.58%	11.59%	12.50%	13.47%
Variación de la humedad	0.58%	0.59%	0.50%	0.47%

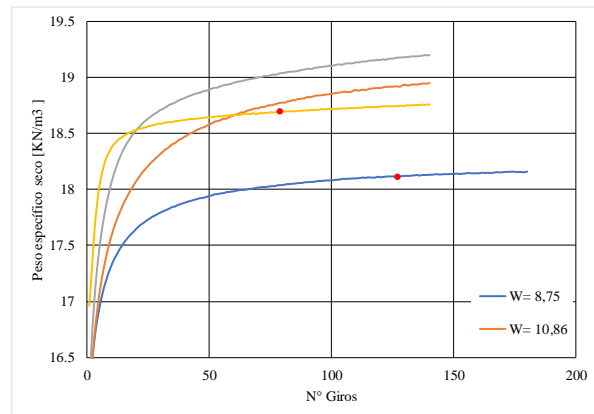
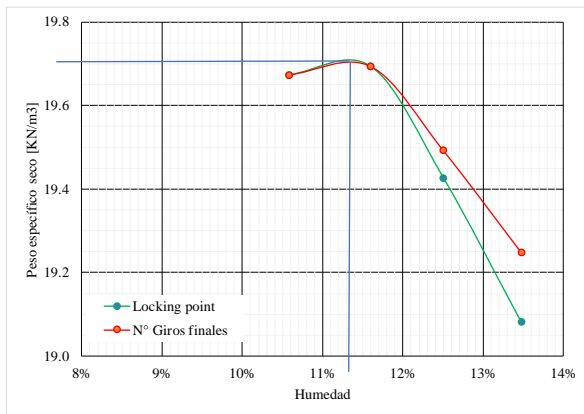
Codigo de probeta	Altura [mm]	N° Giros	Humedad	densidad húmeda (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso específico seco (KN/m <sup>3</sup> )	LOCKING POINT			Comentarios	
						N° Giros	densidad húmeda (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso específico seco (Kg/m <sup>3</sup> )	Looking Point	Expulsión de agua
SBG_C1_8.5_0_C1	215.17	180	10.58%	2217.503	19.67	180	2217.503	19.673	No	No
SBG_C1_8.5_0_C2	206.44	140	11.59%	2240.208	19.69	140	2240.208	19.693	No	Minima
SBG_C1_8.5_0_C3	208.79	140	12.50%	2235.312	19.49	77	2227.806	19.426	Si	Baja
SBG_C1_8.5_0_C4	203.00	140	13.47%	2226.398	19.25	32	2207.062	19.081	Si	Media

	Teórico	Locking point
Humedad Óptima	11.35%	11.30%
Peso Especifico Seco [KN/m <sup>3</sup> ]	19.7	19.71

**CÁLCULO DE POROSIDAD Y SATURACIÓN**

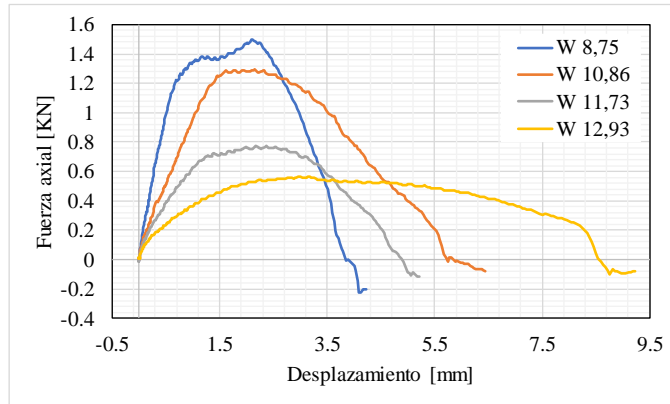
Gravedad específica de solidos (Gs)	2.65	Densidad del agua	1000	kg/m <sup>3</sup>
-------------------------------------	------	-------------------	------	-------------------

Probeta	Peso húmedo [g]	% humedad	densidad húmeda (Kg/m <sup>3</sup> )	densidad seca (Kg/m <sup>3</sup> )	Relación de vacios (e)	Porosidad (n)	% Saturación (S)
7%	7545	10.6%	1974.997	1786.10	0.484	0.326	57.944
9%	7694	11.6%	2053.809	1840.44	0.440	0.305	69.844
11%	7861	12.5%	2191.120	1947.66	0.361	0.265	91.859
13%	7968	13.5%	2206.751	1944.80	0.363	0.266	98.435

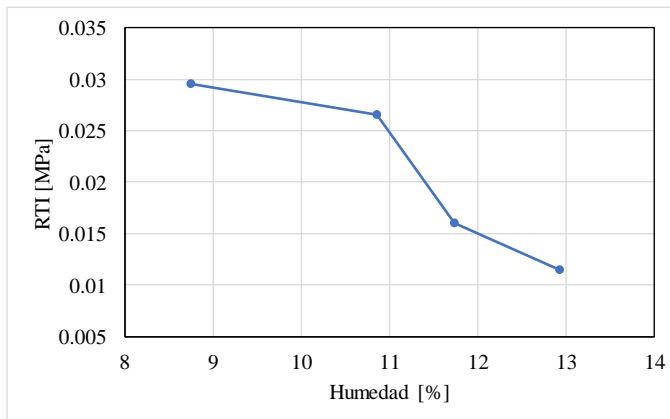


Apéndice C. Procesamiento de datos en el ensayo de tracción indirecta para el material MGM3

