

EVALUACIÓN DE CURVAS DE RETENCIÓN EN HUMEDECIMIENTO  
Y SECADO PARA MGM DE SUB-BASE GRANULAR

1

EVALUACIÓN DE CURVAS DE RETENCIÓN EN HUMEDECIMIENTO Y  
SECADO PARA MATERIALES GRANULARES MARGINALES (MGM) DE SUB-  
BASE GRANULAR

Juan Andres Ariza Barbosa

Trabajo de Grado para Optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Pd.h. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Co-director:

Pd.h. Allex Eduardo Alvarez Lugo

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

A mi madre, que me enseñó el valor del esfuerzo y la disciplina. A mi familia, que me acompaña durante mi proceso de formación, agradecimiento especial a Eliana Santamaría, que me ha acompañado a lo largo de mi formación profesional y como persona.

### **Agradecimientos**

Agradezco a mi madre, por su apoyo incondicional y el esfuerzo tan grande que ha realizado para salir adelante. A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería Civil y a todas las personas que aportaron de forma significativa a lo largo de mi formación profesional y personal. A los ingenieros Alex E. Alvarez y Vladimir Merchán por compartir su conocimiento, dedicación, apoyo y acompañamiento a lo largo del proceso de investigación.

### Resumen

**Título:** EVALUACIÓN DE CURVAS DE RETENCIÓN EN HUMEDECIMIENTO Y SECADO PARA MATERIALES GRANULARES MARGINALES (MGM) DE SUB-BASE GRANULAR. \*

**Autor:** Juan Andres Ariza Barbosa\*\*

**Palabras Clave:** material granular marginal (MGM), succión total, secado, humedecimiento, curva de retención de agua del suelo, compactación giratoria.

### Descripción

El presente documento establece un análisis comparativo del comportamiento hidráulico de materiales granulares marginales (MGMs) diseñados y producidos a partir de las especificaciones de una subbase granular SBG-38 donde se modificó el contenido de finos trabajando con IP de 8%, 12% y 15. Los materiales de diseño se sometieron a procesos de secado y humedecimiento controlados con el fin de monitorear la evolución del grado de saturación; realizando procesos de medición de la succión total que existe en la matriz de suelo en medios parcialmente saturados utilizando una adaptación del método de papel filtro especificado en el INVIAS, haciendo uso de curvas de retención por modelos de aproximación suministrados por investigaciones previas. Se complementó información suministrada por proyectos de grado anteriores mediante curvas de retención envolventes, haciendo notorio que existe mayor succión en los materiales para grados de saturación similares. Los resultados que los MGMs tienen curvas de retención diferentes, siendo afectadas por el IP, donde, a menor IP se producen medidas de succión total altas.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Pd.h. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Codirector: Pd.h. Alex Eduardo Alvarez Lugo.

**Abstract**

**Title:** EVALUATION OF RETENTION CURVES IN WETTING AND DRYING FOR MARGINAL GRANULAR MATERIALS (MGM) OF GRANULAR SUB-BASE\*

**Autor:** Juan Andrés Ariza Barbosa\*\*

**Keywords:** marginal granular material (MGM), total Suction, Drying, wetting, soil water retention curve, gyratory compaction.

**Description**

This document establishes a comparative analysis of the hydraulic behavior of marginal granular materials (MGM) designed and produced from the specifications of a granular subbase SBG-38 where the content of fines was modified working with IP of 8%, 12% and 15. The design materials were subjected to controlled drying and wetting processes in order to monitor the evolution of the degree of saturation; carrying out measurement processes of the total suction that exists in the soil matrix in partially saturated media using an adaptation of the filter paper method specified in INVIAS, making use of retention curves by approximation models provided by previous investigations, information provided by previous degree projects was complemented by enveloping retention curves, making it evident that there is greater suction in the materials for similar degrees of saturation. The results suggest that the MGMs have different retention curves, being affected by the IP, where, at a lower IP, high total suction measurements are produced.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Pd.h. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Codirector: Pd.h. Allex Eduardo Alvarez Lugo.

**Tabla de contenido**

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN.....                                | 9  |
| 1. OBJETIVOS.....                                | 12 |
| 2. MARCO DE REFERENCIA .....                     | 13 |
| 2.1. MARCO CONCEPTUAL: .....                     | 13 |
| 3. METODOLOGÍA .....                             | 17 |
| 3.1. Granulometría de trabajo .....              | 19 |
| 3.2. Compactación de probetas de desempeño ..... | 20 |
| 3.3. Trayectorias de secado-humedecimiento.....  | 21 |
| 3.4. Medición de succión total.....              | 23 |
| 4. RESULTADOS.....                               | 28 |
| 4.1. Trayectoria de secado: .....                | 28 |
| 4.2. Trayectoria de humedecimiento .....         | 30 |
| 4.3. Curvas de retención .....                   | 32 |
| 5. CONCLUSIONES.....                             | 41 |
| 6. RECOMENDACIONES.....                          | 45 |

### Lista de tablas

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1 <i>Composición y plasticidad de finos para los materiales diseñados</i> .....                        | 18          |
| Tabla 2. <i>Dimensiones de especímenes de diseño</i> .....   | 20          |
| Tabla 3. <i>Parámetros de curva de retención por modelos de aproximación</i> .....                           | 35          |
| Tabla 4. <i>Parámetros de curva de retención por modelos de aproximación para materiales de diseño</i> ..... | 38          |

### Lista de ilustraciones

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Ilustración 1. <i>Box de acrílico y circuito de humedecimiento</i> .....             | 23          |
| Ilustración 2. <i>Manipulación del papel filtro</i> .....                            | 24          |
| Ilustración 3. <i>Montaje de placas para el sistema de succión</i> .....             | 25          |
| Ilustración 4. <i>Montaje del sistema de succión sobre las probetas</i> .....        | 25          |
| Ilustración 5. <i>Aislamiento del montaje tipo “Sándwich” en cava</i> .....          | 26          |
| Ilustración 6. <i>Lectura en balanza de precisión del papel filtro + bolsa</i> ..... | 27          |
| Ilustración 7. <i>Lectura en balanza de precisión de la bolsa</i> .....              | 27          |

**Lista de figuras**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 1. <i>Curvas granulométricas para MGMs y material de control</i> .....  | 19          |
| Figura 2. <i>Curvas de compactación de material de diseño</i> .....  | 21          |
| Figura 3. <i>Condiciones ambientales en trayectoria de secado</i> .....  | 29          |
| Figura 4. <i>Evolución del grado de saturación en trayectoria de secado</i> .....                                    | 30          |
| Figura 5. <i>Evolución del grado de saturación en trayectoria de humedecimiento</i> .....                            | 31          |
| Figura 6. <i>Curvas de retención ajustadas con aproximación de Van Genuchten para muestras compactadas</i> .....     | 33          |
| Figura 7. <i>Curvas de retención ajustadas con aproximación de E.E. Alonso (2018)</i> .....                          | 34          |
| Figura 8. <i>Curvas de retención ajustadas con aproximación de Van Genuchten para materiales de diseño</i> .....     | 36          |
| Figura 9. <i>Curvas de retención ajustadas con aproximación de E.E. Alonso (2018)</i> .....                          | 37          |
| Figura 10. <i>Granulometría final de MGMs 1-2. Adaptada de Martínez y Vargas (Martínez &amp; Vargas, 2022)</i> ..... | 40          |

## INTRODUCCIÓN

Desde tiempos antiguos, la humanidad tiene la necesidad de desplazarse de un lugar a otro; la creación de asentamientos y el desarrollo de civilizaciones fue posible en gran medida gracias a la creación de rutas de comunicación y su evolución posterior a carreteras, estructuras de pavimento usando materiales estructurales y materiales reciclados. Actualmente, en la infraestructura vial se utilizan materiales con propiedades adecuadas para disipar esfuerzos y deformaciones de forma eficiente.

El territorio nacional no es la excepción, “Colombia cuenta con una red vial de 205.379 km de carretera, de los cuales el 9% (17.958 km) corresponde a la red primaria, 22% (45.137 km) corresponde a la red vial secundaria y el 69% (142.284 km) de la red vial corresponde a vías terciarias” (Ministerio de transporte, 2020). Las vías terciarias tienen un papel importante en la conexión intermunicipal del país para lograr el desarrollo social y económico de los colombianos. Adicionalmente, con el pasar del tiempo, ha aumentado considerablemente la cantidad de vehículos que circulan en el territorio nacional.

