

Evaluación del Comportamiento Hidromecánico de Materiales Granulares Marginales de
Subbase Identificados como MGM-2

Angie Vanessa Angarita Cuevas, Yeison José Acevedo Mujica

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

Director

Alex Eduardo Álvarez Lugo

Doctor en Ingeniería

Codirector

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A Dios por sus infinitas bendiciones, por ser mi camino y mi guía, por darme esa fuerza y sabiduría para alcanzar esta meta en mi vida.

A mi madre Bertha Cuevas Serrano, por su amor, trabajo, apoyo incondicional y por ser mi mayor motivación para querer salir adelante.

A mi padre Jorge Enrique Angarita Villareal, por creer en mí y por su sacrificio para poder cumplir esta meta de ser profesional.

A mi hermano Jorge Enrique Angarita Cuevas, por darme una voz de aliento cuando más la necesito, alentándome a seguir adelante.

A mi abuelita Socorro Cuevas Serrano, por ser mi angelito de la guarda que siempre me acompaña en cada paso que he dado.

Angie Angarita Cuevas

Primeramente, a Dios y a la Virgen María por ser mi luz, mi protección y mi camino.

A mis padres Oscar y Rosa que son los pilares y apoyos incondicionales durante toda mi vida.

A mis hermanas Edna y Yessica que me brindan los mejores ánimos y me dan la fortaleza para conseguir lo que me he propuesto.

Dedico de manera especial a mi nona Delia María que fue una de las principales razones y soportes en la consecución de este título.

Yeison José Acevedo Mujica

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por permitirnos alcanzar este logro en nuestras vidas y a nuestras familias, Angarita Cuevas y Acevedo Mujica por el amor, sacrificio y crianza brindada, porque sin ustedes esto no sería posible.

Agradecemos a nuestro director Alex Álvarez Lugo y co-director de proyecto Vladimir Merchán Jaimes, por su dedicación y apoyo, a lo largo de la investigación.

A la Universidad Industrial de Santander, directivos y profesores, por las oportunidades brindadas y compartir sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico.....	15
2.1 Material Granular Marginal (MGM)	15
2.2 Material tipo subbase	15
2.3 Compactación Giratoria	15
2.4 Ensayo Tracción Indirecta (ITS).....	16
2.5 Succión del Suelo.....	16
2.6 Técnica del Papel Filtro	16
3. Revisión de Literatura.....	17
3.1 Estudios y Antecedentes	18
4. Descripción de Materiales.....	21
4.1 Cantera	21
4.2 Triturado	22
4.3 Caolinita y Bentonita	22
4.4 Nomenclatura.....	22
5. Metodología	23

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROMECAÁNICO	5
5.1 Tamizado Material de Cantera y triturado	23
5.2 Control de Granulometría	23
5.3 Análisis de Plasticidad (Límites de Atterberg)	23
5.4 Mezclado y Empaquetado	24
5.5 Compactación	24
5.6 Resistencia a la Tracción Indirecta	26
5.7 Toma de Imágenes	27
5.8 Medición de Succión Total	27
5.9 Granulometría Post-ensayos	28
6. Resultados y Análisis	29
6.1 Granulometría de Diseño	29
6.2 Límites de Consistencia	29
6.3 Curvas de Compactación	32
6.4 Tracción Indirecta	34
6.5 Succión	37
6.6 Granulometría post-ensayos	39
7. Conclusiones	41
8. Recomendaciones	43
Referencias Bibliográficas	44
Apéndices	46

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Curvas de Calibración Succión-Humedad para Papel Filtro</i>	17
Figura 2. <i>Franja Granulométrica MGM4, MGM5 y SBG-38</i>	22
Figura 3. <i>Probeta Compactada en Ensayo Giratorio</i>	25
Figura 4. <i>Montaje Tracción Indirecta</i>	26
Figura 5. <i>%IP vs %Triturado</i>	31
Figura 6. <i>%IP vs %Bentonita</i>	31
Figura 7. <i>Densidad seca vs N°Giros</i>	32
Figura 8. <i>Densidad seca vs %humedad</i>	33
Figura 9. <i>Fuerza axial vs Desplazamiento</i>	35
Figura 10. <i>Humedad vs Resistencia a Tracción</i>	37
Figura 11. <i>Curva de Retención de Humedad MGM4</i>	38
Figura 12. <i>Curva de Retención de Humedad MGM5</i>	38
Figura 13. <i>Humedad del Suelo vs Humedad del Papel Filtro</i>	39
Figura 14. <i>Granulometría post-ensayos MGM4-MGM5</i>	39

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Tabla Global de Ensayos</i>	13
Tabla 2. <i>Granulometría de Diseño 21% Finos</i>	29
Tabla 3. <i>Resultados Límites de Consistencia para IP de 8%</i>	30
Tabla 4. <i>Resultados Límites de Consistencia para IP de 12%</i>	30
Tabla 5. <i>Cantidades de Material Fino para IPs de 8 y 12%</i>	32
Tabla 6. <i>Resultados Ensayo a Traccion Indirecta</i>	36
Tabla 7. <i>Humedades post-ensayos MGM4</i>	41
Tabla 8. <i>Humedades post-ensayos MGM5</i>	41

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. <i>Modelo cabezal de carga</i>	46
Apéndice B. <i>Toma de Imágenes</i>	47
Apéndice C. <i>Protocolo Medición de Succión sobre Probetas Irregulares</i>	67
Apéndice D. <i>Video Medición de succión total en carpeta comprimida</i>	77

Resumen

Título: Evaluación del Comportamiento Hidromecánico de Materiales Granulares Marginales de Subbase Identificados como MGM-2*

Autores: Angie Vanessa Angarita Cuevas, Yeison José Acevedo Mujica**

Palabras Clave: MGMs, subbase granular, índice de plasticidad, compactador giratorio, succión, tracción indirecta.