W 10.58		W 11.59		W 12.5		W 13.47	
Fuerza axial [KN]	Desplazamiento [mm]	Fuerza axial [KN]	Desplazamiento [mm]	Fuerza axial [KN]	Desplazamiento [mm]	Fuerza axial [KN]	Desplazamiento [mm]
-0.007455311	-0.002331096	0.001710031	0.002151406	-0.016498523	-0.009508682	0.00831742	0.003677588
-0.008945969	-0.000842973	0.004619509	0.001867376	-0.017365417	-0.009613792	0.011390259	0.003064708
-0.01006096	-0.001736246	0.003671568	0.000757789	-0.017418688	-0.009329198	0.011731186	0.003895387
-0.008563181	-0.00161367	0.000194017	0.002135425	-0.011756233	-0.009729145	0.009342759	0.003225547
-0.002827182	-0.002185418	-0.002024491	0.001456519	-0.009229338	-0.009408286	0.007835555	0.004087011
-0.00014831	-0.000902801	-0.000503406	0.001268224	-0.012782198	-0.008997582	0.006741463	0.00386117
-0.001868011	-0.000916529	-0.000655819	0.000969237	-0.015652388	-0.009022579	0.005598505	0.005008713
-0.005282032	-0.000830065	-0.003508388	0.001235032	-0.016187359	-0.010355599	0.00944491	0.00494868
-0.005591008	-0.000972925	-0.002991486	0.001072348	-0.015880561	-0.009361366	0.013535161	0.00490929
-0.005261338	-0.000593415	0.001199225	0.000641975	-0.015663195	-0.009214203	0.01552825	0.004557082
-0.002791045	-2.00793E-05	0.001735694	0.001522275	-0.014141547	-0.008756425	0.013492326	0.005483702
0.002846556	-0.000305697	-0.001492018	0.000567804	-0.009992492	-0.009156629	0.012120837	0.005586147
0.007157859	-0.00016002	-0.002404294	0.001196102	-0.007191467	-0.008936729	0.012052288	0.005390015
0.005387499	0.000430527	3.65972E-05	0.000797948	-0.007107705	-0.007843943	0.011139858	0.007156637
0.005690263	0.000886256	0.000954611	0.001526438	-0.00662794	-0.006414265	0.01222108	0.008229138
0.007779216	0.00126679	-0.00114305	0.00105985	-0.004615539	-0.004845415	0.01550853	0.008242047
0.008977969	0.002188901	-0.001691044	0.001179301	-0.000793823	-0.003761849	0.020147441	0.008402066
0.012754481	0.003249571	0.002866001	0.001857951	0.003387669	-0.000732178	0.020309675	0.009107813
0.017996451	0.00275102	0.008488964	0.002100184	0.01057135	0.000269637	0.019308925	0.00992707
0.024831023	0.004623313	0.009511742	0.002175584	0.017345162	0.002662251	0.019196592	0.01111682
0.026820695	0.006633089	0.008929825	0.003863629	0.021386739	0.00484603	0.020342831	0.011939304
0.027341835	0.007251962	0.010329039	0.005373061	0.024148541	0.007806858	0.022944318	0.015704433
0.030220283	0.00749107	0.01385931	0.005559512	0.02917714	0.012397952	0.029413622	0.019432884
0.033474527	0.010410305	0.017443569	0.006899242	0.036062628	0.016435381	0.036907356	0.021048399
0.038305782	0.012720912	0.021556923	0.008948613	0.040415064	0.018773237	0.043272767	0.025065336
0.049223166	0.014021918	0.029847605	0.011985456	0.045397244	0.023195092	0.045036096	0.028615892
0.061358217	0.017450769	0.045686178	0.016793786	0.053078108	0.026065921	0.047869459	0.032812726
0.071566962	0.021653339	0.063127637	0.023219679	0.060700219	0.02900913	0.050857369	0.036994651
0.085961908	0.027845861	0.075211488	0.029751142	0.065330163	0.03365124	0.053023219	0.040532708
0.11158299	0.035616402	0.08499708	0.037778873	0.066741452	0.038235012	0.056113001	0.044423178
0.14183785	0.046142675	0.096537359	0.044298399	0.070764638	0.041055232	0.061083734	0.048176013
0.16705403	0.056079015	0.10625727	0.050620262	0.075482242	0.044646766	0.067676596	0.051421024
0.19607191	0.067448467	0.11531579	0.057156794	0.080464996	0.04913849	0.070669889	0.054602113
0.22126651	0.076888256	0.12143049	0.063755669	0.087110586	0.0541429	0.071200363	0.05950838
0.24037589	0.087053664	0.13129534	0.068959899	0.094319008	0.058190621	0.07366021	0.064182095
0.25613484	0.096638769	0.14218746	0.075716123	0.10111454	0.063891716	0.077132739	0.068522401
0.27119759	0.10640746	0.14945123	0.082528338	0.10527708	0.069144912	0.07929685	0.074071467
0.28514251	0.11325958	0.15325023	0.088001594	0.10874746	0.073773913	0.084228374	0.080014229
0.29922515	0.12188584	0.15699638	0.093662731	0.11285323	0.079334907	0.090645887	0.085628241
0.3125366	0.12838699	0.16382684	0.099761412	0.11606271	0.085409008	0.097758524	0.091321386
0.32269436	0.13283323	0.16829075	0.10609285	0.12121896	0.091402732	0.098564759	0.095978051
0.32404	0.13668482	0.17277591	0.11246982	0.12732285	0.097295649	0.10028921	0.10377241
0.32461736	0.13972139	0.17994183	0.11808445	0.13561308	0.10165911	0.10214846	0.10910838
0.32534093	0.14282872	0.19012836	0.12350223	0.14068912	0.1077076	0.10318974	0.11483002
0.32713041	0.14519553	0.19790408	0.13037708	0.14262681	0.11323494	0.10464574	0.1210752
0.33088988	0.14694509	0.20164315	0.13549158	0.1444491	0.11908161	0.10891587	0.12641814
0.33992681	0.15020443	0.20248567	0.14148858	0.14817363	0.12374605	0.11518681	0.13203461
0.349866	0.15272588	0.20502615	0.14681554	0.15071109	0.12973998	0.11964431	0.13905069
0.35454571	0.15576272	0.2109174	0.15264966	0.15555051	0.13577719	0.12071157	0.14558768
0.35733041	0.15893751	0.21374808	0.15784119	0.16181475	0.14212154	0.12202041	0.15160067
0.36028329	0.16180137	0.22034223	0.16239437	0.16934802	0.1468678	0.1231376	0.15663847
0.3649033	0.16536279	0.22734614	0.16783239	0.17401977	0.15249394	0.12375398	0.16377918
0.37081099	0.16820534	0.23566881	0.17332147	0.17811687	0.16020916	0.12765521	0.16983581
0.38237849	0.17175058	0.24102005	0.1780898	0.18242039	0.16666928	0.13310951	0.17586975
0.39538157	0.175679	0.2431049	0.18316802	0.18672743	0.17577571	0.13800523	0.18211493
0.40282878	0.17950416	0.24555087	0.18976033	0.19377671	0.18514481	0.13933897	0.18750151
0.40739623	0.18400756	0.24986079	0.1949012	0.19973597	0.19260944	0.14065123	0.19363913