“Para 2022, la venta de vehículos nuevos presentó un incremento del 9% con respecto a 2021” (Ministerio de transporte, 2022), esto genera un aumento en los volúmenes de tránsito, incrementando las cargas de diseño (i.e., número de ejes equivalentes) en estructuras de pavimento, provocando daños que requieren mantenimiento en menor tiempo del esperado.

## Y SECADO PARA MGM DE SUB-BASE GRANULAR

Uno de los principales problemas que se presentan en la ejecución de procesos de construcción y mantenimiento vial es la disponibilidad de materiales, asociado a costos elevados de transporte, y dificultad en el acceso a fuentes de materiales, entre otros.

A partir de esta problemática surge la necesidad de implementar una solución innovadora como la utilización de materiales granulares marginales (MGMs) en la construcción y mantenimiento de vías terciarias.

Un MGM se define como un suelo que según la normativa vigente no puede clasificarse como material de calidad estándar para su uso en obras civiles (Blanco, 2016), pero que puede usarse con éxito bajo condiciones ambientales especiales o bajo técnicas de construcción y mejoramiento aumentando sus propiedades de resistencia (SANDOVAL , y otros, 2019). Un MGM mejorado y acondicionado puede utilizarse potencialmente en el mejoramiento de vías terciarias, siendo una solución viable a nivel económico y ambiental (Liebenberg & Visser, 1819).

Los MGMs suelen tener alta actividad y contenido de finos, lo cual se asocia a disminuciones de su resistencia e incremento de su deformabilidad en comparación con materiales de calidad estándar. En este contexto, la interacción entre la matriz de partículas sólidas y el agua (i.e., succión) es un fenómeno crucial en la comprensión de la rigidez y la resistencia a la deformación permanente de los MGMs. Así, la succión es uno de los parámetros principales dentro de los análisis hidráulicos del suelo, puesto que se relaciona directamente con las deformaciones presentes en el suelo (García, y otros, 2017).

Este proyecto de investigación se enfoca en evaluar el comportamiento hidráulico de MGMs parcialmente saturados por medio de la medición indirecta de la succión total. Para este fin, se emplean probetas de MGMs con variaciones del índice de plasticidad con el fin de establecer una idea preliminar del comportamiento de los materiales para su uso potencial como capa estructural de un pavimento, sometida a cargas vehiculares y efectos ambientales (i.e., cambios de humedad).

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Establecer las curvas de retención de agua en materiales granulares marginales (MGM) de sub-base granular teniendo en cuenta trayectorias de secado y humedecimiento.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar mediante la técnica del papel filtro la succión total de muestras marginales MGM sometidas a secado y humedecimiento.
- Interpretar los resultados experimentales a la luz de ecuaciones disponibles en la literatura que definen las curvas de retención.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

A continuación, se presentan las definiciones de los conceptos relevantes para la investigación.

### 2.1. MARCO CONCEPTUAL:

**Succión:** La succión del suelo es el resultado de la acción capilar y la concentración iónica en los poros con agua. Cuando ambos mecanismos se encuentran activos se le conoce como succión total (Bulut & Leong, 2018). La normativa (INVIAS, 2013) define la succión como una presión manométrica negativa que deberá ser aplicada sobre un reservorio de agua de manera tal que exista equilibrio sobre el sistema a través de una membrana semipermeable.

La succión total (asociada a la humedad relativa mediante la ley psicrométrica) se define como la suma aritmética entre la succión matricial (acción capilar) y la succión osmótica (condición de equilibrio de presión por medio de una membrana semipermeable).

Según (Lee & Wray, 1995) se afirma que la succión total se relaciona con una cantidad de energía con la que la matriz de suelo tiene la capacidad de retener o mantener el contenido de agua existente en sus poros. Así mismo, en la normativa (INVIAS, 2013) se afirma que la succión indica el estado de energía del agua del suelo como una presión negativa que ejerce el agua presente en los poros de un suelo parcialmente saturado.

## Y SECADO PARA MGM DE SUB-BASE GRANULAR

**Curvas de retención de agua del suelo:** Es una representación gráfica que expresa la relación entre el grado de saturación de una muestra de suelo y la succión total existente en el sistema suelo-agua reflejando la capacidad que tiene el suelo para retener agua (Bejar Pulido, Cantú Silva, Yáñez Diaz, & Robles , 2020); estas relaciones pueden obtenerse de manera directa o indirecta usando diversos métodos que incluyen equipos como tensiómetros, sensores de conductividad térmica, psicrometría y control de humedad (William & Ning, 2019).

Las curvas de retención se establecen por medio de modelos matemáticos; uno de los modelos más utilizados es el de Van Genuchten (Van Genuchten, Leij, & Yates, 2009).

**Ecuación de Van Genuchten:** Es un modelo que relaciona el contenido volumétrico de agua en relación con la cabeza de succión, con el fin de establecer una función analítica para el estudio de flujo del agua en suelos parcialmente saturados (Van Genuchten, Leij, & Yates, 2009). Se realizó una adaptación del modelo de Van Genuchten utilizada por Utrera (Utrera Pérez, 2022).

$$S_e = \frac{S_r - S_{rl}}{S_{rs} - S_{rl}} = \left( 1 + \left( \frac{u_a - u_w}{P_o} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda} \quad (1)$$

Donde:

$S_e$ : grado medio de saturación.

$S_r$ : grado de saturación del suelo.

## Y SECADO PARA MGM DE SUB-BASE GRANULAR

$S_{rl}$ : grado de saturación mínimo.

$S_{rs}$ : grado de saturación máximo.

$u_a - u_w$ : succión total.

$P_o$ : valor de entrada de aire.

$\lambda$ : factor de forma del modelo.

El valor de entrada de aire representa el valor de succión a partir del cual el aire entre de manera efectiva en el sistema poral, formando los capilares. Se asocia al inicio de la desaturación efectiva (Fredlund, 2003).

**Modelo exponencial:** Es una ecuación utilizada por Alonso (Alonso, Lloret, & Romero, 2018) en sus investigaciones. El modelo se compone de 3 parámetros que definen la forma, pendiente y dominio de la curva de retención.

$$S_e = S_{ro} - b(1 - e^{-a(u_a - u_w)}) \quad (2)$$

Donde:

$S_{ro}$  = Valor máximo de grado de saturación.

$b$  = Dominio de la curva de retención.

$a$  = Pendiente de la curva de retención en  $\text{MPa}^{-1}$ .

## 2.2.MARCO TEÓRICO:

**Compactación por método giratorio:** “Es un proceso de aplicación de acciones simultáneas de presión vertical y acción giratoria, con un ángulo de inclinación respecto al eje vertical, con el fin de asemejar los procesos constructivos realizados en obras civiles” (Camacho, Reyes, & Méndez, 2007).

En el procedimiento de compactación giratoria es de interés la identificación del punto de bloqueo (locking point). Este se define como los primeros tres giros que mantienen constante la altura del espécimen donde los dos giros anteriores mantienen la misma lectura de altura de la probeta compactada. Se establece con el fin de garantizar la eficiencia del contacto agregado-agregado conservando las propiedades de permeabilidad y drenaje a través del tiempo (Alvarez, Mora, & Espinosa, 2018).

**Técnica de papel filtro:** Es un procedimiento de ensayo de laboratorio que permite medir la succión de un suelo de forma indirecta, siendo uno de los métodos de menor costo de ensayo comparado con análisis gravimétricos de contenidos de agua; sin embargo, también presenta problemas con la sensibilidad que el papel filtro tiene con la humedad de la atmósfera, por lo que es un proceso que tiene una temperatura y humedad controlada (William & Ning, 2019).

Este método utiliza el papel filtro como sensor pasivo de la succión matricial (si el papel se encuentra en contacto con el suelo) y total del suelo (si el papel no está en contacto con el suelo) realizando un equilibrio de humedad (INVIAS, 2013). El método de papel filtro maneja rangos de succión matricial

## Y SECADO PARA MGM DE SUB-BASE GRANULAR

entre 0 a 1.500 kPa y una succión total de 3.000 kPa a 100.000 kPa (Likos & Lu, 2003).