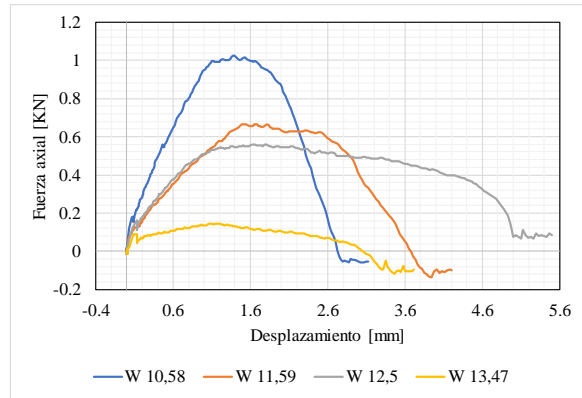


Humedad [%]	Fuerza axial [KN]	Altura [mm]	Diametro [mm]	RTI [Mpa]
8.75	1.4981556	215.17	150	0.029550585
10.86	1.292362	206.44	150	0.026569372
11.73	0.77212554	204.20	150	0.016048005
12.93	0.56388873	208.79	150	0.011462321

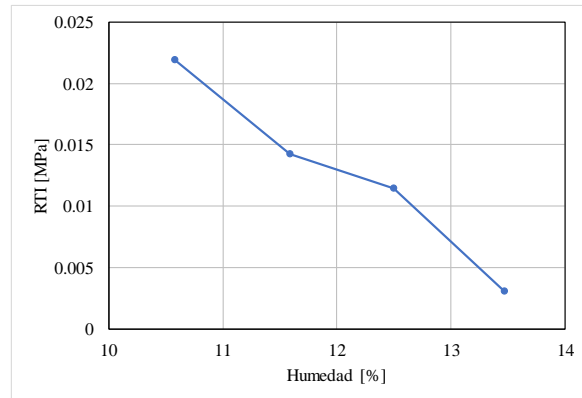


Apéndice D. Procesamiento de datos en el ensayo de tracción indirecta para el material SBG\_C1

W 10.58		W 11.59		W 12.5		W 13.47	
Fuerza axial [KN]	Desplazamiento [mm]	Fuerza axial [KN]	Desplazamiento [mm]	Fuerza axial [KN]	Desplazamiento [mm]	Fuerza axial [KN]	Desplazamiento [mm]
0.009215946	-0.00277863	-0.009578615	-0.008136937	-0.006214179	-0.002450753	-0.01441106	0.002998937
0.009759894	-0.003790279	-0.006410591	-0.008321391	-0.008485242	-0.001745262	-0.008592707	0.00272049
0.006994417	-0.003243579	-0.00806328	-0.007775254	-0.010118146	-0.002481077	-0.008541433	0.002418839
0.004449735	-0.002882919	-0.010793657	-0.007789801	-0.008691747	-0.001021485	-0.010855075	0.002262047
0.003238483	-0.003007544	-0.012873992	-0.008239383	-0.009028318	-0.002201811	-0.012585226	0.002988692
0.001766687	-0.003747867	-0.010312356	-0.007424839	-0.010954665	-0.001779479	-0.013794479	0.002707992
8.82536E-06	-0.003825571	-0.012532772	-0.008176686	-0.006781676	-0.001807754	-0.013344116	0.001798942
0.00014171	-0.003947072	-0.010869582	-0.007666457	-0.005573101	-0.00170244	-0.011754444	0.002901409
0.005257505	-0.003805492	-0.008708392	-0.008124849	-0.007609948	-0.001613466	-0.006074008	0.003293621
0.00797642	-0.003579651	-0.004212111	-0.007365421	-0.012421748	-0.001008987	-0.005196306	0.002990741
0.00674089	-0.003857125	-0.004897702	-0.007608882	-0.012821734	-0.001436645	-0.009697825	0.00286084
0.004440617	-0.004317566	-0.006886451	-0.006388808	-0.011172656	-0.003097491	-0.011627911	0.00275819
0.003671559	-0.004354446	-0.008196677	-0.006865845	-0.01168026	-0.002384368	-0.010233205	0.003171097
0.003628237	-0.004197039	-0.005624233	-0.006629401	-0.007749338	-0.001196308	-0.01142197	0.00330571
0.002656888	-0.003869418	-0.005728625	-0.005835961	-0.00421794	-0.001389725	-0.008838973	0.003898921
0.003805289	-0.003427622	-0.005256812	-0.004816526	-0.002983535	-0.000753692	-0.004440272	0.002924766
0.009478591	-0.003000168	-0.001732226	-0.004429179	-0.00659301	-0.001064717	-0.002324837	0.003491956
0.014855456	-0.002283357	0.003735507	-0.005276967	-0.006432862	-0.000341554	-0.004820754	0.004366533
0.018204987	-0.002565902	0.006282225	-0.003606286	-0.005403784	-0.000885437	-0.007194992	0.004617371
0.017573744	-0.000669431	0.00740691	-0.000946699	-0.004643805	0.00011274	-0.005363677	0.004855044
0.018179068	0.000235214	0.007836195	-0.000911406	-0.003740851	0.000539784	-0.003395008	0.0055444
0.021070963	0.000210422	0.011887261	0.000921907	0.001985583	0.001202863	-0.002419663	0.006267767
0.023634495	0.00248338	0.01741253	0.003323332	0.003240438	0.001495908	0.000881361	0.006643128
0.026181687	0.003626774	0.026085949	0.006901752	0.002779113	0.001115989	0.004427909	0.006580841
0.032232311	0.005833501	0.043634783	0.013998151	0.001739739	0.002959393	0.0041563	0.007216925
0.049554661	0.008816867	0.061758913	0.024410455	0.00352521	0.003294441	0.001591642	0.008520339
0.12305086	0.035576858	0.076155692	0.033920981	0.005443566	0.005297455	0.00217375	0.008956193
0.17687531	0.065435156	0.085807167	0.04287738	0.005897054	0.005073919	0.004528677	0.010818498
0.18289825	0.079592511	0.08993087	0.051557124	0.012223677	0.007396409	0.00633351	0.011833426
0.16971625	0.081172422	0.095608488	0.060483608	0.017160743	0.007691504	0.011573546	0.012911716
0.16346923	0.081176929	0.10121213	0.069915049	0.017836601	0.010056816	0.016491184	0.014314553
0.15752102	0.082323395	0.10621495	0.07713151	0.017432043	0.011608404	0.015557433	0.016742563
0.1539306	0.082492486	0.1131479	0.084759653	0.019826068	0.013964138	0.01416525	0.018485161
0.15644409	0.083129749	0.11989255	0.09285295	0.024532489	0.016436404	0.013975341	0.020809084
0.16204374	0.083988748	0.1254129	0.101118	0.027976641	0.017762408	0.018890982	0.02529466
0.16503027	0.085268244	0.12688291	0.10803363	0.033623628	0.021401066	0.089557797	0.088335
0.16463703	0.085969023	0.12692778	0.11435441	0.043271355	0.023755981	0.086777136	0.13092098
0.1641773	0.08821924	0.12766741	0.1209117	0.12669905	0.076354869	0.074595012	0.13174611
0.16541949	0.089777179	0.12766968	0.12632783	0.16331856	0.13603336	0.063256063	0.13120127
0.16942902	0.092274487	0.1269889	0.13205166	0.14086166	0.1377188	0.053825803	0.13080624
0.17554514	0.095772184	0.12719969	0.13770917	0.12796885	0.13738047	0.048115645	0.13079025
0.18445781	0.10183762	0.12946738	0.14002919	0.11879821	0.13469425	0.044852946	0.13153672
0.19439422	0.10697711	0.13218455	0.14509773	0.11286537	0.13378853	0.043196775	0.13214551
0.20516513	0.11233746	0.13054268	0.1478086	0.11332843	0.13190435	0.045217384	0.13358194
0.21308263	0.11775847	0.12882508	0.15266523	0.1139259	0.13182689	0.050839312	0.13533811
0.21661156	0.12397067	0.12893683	0.15669984	0.11818992	0.13400945	0.053996745	0.13855322
0.21987887	0.12977691	0.12944992	0.16049381	0.12908025	0.14065933	0.054701082	0.14353222
0.22402634	0.13560693	0.12865126	0.16306877	0.13880564	0.14689749	0.057134189	0.14946817
0.22664274	0.14099371	0.13364919	0.16670334	0.14630547	0.1533093	0.058410082	0.15523937
0.23155981	0.14632355	0.13924524	0.1703947	0.15154463	0.15971471	0.060618155	0.1610633
0.23866539	0.1522364	0.14642546	0.17304112	0.15764827	0.16635354	0.063363388	0.16763815
0.25068665	0.15901004	0.14909519	0.17709909	0.16589069	0.17270669	0.066928864	0.17430525
0.2615236	0.16490459	0.14890456	0.18045044	0.16972061	0.17972277	0.06995938	0.17975248
0.26836699	0.1717709	0.14941603	0.18399177	0.17064011	0.18707596	0.068633236	0.1851846
0.27289647	0.17889144	0.15133019	0.18793701	0.17196703	0.19207503	0.068401717	0.19273505
0.2767987	0.1858985	0.15175349	0.19227193	0.17603771	0.19960955	0.068614386	0.19862658
0.28329575	0.19538033	0.15417615	0.19617619	0.18054983	0.20483263	0.066645816	0.2048859



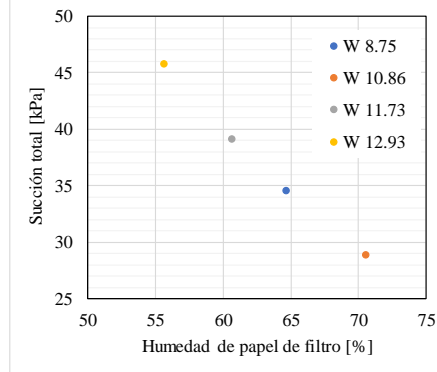
Humedad [%]	Fuerza axial [KN]	Altura [mm]	Diametro [mm]	RTI [Mpa]
10.58	1.0240481	198.36	150	0.021910643
11.59	0.66589814	198.42	150	0.01424332
12.5	0.56000626	207.7	150	0.011443141
13.47	0.14608105	203.16	150	0.003051719



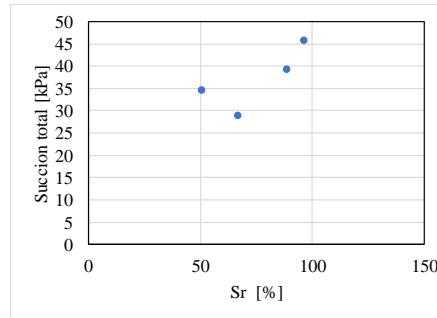
Apéndice E. Procesamiento de datos obtenidos en el ensayo de succión para el material MGM3

Codigo de la probeta	Humedad [%]	Sr [%]	Humedo		Seco		Mf	Mw	Wf (%)	Log S (kPa)	Succión Total (kPa)
			Peso bolsa [g]	Peso bolsa+Papel [g]	Peso bolsa [g]	Peso bolsa+Papel [g]					
MGM3_18_15_C1	8.75%	50.52	2.1206	2.5042	2.1604	2.3933	0.233	0.151	65	1.538471	34.6
MGM3_18_15_C2	10.86%	66.88	2.0929	2.4618	2.1519	2.3682	0.216	0.153	71	1.459573	28.8
MGM3_18_15_C3	11.73%	88.49	2.1442	2.4982	2.1515	2.3718	0.22	0.134	61	1.592685	39.1
MGM3_18_15_C4	12.93%	96.22	2.1872	2.5731	2.1313	2.3792	0.248	0.138	56	1.660487	45.8

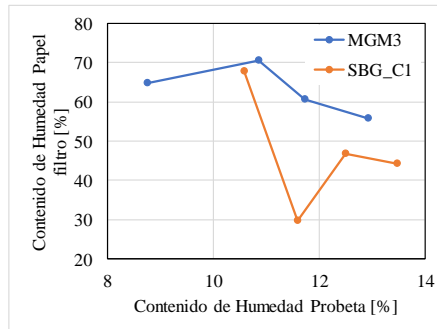
Humedad [%]	Humedad de papel filtro [%]	Succión Total (kPa)
W 8.75	65	34.55
W 10.86	71	28.81
W 11.73	61	39.15
W 12.93	56	45.76