El papel filtro utilizado mayormente es el Whatman No. 42 con un diámetro conveniente de 5.5 cm (INVIAS, 2013); se utiliza también papel filtro con diámetro de 12.7 cm. El papel filtro seleccionado presenta curvas de calibración conocidas y es un producto comercial (Schanz & Setiano Samingan, 2005).

### 3. METODOLOGÍA

Para la manufacturación de las probetas de los MGMs se utilizó material de cantera y material triturado; estos materiales fueron extraídos de la cantera Paviandi ubicada en el Km 4.5 vía Piedecuesta – Aratoca, Santander.

El material de cantera es usado como principal componente. Dicho material presenta un índice de plasticidad de 11% en su fracción fina (pasa tamiz No.200), un desgaste por sulfatos del 3.70%, equivalente de arena de 48% y un desgaste en la máquina de los ángeles de 60.7% (Gelves, 2021). Este último parámetro no satisface las especificaciones del INVIAS para subbase y base granular que corresponden, respectivamente, a 50% y 40% a 500 revoluciones (INVIAS, 2013).

El diseño experimental del proyecto global de evaluación de MGMs, al cual se asocia el presente trabajo, incluyó la caracterización de MGMs con diferentes índices de plasticidad (IP) y contenido de finos. Para este fin, fue necesario realizar combinaciones de suelos finos para alcanzar los valores preestablecidos de IP. De esta forma, la fracción

## Y SECADO PARA MGM DE SUB-BASE GRANULAR

fin de los MGMs fue conformada combinando material fino producto de trituración, caolinita, y bentonita.

El material fino triturado fue obtenido por medio de la trituración de roca y posterior tamizado sobre tamiz No. 200; este material es inerte, no presenta actividad con el agua (no líquido, no plástico, NL-NP). La caolinita y bentonita son de distribución comercial y fueron importadas por medio de la empresa Comercial Fox S.A.S ubicada en la vía Mosquera-Soacha, Cundinamarca. Estos materiales tienen IP del 11.68% y 36.0% respectivamente (Martínez & Vargas, 2022).

En la presente investigación se diseñaron tres MGMs con la idea de evaluar la influencia del IP en la evolución de la curva de retención para un contenido de finos del 21%. La composición de fracciones y tipo de materiales se presenta en la tabla 1. Adicionalmente, se incluye el análisis para la muestra de control (SBG-C1) que se toma como referencia para los MGMs.

**Tabla 1.**

*Composición y plasticidad de finos para los materiales diseñados.*

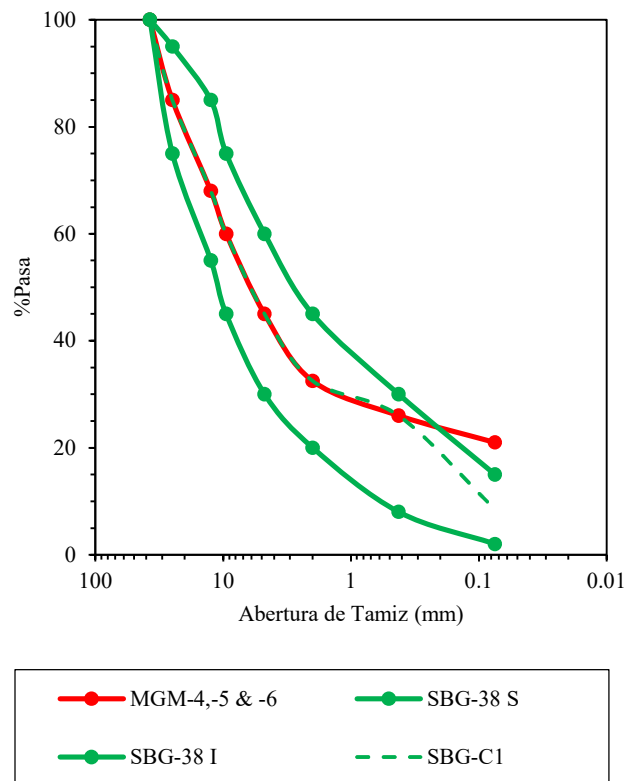
| Probeta       | Contenido de finos (%) | IP (%) | Composición de finos |           |           |           |
|---------------|------------------------|--------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
|               |                        |        | Cantera              | Triturado | Caolinita | Bentonita |
| <b>MGM-4</b>  | 21                     | 8      | 84.50%               | 15.50%    | 0.00%     | 0.00%     |
| <b>MGM-5</b>  | <b>21</b>              | 12     | 49.43%               | 0.00%     | 49.43%    | 1.14%     |
| <b>MGM-6</b>  | <b>21</b>              | 15     | 48.83%               | 0.00%     | 48.83%    | 2.34%     |
| <b>SBG-C1</b> | 8.5                    | 0      | 40.00%               | 60.00%    | 0.00%     | 0.00%     |

### 3.1. Granulometría de trabajo

Para los materiales evaluados se presenta la misma composición granulométrica. Esta se relaciona con las franjas granulométricas especificadas por (INVIAS, 2013). Como puede observarse en la figura 1, las probetas MGM4-5-6, objeto de estudio superan el porcentaje de fracción fina que se establece en la especificación para material tipo subbase granular, por otra parte, el material de control cumple con las especificaciones de granulometría del INVIAS.

**Figura 1.**

*Curvas granulométricas para MGMs y material de control.*



### 3.2. Compactación de probetas de desempeño

El proceso de preparación, curado, y compactación de las probetas en el compactador giratorio de cada material de diseño se describe en el protocolo establecido por (Martínez & Vargas, 2022). Cada material de diseño presenta una curva de compactación característica, esta información fue suministrada por (Martínez & Arroyo, 2023) y (Jaimes & Cetina, 2022) (ver figura 2). Es posible notar que los MGM 4-5-6 tienen una humedad óptima de compactación superior a la SBG-C1 de control. El aumento de actividad de los finos (incremento del IP) tiende a reducir el peso específico seco máximo alcanzado en el proceso de compactación.

Teniendo en cuenta la composición granulométrica se establece la cantidad de material necesario para la manufacturación de probetas de diámetro de 15 cm y una altura promedio de 20 cm. Los especímenes obtenidos presentan variaciones en las dimensiones respecto a las establecidas como objetivo, los valores obtenidos son plasmados en la tabla 2.

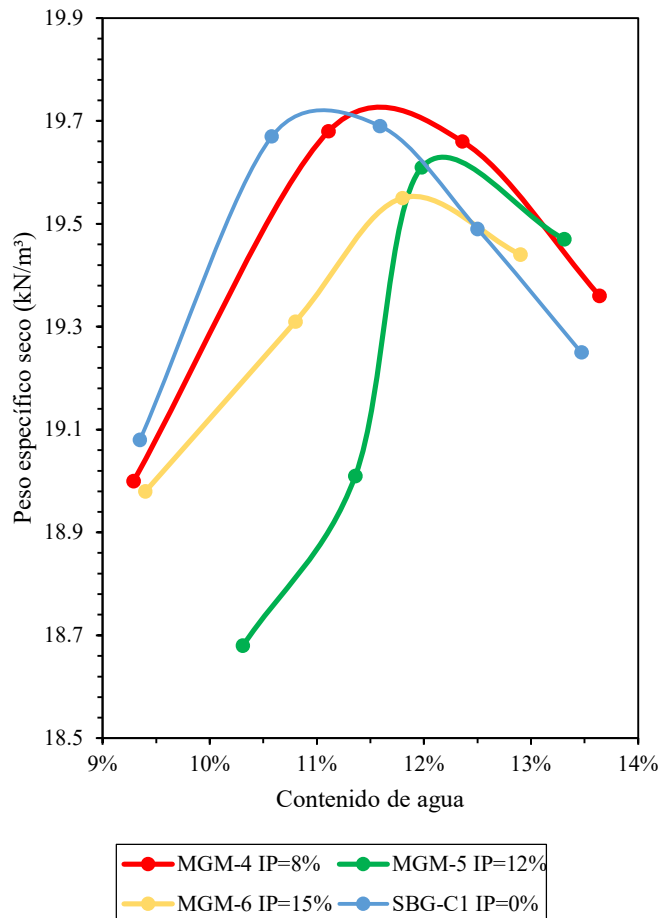
**Tabla 2.**

*Dimensiones de especímenes de diseño.*

| <b>Material</b> | <b>Altura<br/>(cm)</b> | <b>Diámetro<br/>(cm)</b> | <b>Volumen<br/>total (cm<sup>3</sup>)</b> |
|-----------------|------------------------|--------------------------|---|
| <b>MGM-4</b>    | 19.4                   | 15.17                    | 3506.4                                    |
| <b>MGM-5</b>    | 19.5                   | 15                       | 3445.9                                    |
| <b>MGM-6</b>    | 19.4                   | 15                       | 3428.3                                    |

**Figura 2.**

*Curvas de compactación de material de diseño.*



Los MGMs Adoptando un peso específico seco de 19.71 kN/m<sup>3</sup>, 19.60 kN/m<sup>3</sup> y 19.51 kN/m<sup>3</sup> para las probetas MGM-4, MGM-5 y MGM-6 respectivamente.

### 3.3. Trayectorias de secado-humedecimiento

Se llevó a cabo procesos de secado y humedecimiento sobre las probetas compactadas, con el ánimo de evaluar la succión total ante estas trayectorias hidráulicas y simular posibles cambios de humedad en condiciones de servicio. Para ello, se realizó

## Y SECADO PARA MGM DE SUB-BASE GRANULAR

como fase inicial la reducción del contenido de agua de las probetas en dos puntos porcentuales con respecto a la humedad óptima de compactación.

La trayectoria de secado se realizó en condiciones ambientales en el laboratorio. Durante el proceso se realizaron mediciones de masa de las probetas en función del tiempo, temperatura y humedad relativa (HR). Complementariamente, se calcularon relaciones de fase de interés (humedad, porosidad, índice de vacíos y grado de saturación).

Para el proceso de humedecimiento de los especímenes de diseño, se realizó la adición de vapor de agua a baja presión para favorecer el transporte desde la fuente a la probeta en un medio aislado en condiciones de humedad relativa del 99%, a una temperatura media de 22°C (ver ilustración 1).

Las lecturas de aumento de masa de la probeta se registraron y se obtuvieron las respectivas relaciones de fase en el instante de tiempo de la medición. Este protocolo se realizó hasta alcanzar un aumento en un punto porcentual del contenido de humedad respecto a la humedad óptima de compactación.

**Ilustración 1.**

*Box de acrílico y circuito de humedecimiento.*



**3.4. Medición de succión total**

Se llevó a cabo el protocolo de medición de succión según la norma de ensayo INV-E-159-13 (INVIAS, 2013). Realizando una adaptación con los equipos disponibles en el centro de caracterización de materiales de la Universidad Industrial de Santander. Se realizó el secado de los papeles filtro por un tiempo estimado de 16 a 24 horas a  $110 \pm 15^\circ\text{C}$ . Se dejó un periodo de enfriamiento del papel filtro en un lapso de 30 minutos en una bolsa plástica que permita el aislamiento del papel a las condiciones de humedad en el ambiente, el traslado del papel filtro se realiza con unas pinzas como se muestra en la ilustración 2 para evitar la manipulación inadecuada del papel.

**Ilustración 2.**

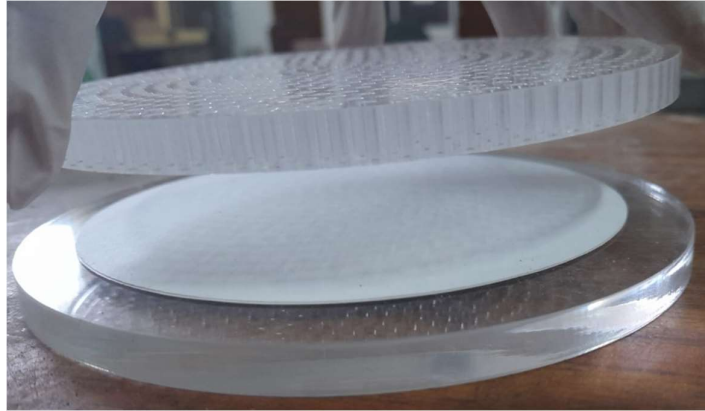
*Manipulación del papel filtro.*



Se implementó un sistema de medición de succión total de cada material de diseño utilizando discos de acrílico perforados y no perforados de 15cm de diámetro como se ilustra en la ilustración 3. Los discos perforados se colocan en contacto con la cara superior e inferior de la muestra para permitir el flujo de vapor de agua desde la muestra hacia los discos de papel filtro, seguido de esto, se realiza un sello superior e inferior con discos no perforados para asegurar el sistema (ver ilustración 4).

**Ilustración 3.**

*Montaje de placas para el sistema de succión.*



**Ilustración 4.**

*Montaje del sistema de succión sobre las probetas.*



Se ubican 3 papeles filtro por cada zona (superior e inferior), donde se lleva a cabo la envoltura del sistema usando papel vinipel como se muestra en la ilustración 5.

**Ilustración 5.**

*Aislamiento del montaje tipo “Sándwich” en cava.*



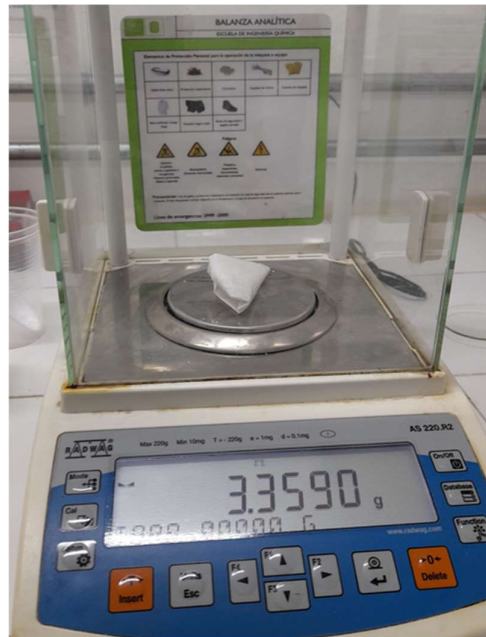
Se coloca el sistema en un recipiente de aislamiento térmico (ver ilustración 5), garantizando condiciones constantes de humedad relativa y temperatura; este proceso se realiza por un tiempo mínimo de equilibrio de 7 días.

Una vez finaliza el tiempo de equilibrado, se realiza el proceso de extracción del envoltorio y retiro de los discos con los papeles filtro.

Posteriormente, se coloca cada papel filtro en una bolsa con sello hermético, se lleva a cabo la medición de peso del papel filtro con la bolsa y el peso de la bolsa con una balanza de precisión de 0.0001 g como se muestra en las ilustraciones 6 y 7.

**Ilustración 6.**

*Lectura en balanza de precisión del papel filtro + bolsa.*



**Ilustración 7.**

*Lectura en balanza de precisión de la bolsa.*



Una vez realizada la lectura de la condición húmeda, se realiza el proceso de secado de papeles filtro por un tiempo mínimo de 2 horas, realizando nuevamente el proceso de almacenamiento en bolsas herméticas, conservando así la clasificación realizada en condición húmeda.