Sr [%]	Succión Total (kPa)
51	34.55
67	28.81
88	39.15
96	45.76



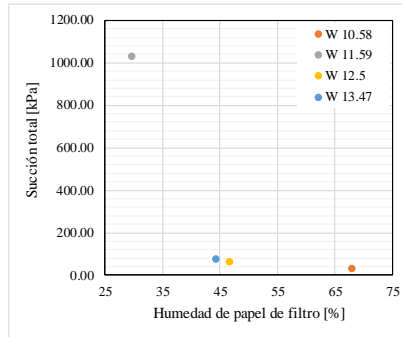
Contenido de Humedad Probeta [%]	Contenido de Humedad Papel filtro [%]
8.75	64.71
10.86	70.55
11.73	60.69
12.93	55.67



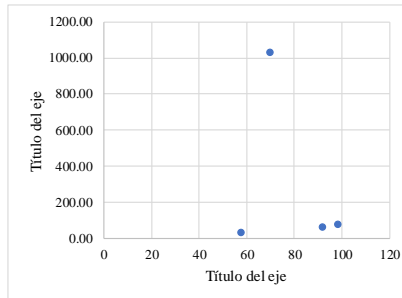
**Apéndice F. Procesamiento de datos obtenidos en el ensayo de succión para el material SBG\_C1**

Codigo de probeta	Humedad [%]	Sr [%]	Humedo		Seco		Mf	Mw	Wf (%)	Log S (kPa)	Succión Total (kPa)
			Peso bolsa [g]	Peso bolsa+Papel [g]	Peso bolsa [g]	Peso bolsa+Papel [g]					
SBG_C1_8.5_0_C1	10.58%	57.94	2.01	2.387	1.9871	2.2117	0.225	0.152	68	1.495972	31.3
SBG_C1_8.5_0_C2	11.59%	69.84	2.0716	2.3217	1.9655	2.1583	0.193	0.057	30	3.011818	1027.6
SBG_C1_8.5_0_C3	12.50%	91.86	2.0346	2.3748	1.9617	2.1936	0.232	0.108	47	1.781534	60.5
SBG_C1_8.5_0_C4	13.47%	98.44	2.032	2.3883	2.0869	2.3338	0.247	0.109	44	1.875295	75.0

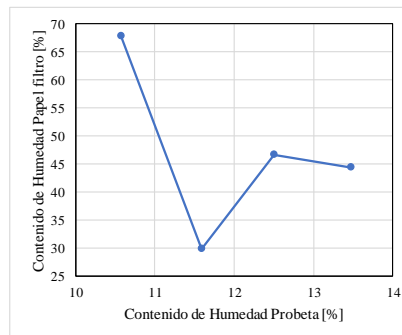
Humedad [%]	Humedad de papel filtro [%]	Succión Total (kPa)
W 10.58	68	31.33
W 11.59	30	1027.59
W 12.5	47	60.47
W 13.47	44	75.04



Sr [%]	Succión Total (kPa)
58	31.33
70	1027.59
92	60.47
98	75.04



Contenido de Humedad Probeta [%]	Contenido de Humedad Papel filtro [%]
10.58	67.85
11.59	29.72
12.50	46.70
13.47	44.31

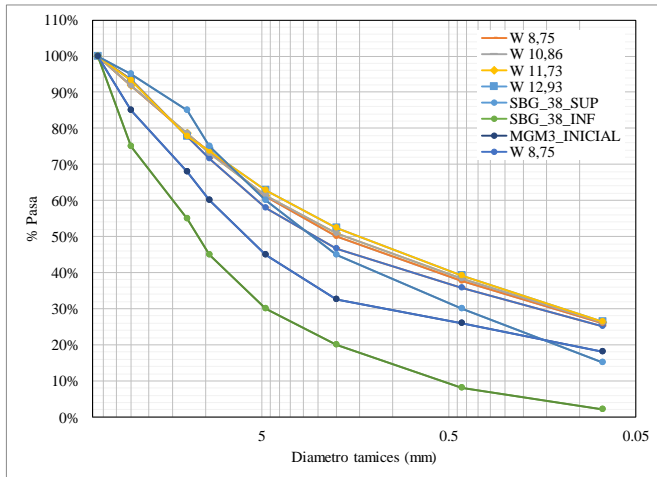


Apéndice G. Granulometría final del material MGM3

MGM3\_18\_15

	C1	C2	C3	C4
Masa húmeda antes de lavado			7402	7522
Masa antes de lavado	6393	6723	6649	6607
Masa seca después de lavado	4829	5006	4992	4927
Humedad			11.3%	13.8%

Tamiz	Masa retenida				Masa que pasa				% Pasa				Degradación				
	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	W 8,75	W 10,86	W 11,73	W 12,93	W 8,75	W 10,86	W 11,73	W 12,93	
1+1/2"	37.5	0	0	0	6387	6721	6649	6607	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	
1"	25	418	553	548	449	5969	6168	6101	6158	93%	92%	93%	8%	7%	7%	8%	
1/2"	12.5	1001	894	876	1022	4968	5274	5225	5136	78%	78%	79%	78%	10%	10%	11%	10%
3/8"	9.5	392	343	361	268	4576	4931	4864	4868	72%	73%	73%	74%	12%	13%	13%	14%
No. 4	4.75	871	821	792	719	3705	4110	4072	4149	58%	61%	61%	63%	13%	16%	16%	18%
No. 10	2	733	754	689	686	2972	3356	3383	3463	47%	50%	51%	52%	14%	17%	18%	20%
No. 40	0.425	693	823	842	875	2279	2533	2541	2588	36%	38%	38%	39%	10%	12%	12%	13%
No. 200	0.075	681	785	804	846	1598	1748	1737	1742	25%	26%	26%	26%	7%	8%	8%	8%
Fondo		1598	1748	1737	1742												
Masa total		6387	6721	6649	6607												