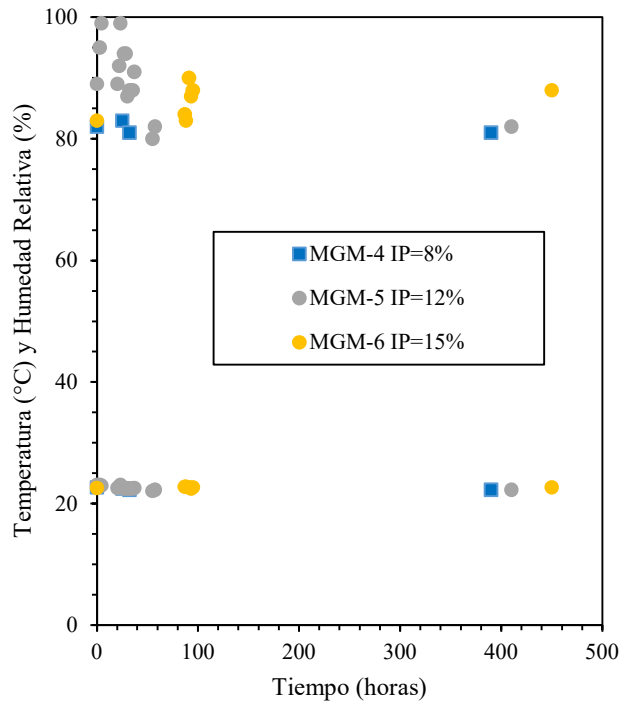
#### **4. RESULTADOS**

##### **4.1. Trayectoria de secado:**

Las trayectorias de secado de los MGMS se realizaron bajo las condiciones ambientales del centro de caracterización de materiales de la Universidad Industrial de Santander. Se procedió a realizar mediciones de HR y temperatura del ambiente que rodeaba las muestras con los objetivos de tener una referencia de succión total impuesta por el ambiente y sus variaciones, durante el proceso de secado. Como se puede observar en la figura 3, las medidas de HR para 420 horas (17.5 días) estuvieron entre el 80 y 95% con un valor medio de 87.5%. Por otra parte, las mediciones de temperatura tienen un comportamiento más estable con valor promedio de  $22.5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 3.**

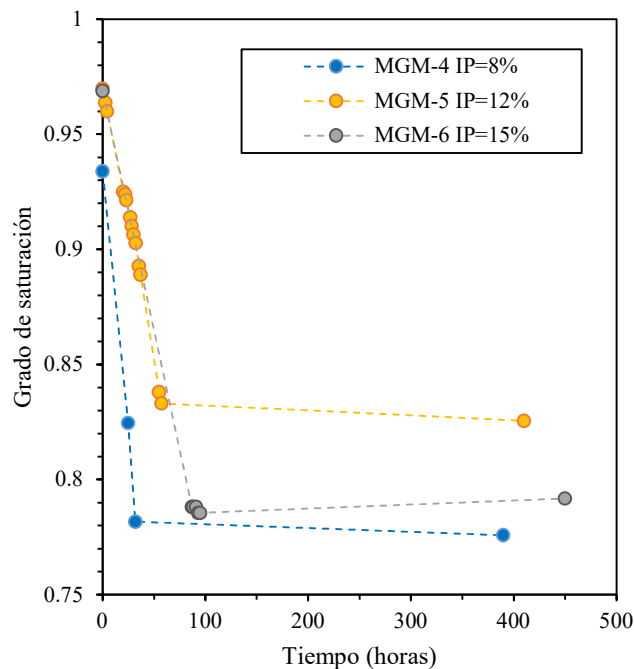
*Condiciones ambientales en trayectoria de secado.*



El grado de saturación se reduce de forma acelerada en las primeras 100 horas como se presenta en la figura 5. Una vez se alcanza el contenido de agua dos puntos porcentuales debajo de la humedad óptima de compactación. El proceso de secado al aire termina y las probetas son sometidas a la instalación del sistema de succión, siendo acondicionadas para el proceso de equilibrado de los materiales para que el volumen de agua se distribuya uniformemente en las probetas con el fin de garantizar medidas de succión uniformes.

**Figura 4.**

*Evolución del grado de saturación en trayectoria de secado.*



Posterior al tiempo de equilibrado, existe una disminución del grado de saturación medido del 0.6% y 0.7% para los MGM-4 y MGM-5 respectivamente en comparación con el valor objetivo de fase por una leve difusión presentada en sistema de sellado implementado (recubrimiento con vinipel® y aislamiento en cava de poliestireno expandido). Caso contrario del valor de grado de saturación de MGM-6 aumentó en un 0.6% por el ingreso de agua del ambiente por difusión en el sello realizado.

#### 4.2. Trayectoria de humedecimiento

La trayectoria de humedecimiento se llevó a cabo mediante transferencia de vapor dentro de un circuito cerrado con HR cercana al 100% (ambiente saturado por vapor de agua) descrito previamente. Este proceso es paulatino y puede tomar varios días como se

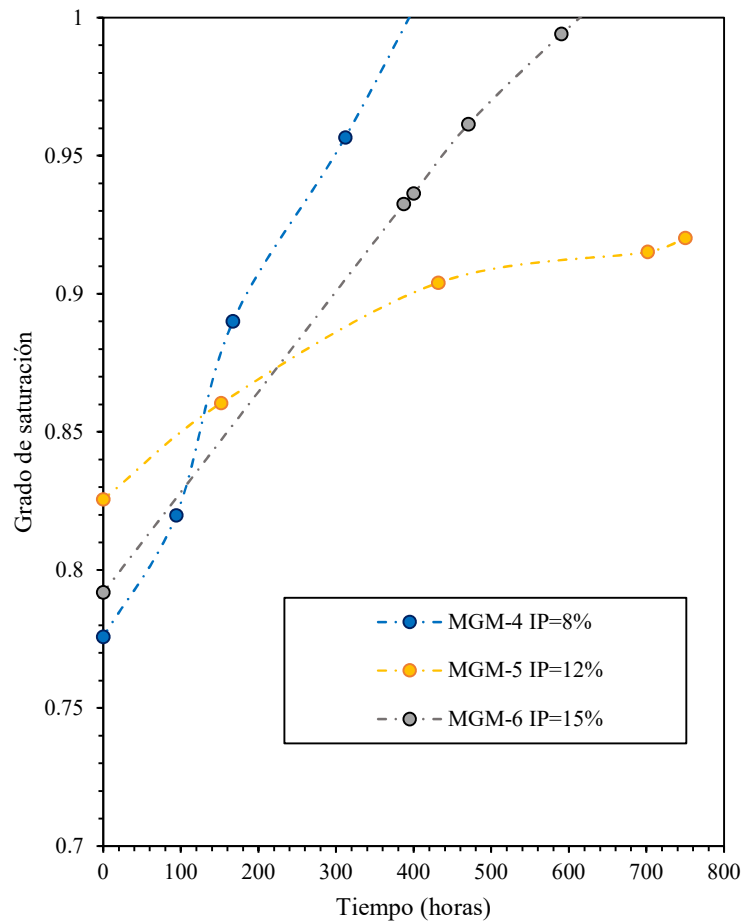
## Y SECADO PARA MGM DE SUB-BASE GRANULAR

puede observar en los datos de evolución de grado de saturación en función del tiempo para los MGMs.

Durante la fase de humedecimiento, MGM4 y MGM-6 alcanzaron grados de saturación muy cercanos a 1.0, incluso antes de llegar a la humedad objetivo de compactación +1%, presentando en su configuración ensanchamiento del diámetro inferior y evidencias de fisuración (ver figura 5). Con lo cual, el protocolo debe ser revisado en futuras investigaciones para analizar este tipo de trayectorias.

**Figura 5.**

*Evolución del grado de saturación en trayectoria de humedecimiento.*



El material MGM-6 se acercó a un estado de saturación en menor tiempo comparado con el MGM-5, por otro lado, la evolución de ganancia de agua de la probeta MGM-4 fue mayor que los otros materiales.

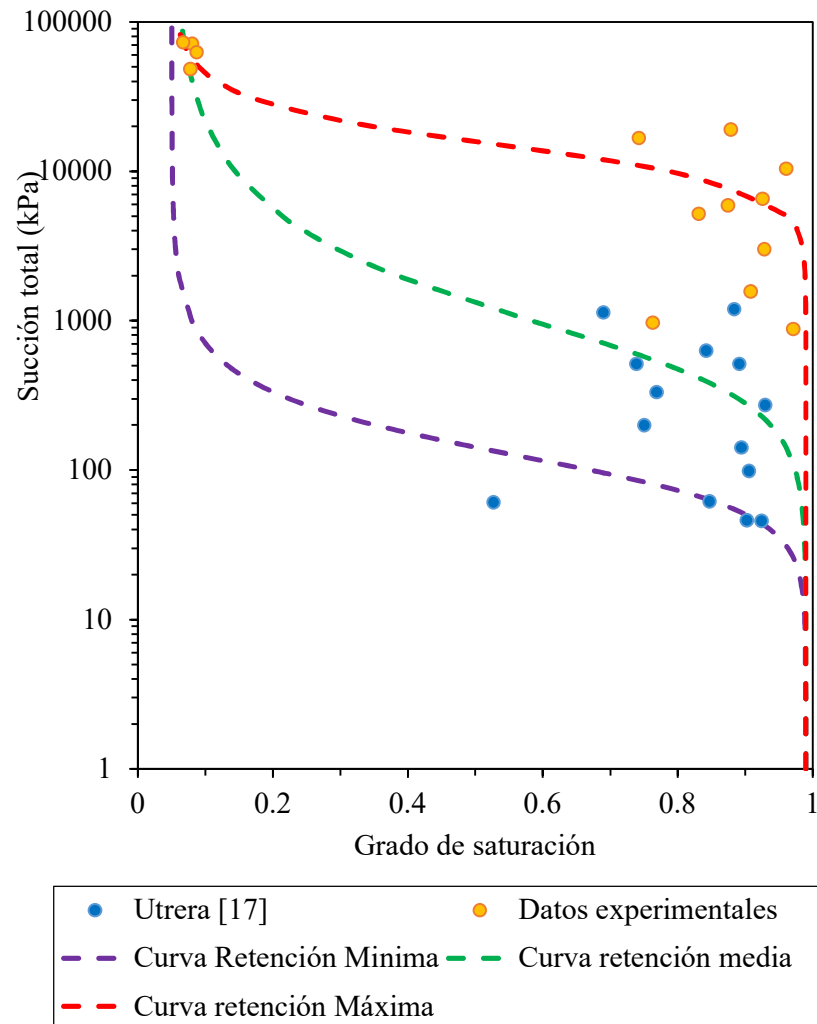
#### **4.3. Curvas de retención**

Se llevó a cabo un análisis comparativo de las mediciones de succión de materiales de diseño con respecto a mediciones realizadas en proyectos de grado pasados filtradas y analizadas por (Utrera Pérez, 2022).

Como se puede observar en las figuras 6 y 7 las mediciones realizadas se presentan valores inferiores de humedad absorbida por el papel filtro, cercanas al contenido de agua de las probetas en las trayectorias de secado y humedecimiento, presentando valores de succión total mayores a los obtenidos por (Utrera Pérez, 2022), incluso a valores de entrada de aire (AEV) mayores a 1 MPa.

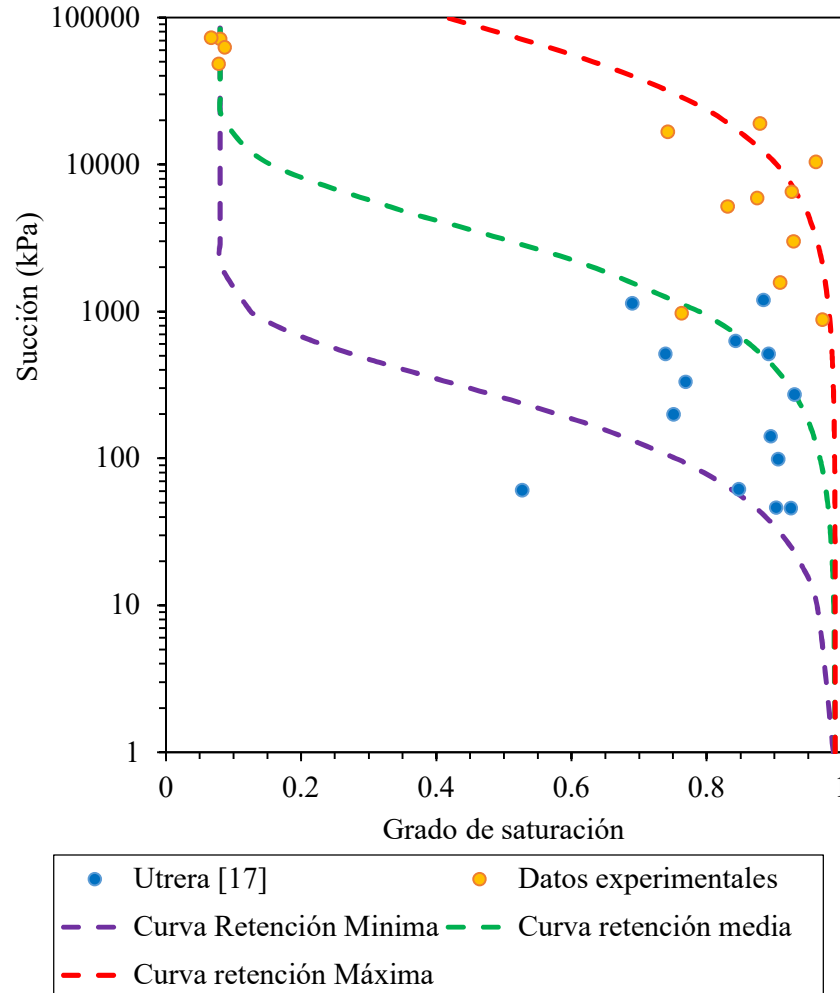
**Figura 6.**

*Curvas de retención ajustadas con aproximación de Van Genuchten para muestras compactadas.*



**Figura 7.**

*Curvas de retención ajustadas con aproximación de E.E. Alonso (2018).*



Teniendo en cuenta la variabilidad de todo el conjunto de datos, preliminarmente, se han ajustado tres posibles escenarios de curvas de retención de agua del suelo, mediante modelos de aproximación propuestos por Van Genuchten y la ecuación exponencial propuesta por (Alonso, Lloret, & Romero, 2018).

Estos escenarios se recrearon mediante el ajuste de los parámetros de AEV y forma de las curvas de retención (ver tabla 3), abarcando los datos experimentales y las mediciones filtradas por (Utrera Pérez, 2022). Se observa que, los datos experimentales

## Y SECADO PARA MGM DE SUB-BASE GRANULAR

presentan succiones mayores en comparación con la información filtrada para grados de saturación entre 0.7 y 1.0 (ver figuras 8 y 9). Para la ecuación utilizada por (Alonso, Lloret, & Romero, 2018) el escenario de curva de retención máxima no permite un ajuste adecuado con los parámetros del modelo, ya que, no se acopla a los datos experimentales a bajos grados de saturación.

**Tabla 3.**

*Parámetros de curva de retención por modelos de aproximación.*

| <b>Parámetros de curvas de retención</b> |                             |               |              |               |
|--|-----------------------------|---------------|--------------|---------------|
| <b>Modelo</b>                            | <b>Curva/<br/>Ítem</b>      | <b>Mínima</b> | <b>Media</b> | <b>Máxima</b> |
| <b>Van</b>                               | $\lambda$                   | 0.6           | 0.45         | 0.7           |
|  | <b>Po (Mpa)</b>             | 0.1           | 0.6          | 13            |
| <b>Genuch<br/>ten.</b>                   | <b>Srl</b>                  | 0.05          | 0.05         | 0.05          |
|  | <b>Srs</b>                  | 0.99          | 0.99         | 0.99          |
| <b>E.E.</b>                              | <b>Sro</b>                  | 0.99          | 0.99         | 0.99          |
| <b>Alonso<br/>(2018).</b>                | <b>a (Mpa<sup>-1</sup>)</b> | 3             | 0.25         | 0.01          |
|  | <b>b</b>                    | 0.91          | 0.91         | 0.91          |

Para la ecuación exponencial, los parámetros de correlación no tienen una representación física, únicamente expresan la forma y pendiente de las curvas de retención (ver figura 9). Siendo similar a lo obtenido mediante el modelo de aproximación de Van Genuchten (ver figura 8), sin embargo, el modelo exponencial se ajusta de una mejor manera en grados de saturación bajos.