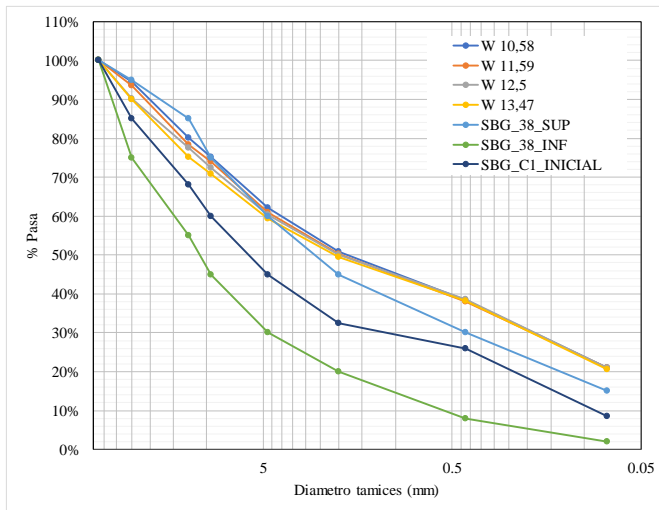


Apéndice H. Granulometría final del material SGB\_C1

SBG\_C1\_8.5\_0

	C1	C2	C3	C4
Masa húmeda antes de lavado	7367	7477	7533	7574
Masa antes de lavado	6703	6745	6747	6746
Masa seca después de lavado	5361	5387	5372	5391
Humedad	9.9%	10.9%	11.6%	12.3%

Tamiz	Masa retenida				Masa que pasa				% Pasa				Degradación				
	C1	C2	C3	C4	W 10,58	W 11,59	W 12,5	W 13,47	W 10,58	W 11,59	W 12,5	W 13,47	W 10,58	W 11,59	W 12,5	W 13,47	
1+1/2"	37.5	0	0	0	6699	6743	6736	6739	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	
1"	25	371	429	657	6328	6314	6079	6066	94%	94%	90%	90%	9%	9%	5%	5%	
1/2"	12.5	958	1028	862	5370	5286	5217	5070	80%	78%	77%	75%	12%	10%	9%	7%	
3/8"	9.5	338	294	340	303	5032	4992	4877	4767	75%	74%	72%	71%	15%	14%	12%	11%
No. 4	4.75	876	885	811	770	4156	4107	4066	3997	62%	61%	60%	59%	17%	16%	15%	14%
No. 10	2	755	719	693	663	3401	3388	3373	3334	51%	50%	50%	49%	18%	18%	18%	17%
No. 40	0.425	825	825	780	767	2576	2563	2593	2567	38%	38%	38%	38%	12%	12%	12%	12%
No. 200	0.075	1173	1149	1180	1175	1403	1414	1413	1392	21%	21%	21%	21%	12%	12%	12%	12%
Fondo		1403	1414	1413	1392												
Masa total		6699	6743	6736	6739												

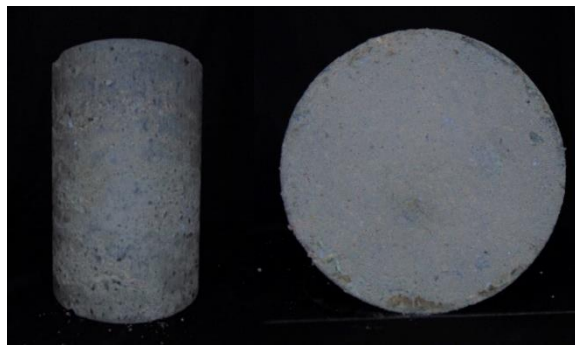


**Apéndice I.** Protocolo para toma de imágenes 2D y 3D**PROTOCOLO DE IMÁGENES 2D Y 3D****Hector Edilson Sanchez Velandia****Jhon Anderson Garzón Daza**

Para el desarrollo de la adquisición de imágenes 2D y 3D de probetas MGM se realizan tres fases. La primera fase se lleva a cabo antes de la tracción indirecta como modelo de entrada y la fase dos va después de fallar la probeta MGM por medio de tracción indirecta; la última fase es la adquisición de la superficie en 3D por medio de un Kinect de Xbox 360.

**1. Imágenes 2D****1.1. Imágenes 2D – Entrada del Modelo**

La adquisición de las imágenes se realiza con una cámara de 20.1 mega pixeles ubicada a 16 cm de la muestra e iluminada con luz led blanca. En la Figura 1 se observa las imágenes tomadas para una probeta MGM, se adquieren dos imágenes una para la vista frontal y otra para la vista superior de la probeta.



*Figura 1. Imagen de probeta MGM.*

*Tomado por. Autores.*

Para tener el resultado de las imágenes de la Figura 1, se configuran algunos parámetros de la opción macro que viene integrada en la cámara simbolizada con la letra M en el botón que se puede visualizar en la figura 2.



*Figura 2. Opción macro.*

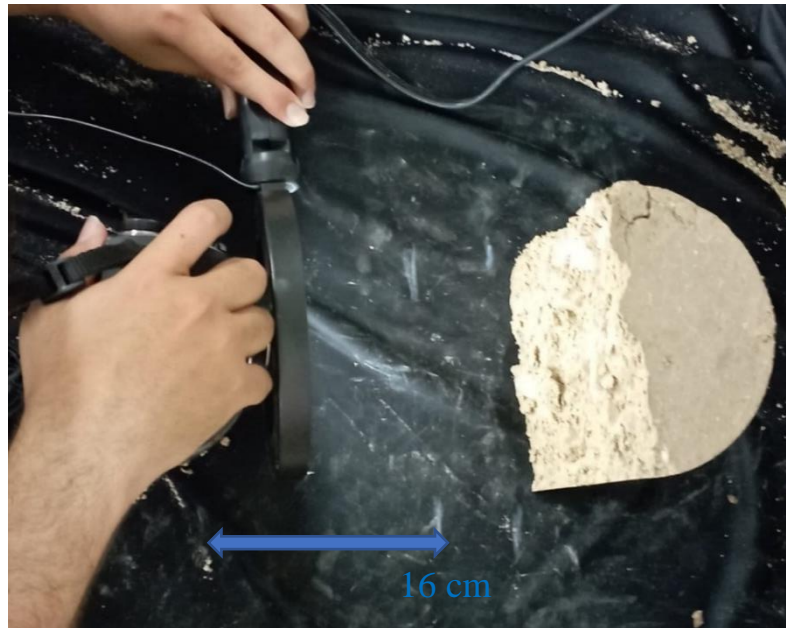
*Tomado por. Autores.*

Teniendo ya la cámara en la opción macro, pulsar el botón de menú para abrir las funciones de está y así definir los siguientes parámetros:

- Efecto de foto: desactivado
- Tamaño de imagen fija: 4:30 - 20M
- ISO: 100
- Balance blanco: blanco fluorescente 3
- Enfoque: multi AF
- Modo medición: multi
- Ajustes de captura: captura continua
- Ajuste de variación: desactivado
- Detección de sonrisa: normal

- Detección de cara: desactivado
- DRO: DRO Plus
- Tamaño de película 720 FINE

Por último, se realiza la adquisición de la imagen usando un fondo negro, en la figura 3 se ilustra el ejemplo.



*Figura 3. Adquisición de las imágenes.*

*Tomado por. Autores.*

### **1.2. Imágenes 2D – Probeta MGM fallada por tracción indirecta**

Para la adquisición de las imágenes se realiza el mismo procedimiento anteriormente descrito, una cámara de 20.1 mega pixeles ubicada a 16 cm e iluminado con luz led blanca. En la Figura 3 se observa la probeta MGM fallada por tracción indirecta, este procedimiento se realiza para las dos superficies resultantes después del ensayo de tracción indirecta. Para el transporte de las muestras después del ensayo de tracción indirecta se usa un tubo pvc cortado longitudinalmente con el fin de evitar la afectación de la superficie de falla durante el proceso de toma de imágenes.



*Figura 4. Imagen de una probeta MGM fallada por medio de tracción indirecta*

*Tomado por. Autores.*

## 2. Superficies 3D

Para la adquisición de superficie 3D se usa un Kinect de Xbox 360 controlado por el software SDK versión 1.8 de Microsoft para Windows, este dispositivo permite recolectar datos de altura, ancho y profundidad mediante un sensor de profundidad que ya viene configurado por defecto, tiene una baja sensibilidad a perturbaciones de luz externa facilitando el montaje ya que no necesita de dispositivos de iluminación.

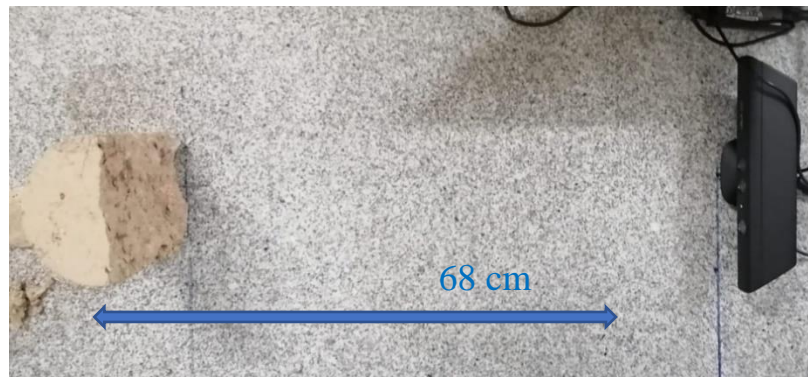


*Figura 5. Composición del Kinect XBOX 360.*

*Fuente. Researchgate.*

### 2.1. Montaje y conexión.

Para capturar las superficies se realiza el montaje como se muestra en la figura 6 manteniendo paralelismo entre la muestra y el Kinect y una distancia de 68 cm; completado el montaje se conecta el Kinect al computador usando un adaptador y un puerto USB 3.0 (en algunos equipos es de color azul y en otros tiene las siglas SS).



*Figura 6. Montaje para toma de superficies.*

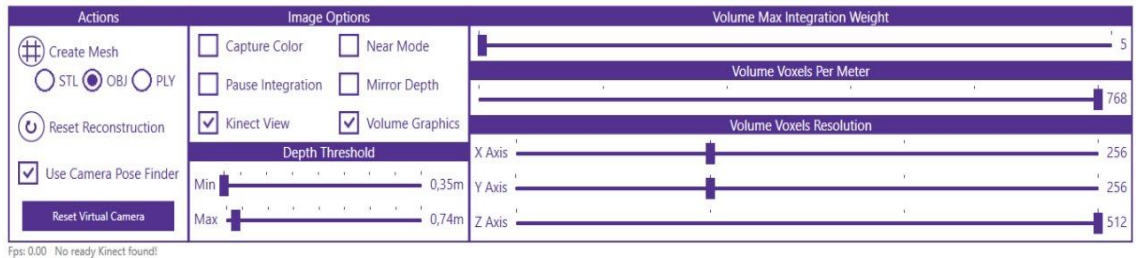
*Tomado por. Autores.*

### 2.2. Software y parámetros

Con el Kinect conectado se ejecuta el software Developer Toolkint Browser V1.8, se desplegará una lista de programas de la cual se selecciona el Kinect Fusion Explorer- WPF, para ejecutarlo dar click en Run. Dentro de la interfaz del programa se solicitan algunos parámetros que el usuario puede seleccionar de acuerdo a las necesidades, para este caso en específico los parámetros quedaran en los siguientes valores:

- Actions: seleccionar OBJ
- Image Options: seleccionar Volumen Graphis y Kinect View
- Deph Threshold: Min: 0.35m y Max: 0.74m
- Volumen Max Integration Weight: 5

- Volumen Voxels Por Meter: 768
- Volumen Voxels Resolution: X Axis: 256, Y Axis: 256, Z Axis: 512.

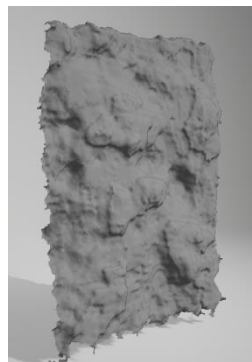


*Figura 7. Configuración de parámetros del software.*

*Tomado por. Autores.*

### 2.3. Toma de superficie

Con el montaje preparado y los parámetros configurados se procede a generar la superficie. Dar clic en la opción Reset reconstruction para eliminar el ruido al tomar la superficie, luego dar clic en Create Mesh, en la figura 8 se presenta la superficie falla tomada como se indicó anteriormente. Tener en cuenta que el procedimiento se realiza a las dos superficies de falla resultantes del ensayo de tracción indirecta, por lo que por cada probeta se obtienen 2 superficies.