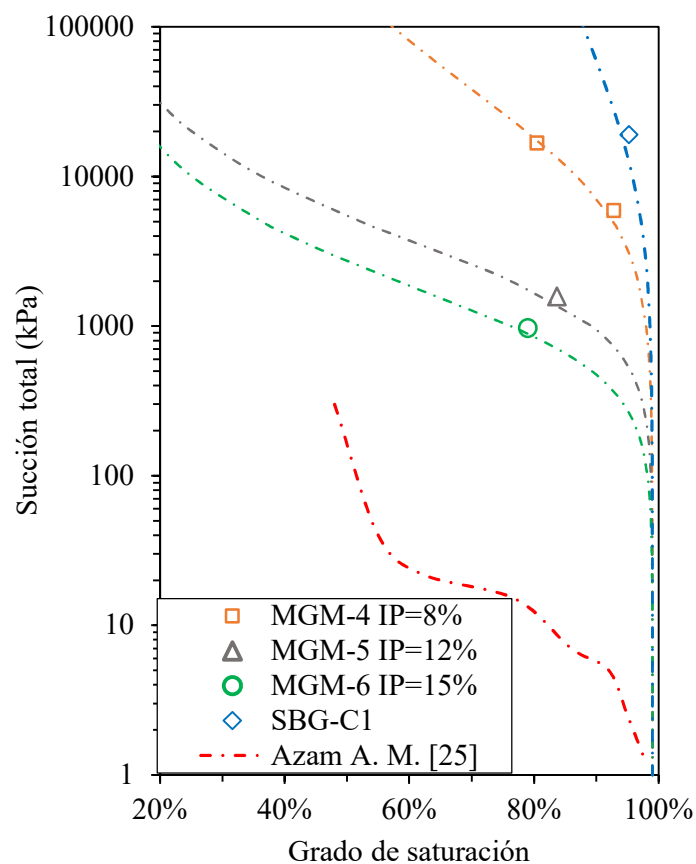
## Y SECADO PARA MGM DE SUB-BASE GRANULAR

Para los MGMs, se realizaron mediciones de succión en la trayectoria de secado, donde, se estableció una curva de retención para cada espécimen como se muestra en las figuras 15 y 16. Los parámetros de la curva de aproximación para cada material de diseño se plasman en la tabla 4.

MGM-4 reporta valores de succión mayores que las probetas de materiales MGM-5 y MGM-6 que presentan valores de succión medidos de orden cercano a 1 MPa.

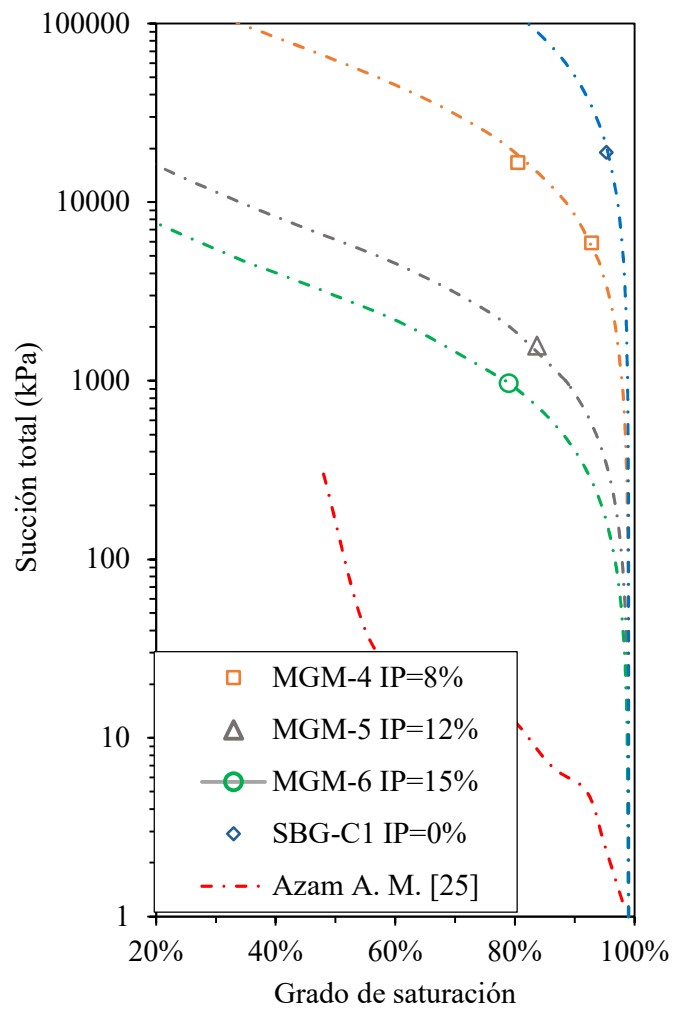
**Figura 8.**

*Curvas de retención ajustadas con aproximación de Van Genuchten para materiales de diseño.*



**Figura 9.**

*Curvas de retención ajustadas con aproximación de E.E. Alonso (2018).*



**Tabla 4.**

*Parámetros de curva de retención por modelos de aproximación para materiales de diseño.*

| Modelo                 | Parámetros de curvas de retención |                |                 |                 |                 |
|------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                        | Curva/<br>Ítem                    | MGM-4<br>IP=8% | MGM-5<br>IP=12% | MGM-6<br>IP=15% | SBG-C1<br>IP=0% |
| Van Genuchten.         | $\lambda$                         | 0.2            | 0.4             | 0.4             | 0.05            |
|                        | Po (Mpa)                          | 10             | 2               | 1               | 10              |
|                        | Srl                               | 0.05           | 0.05            | 0.05            | 0.05            |
|                        | Srs                               | 0.99           | 0.99            | 0.99            | 0.99            |
| E.E. Alonso<br>(2018). | Sro                               | 0.99           | 0.99            | 0.99            | 0.99            |
|                        | a (Mpa <sup>-1</sup> )            | 0.012          | 0.12            | 0.25            | 0.002           |
|                        | b                                 | 0.93           | 0.93            | 0.93            | 0.93            |

Los valores de AEV para los MGMs se encuentran en el rango de valores de suelos finos. Donde, el MGM-4 reporta el valor más alto de AEV con 10 MPa. Comparando estos resultados con la investigación realizada por (Azam, Cameron, Gabr, & Rahman, 2014), donde, para un material granular con adición de partículas finas del 7% se reportan valores de entrada de aire entre 5 y 7 MPa.

De manera similar, en otro estudio de (Azam, Cameron, & Rahman, 2013) para material granular mejorado con mampostería presenta AEV con orden de magnitud entre 0.4 MPa a 3 MPa. Adicional a esto, los valores de succión matricial obtenidos presentan una orden de magnitud menor comparada con los materiales de diseño (ver figuras 8 y 9). Por tanto, el comportamiento hidráulico de los MGMs en relación con la succión total es superior respecto a un material granular mejorado con mampostería. Sin embargo,

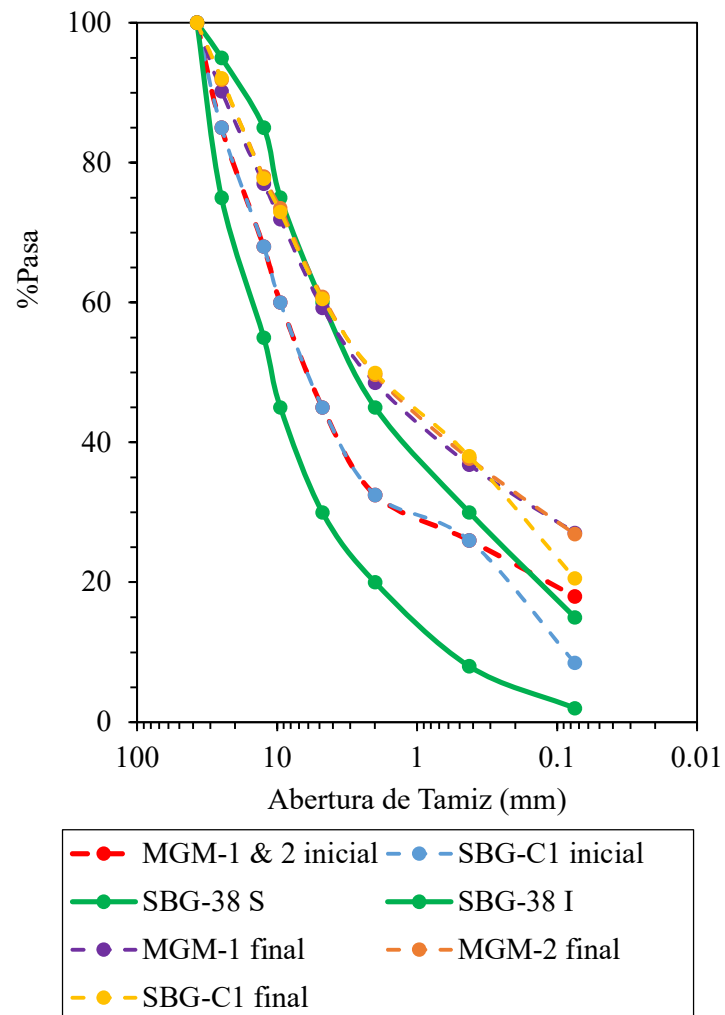
## Y SECADO PARA MGM DE SUB-BASE GRANULAR

resulta ser una diferencia abismal, mostrando comportamientos atípicos. Analizando investigación efectuada por (Martínez & Vargas, 2022), la composición granulométrica de un MGM posterior a procesos de compactación se ve altamente afectada.

Como se observa en la figura 10, las fracciones gruesas se fracturan reduciendo su tamaño, a tal punto que los MGMs que se diseñaron inicialmente no presenten el mismo comportamiento una vez se realiza el proceso de compactación. Esto resulta ser una causa de las altas variaciones de los datos experimentales comparados con investigaciones previas.

**Figura 10.**

*Granulometría final de MGMs 1-2. Adaptada de Martínez y Vargas (Martínez & Vargas, 2022).*



## 5. CONCLUSIONES

La implementación del protocolo de medición de succión con discos perforados y no perforados es eficiente para los tiempos de equilibrio de las muestras, ya que, de acuerdo con los datos experimentales, en 7 días de aislamiento, los MGMs presentaron un 0.6% de incremento o disminución en su grado de saturación. En la trayectoria de secado, los MGMs alcanzan la fase objetivo en un tiempo de 80 horas. Sin embargo, para la trayectoria de humedecimiento, los MGMs se fisuran y presentan cambios volumétricos antes de llegar a la humedad objetivo de compactación +1%; dado que, alcanzan su estado de saturación antes de llegar a la fase objetivo, por tanto, debe revisarse el protocolo establecido, implementado una condición en la trayectoria de humedecimiento que no supere el 93% de grado de saturación.

La metodología utilizada para la toma de información es altamente sensible a las condiciones del medio de estudio, los tiempos de equilibrado, la evolución del grado de saturación durante las trayectorias de secado y humedecimiento y el estado de los equipos empleados, generando una variabilidad en las mediciones, no obstante, se agiliza el proceso de caracterización de los MGMs, siendo un punto de referencia para el mejoramiento de los protocolos establecidos.

Los reportes de datos experimentales de succión son elevados en comparación a investigaciones previas; dado que, los MGMs se ven claramente afectados por el cambio de composición granulométrica posterior a procesos de compactación giratoria. Adicional a esto, los resultados muestran que las curvas de retención se ven afectadas con la

variación del IP, presentando un orden de valores diferentes comparados con materiales granulares mejorados.

El material de control (SBG-C1) no presenta actividad en sus partículas finas, alcanzando valores de succión mayores en comparación con los MGMs, donde, a medida que el IP aumentó, los valores de succión son menores y existe mayor retención del contenido de agua en la matriz de suelo. Estos valores serán usados como información preliminar para aplicación en futuras investigaciones.

## 5. REFERENCIAS

- Alonso, E. E., Lloret, A., & Romero, E. (2018). Efecto de las lluvias en terraplenes. *UPC*.
- Alvarez, A. E., Mora, J. C., & Espinosa, L. V. (2018). Quantification of stone-on-stone contact in permeable friction course mixtures based on image analysis. *Construction and Building Materials*, 462-471.
- Azam, A. M., Cameron, D. A., & Rahman, M. M. (2013). Model of matric suction in Recycled Unbound Granular Material, *Can. Geotech J.*, 50, 1143-1158.
- Azam, A. M., Cameron, D. A., Gabr, A. G., & Rahman, M. M. (2014). Matric Suction in Recycled Unbound Granular Materials. *Geotechnical Special Publication*.
- Bejar Pulido, S. J., Cantú Silva, I., Yáñez Díaz, M., & Robles, E. O. (2020). Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol 11*.
- Blanco, J. F. (2016). *CARACTERIZACIÓN Y MEJORA DE SUELOS MARGINALES EN OBRA CIVIL*.

- Bulut, R., & Leong, E. (2018). INdirect Measurement of Suction. *Geotechnical and Geological Engineering*.
- Camacho, J., Reyes, O., & Méndez, D. (2007). Ensayo Compactación Giratoria en Suelos Como Alternativa al Ensayo de Compactación Proctor. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 67-81.
- Fredlund, D. G. (2003). *IMPLEMENTACIÓN DE LA MECÁNICA DEL SUELO PARCIALMENTE SATURADO EN LA PRÁCTICA DE LA INGENIERÍA GEOTÉCNICA*.
- García, E. A., Aguilar Melendez, A., Córdova Ceballos, A., Sanchez Amador, J. L., Campos Rios, A., Zamora Cruz, H. H., & Azuara García, J. (2017). Estimación de la succión total en arcilla expansiva. . *Revista Iberoamericana de Ciencias*.
- 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]*.
- INVIAS. (2013). Capítulo 3 - Afirmados, Subbases y Bases. En *Especificaciones generales de construcción de carreteras*.
- INVIAS. (2013). Determinación de la succión de un suelo usando papel de filtro. En *NORMAS DE ENSAYO DE MATERIALES*.
- Jaimes, E. J., & Cetina, J. J. (2022). EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROMECAÁNICO DE MATERIALES GRANULARES MARGINALES DE SUBBASE IDENTIFICADOS COMO MGM-4. *UIS Ingenierías*.
- Lee, H. C., & Wray, W. K. (1995). Techniques to Evaluate Soil Suction A Vital Unsaturated Soil Water Variable.

- Liebenberg, J. J., & Visser, A. T. (1819). Stabilization and Structural Design of Marginal Materials for Use in Low-Volume Roads. . *Transportation Research Record*, 166-172.
- Likos, W. J., & Lu, N. (2003). Automated Humidity Sistem for Measuring Total Suction Characteristics of Clay. *Geotech. Test*, 179-190.
- Martínez , C. D., & Arroyo, A. J. (2023). EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES GRANULARES MARGINALES PARA USO EN CAPAS DE SUBBASE GRANULAR EN VÍAS DE BAJO VOLUMEN DE TRANSITO (MGM 5-6-7-8). *UIS Ingenierias*.
- Martínez, J. J., & Vargas, J. C. (2022). EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROMECAÁNICO DE MATERIALES GRANULARES MARGINALES DE SUBBASE GRANULAR IDENTIFICADOS COMO MGM-1. *UIS Ingenierias*.
- Ministerio de transporte. (2020). *Transporte en cifras. Estadística 2019*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de transporte. (2022). *Runt en Cifras*. Recuperado el 15 de Marzo de 2023, de <https://www.runt.com.co/runt-en-cifras>
- SANDOVAL , R., GOOLAM-HOSSEN, I., LAPPE, I., PÉREZ GARCÍA, N., MITTIGA, E., PERUCHO MATRÍNEZ, A., & BOMAN, M. (2019). REVIEW OF PRACTICES USING MARGINAL AND SECONDARY MATERIALS IN RURAL AND INDUSTRIAL AREAS. *World Road Association*.
- Schanz, T., & Setiano Samingan, A. (2005). Comparision of Four Methods for Measuring Total Suction. *Vadose Zone Journal*, 1087-1095.
- Utrera Pérez, R. A. (2022). SIMULACIONES NUMÉRICAS DE PROCESOS DE EQUILIBRIO DE SUCCIÓN DE SUELOS COMPACTADOS EN TRAYECTORIAS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO. *UIS ingeneirias*.

Van Genuchten, M. T., Leij, F. J., & Yates, S. R. (2009). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils.

William, J. L., & Ning, L. (2019). Filter Paper Technique for Measuring Total Soil Suction. *Transportation Research Record*.

Yaghoubi, E., Disfani, M. M., Arulrajah, A., & Kodikara, J. (2016). Impact of COmpaction Methods on Resilient Response of Unsaturated Granular Pavement Material. *Procedia Engineering*, 143, 323-330.

## 6. RECOMENDACIONES

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

Realizar el monitoreo de los cambios en las dimensiones de las probetas (diámetro y altura) para obtener mediciones precisas de grado de saturación durante las trayectorias de secado y humedecimiento.

Analizar la composición de granulometría final de los MGMs tratados en la investigación, para relacionar la sensibilidad de los datos experimentales ante el cambio del tamaño de las partículas.