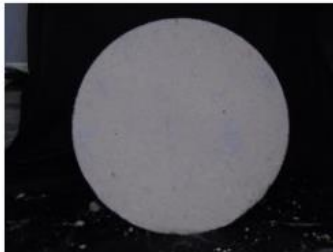
*Figura 8. Superficie de material MGM.*

*Tomado por. Autores.*

Apéndice J. Imágenes 2D para el material MGM3



MGM3\_18\_15\_C1\_CARA LATERAL



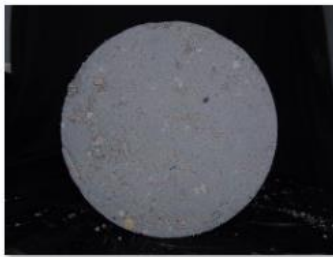
MGM3\_18\_15\_C1\_CARA SUPERIOR



MGM3\_18\_15\_C1\_FALLA



MGM3\_18\_15\_C2\_CARA LATERAL



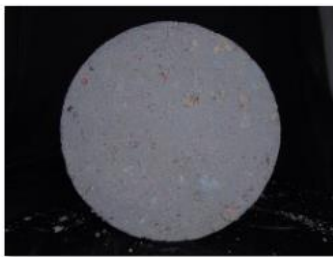
MGM3\_18\_15\_C2\_CARA SUPERIOR



MGM3\_18\_15\_C2\_FALLA



MGM3\_18\_15\_C3\_CARA LATERAL



MGM3\_18\_15\_C3\_CARA SUPERIOR



MGM3\_18\_15\_C3\_FALLA



MGM3\_18\_15\_C4\_CARA LATERAL



MGM3\_18\_15\_C4\_CARA SUPERIOR

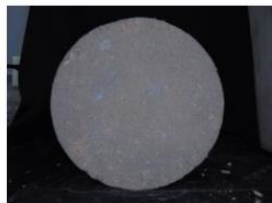


MGM3\_18\_15\_C4\_FALLA

Apéndice K. Imágenes 2D para el material SBG\_C1



SBG\_C1\_8.5\_0\_C1\_CARA LATERAL



SBG\_C1\_8.5\_0\_C1\_CARA SUPERIOR



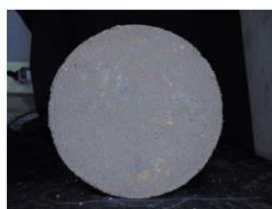
SBG\_C1\_8.5\_0\_C1\_FALLA 1



SBG\_C1\_8.5\_0\_C1\_FALLA 2



SBG\_C1\_8.5\_0\_C2\_CARA LATERAL



SBG\_C1\_8.5\_0\_C2\_CARA SUPERIOR



SBG\_C1\_8.5\_0\_C2\_FALLA 1



SBG\_C1\_8.5\_0\_C2\_FALLA 2



SBG\_C1\_8.5\_0\_C3\_CARA LATERAL



SBG\_C1\_8.5\_0\_C3\_CARA SUPERIOR



SBG\_C1\_8.5\_0\_C3\_FALLA 1



SBG\_C1\_8.5\_0\_C3\_FALLA 2



SBG\_C1\_8.5\_0\_C4\_CARA LATERAL



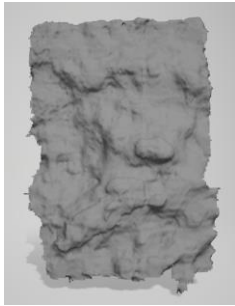
SBG\_C1\_8.5\_0\_C4\_CARA SUPERIOR



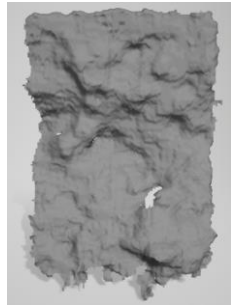
SBG\_C1\_8.5\_0\_C4\_FALLA 1



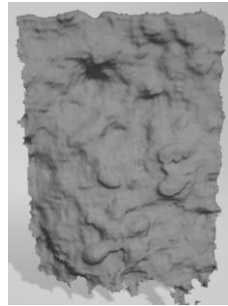
SBG\_C1\_8.5\_0\_C4\_FALLA 2

**Apéndice L.** Imágenes 3D para el material MGM3

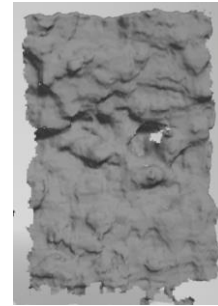
MGM3\_18\_15\_C1



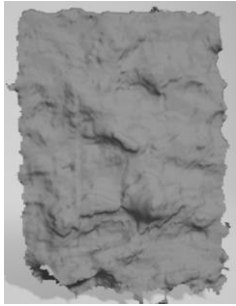
MGM3\_18\_15\_C2



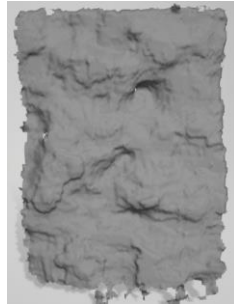
MGM3\_18\_15\_C3



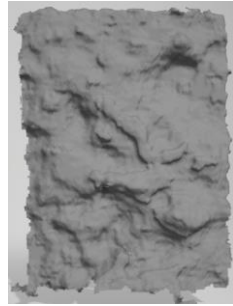
MGM3\_18\_15\_C4

**Apéndice M.** Imágenes 3D para el material SBG\_C1

SBG\_C1\_18\_15\_C1\_1



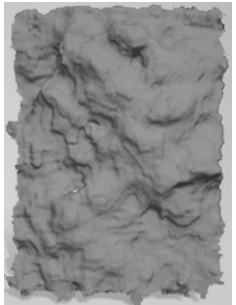
SBG\_C1\_18\_15\_C1\_2



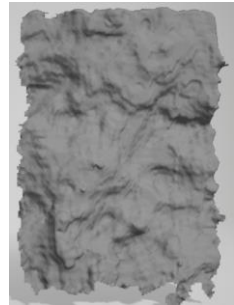
SBG\_C1\_18\_15\_C2\_1



SBG\_C1\_18\_15\_C2\_2



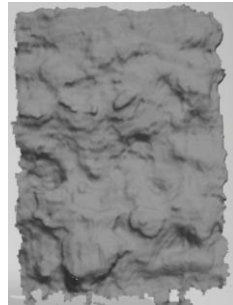
SBG\_C1\_18\_15\_C3\_1



SBG\_C1\_18\_15\_C3\_2



SBG\_C1\_18\_15\_C4\_1



SBG\_C1\_18\_15\_C4

**Apéndice N.** Video Protocoló de imágenes 2D y 3D.**Apéndice O.** Video Medición de succión.

Los apéndices N y O están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.