Descripción

La investigación estudia experimentalmente el comportamiento hidromecánico de dos materiales granulares marginales (MGMs), teniendo en cuenta un contenido de finos del 21% e índices de plasticidad de 8% y 12%. Para ser usados como una alternativa de subbases granulares en vías terciarias bajo el efecto de cargas vehiculares y la interacción de la estructura con el ambiente.

La primera parte de la investigación consistió en caracterizar los MGMs partiendo de la subbase granular SBG-38 establecida por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) donde se definieron reemplazos de caolinita, bentonita y triturado por el material fino buscando variar el índice de plasticidad de la subbase granular con respecto al estipulado por el INVIAS de 6%. Después, mediante el Compactador Giratorio Superpave (SGC) se obtuvo la humedad óptima y la densidad máxima seca de los dos MGMs; posteriormente se hizo una medición de succión total y la resistencia de cada material a tracción indirecta (ITS), para luego realizar una caracterización post-ensayo de su granulometría. Finalmente, los resultados muestran que el MGM4 presenta una mejor capacidad de succión y podría tener un mejor comportamiento en términos de rigidez y resistencia por contacto entre agregados. Por el contrario, el MGM5 resiste más carga ante tracción indirecta cuando las probetas se encuentran cercanas a la humedad óptima.

* Trabajo de Grado

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

Abstract

Title: Evaluation of the Hydromechanical Behavior of Subbase Marginal Granular Materials Identified as MGM-2*

Authors: Angie Vanessa Angarita Cuevas, Yeison José Acevedo Mujica**

Keywords: MGMs, granular subbase, plasticity index, gyratory compactor, suction, indirect traction

Description

The research experimentally studies the hydromechanical behavior of marginal granular materials (MGMs), taking into account a fines content of 21% and plasticity indexes of 8% and 12%. To be used as an alternative for granular sub-bases in tertiary roads under the effect of vehicular loads and the interaction of the structure with the environment. The first part of the research consisted of characterizing the MGMs based on the SBG-38 granular subbase established by the National Roads Institute (INVIAS), where kaolinite, bentonite and crushed material were replaced by the fine material, seeking to vary the plasticity index of the granular subbase with respect to that stipulated by INVIAS of 6%. Then, by means of the Superpave Gyratory Compactor (SGC), the optimum moisture and maximum dry density of the two MGMs were obtained; subsequently, a total suction measurement and the resistance of each material to indirect tensile strength (ITS) were made, and then a post-test characterization of their granulometry was performed. Finally, the results show that MGM4 presents a better suction capacity and could have a better performance in terms of stiffness and contact resistance between aggregates. On the contrary, MGM5 resists more load under indirect tension when the specimens are close to optimum moisture content.

* Trabajo de Grado

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

Introducción

Las entidades municipales, gubernamentales, y el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), han concentrado sus esfuerzos en construir, conservar, y rehabilitar las vías de primer y segundo orden, pero en el país se presentan grandes desafíos para el desarrollo de las vías de bajo volumen de tránsito (o vías terciarias).

En vista de las problemáticas locales, que incluyen los altos costos relacionados con el transporte de materiales convencionales de pavimentación que impactan los costos de construcción a mediano y largo plazo, se genera el interés de llevar a cabo investigación experimental y numérica para trabajar con materiales granulares marginales (MGMs). Estos materiales pueden constituir alternativas con reservas abundantes por explotar y cercanas a múltiples proyectos de desarrollo de vías de bajo volumen de tránsito (DNP, 2020). Los MGMs se definen como aquellos que a pesar de no cumplir algún aspecto de las especificaciones de calidad promulgadas para los materiales de pavimentación (e.g., especificaciones INVIAS), tienen el potencial de ser utilizados con éxito en algunas aplicaciones.

A nivel general, en el diseño estructural de pavimentos flexibles, el parámetro principal para evaluar el comportamiento de los materiales granulares (e.g., base- y subbase-granular) ante carga dinámica es una propiedad que describe la rigidez de los materiales. Este parámetro ha sido denominado módulo de resiliencia (MR) (o módulo resiliente), definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable (Luques, Junio 2015). Sin embargo, este parámetro no se mantiene constante después de la construcción de la estructura de pavimento, sino que varía con las condiciones ambientales que se presenten en el

lugar; e.g., cambio en la humedad del material debido a modificaciones en las condiciones de evapotranspiración en la zona de proyecto.

Uno de los procesos más importantes en el proceso de construcción de carreteras es la compactación del material; mediante el cual se aplica la energía mecánica requerida y se agrega suficiente humedad a la masa del suelo para reducir el volumen vacío al desplazar el aire que ocupa los poros y, por lo tanto, su volumen total, aumentando así la densidad para mejorar las propiedades del suelo. Según Das (2002: 51.52) (DAS, 2002), cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, ésta actúa como un ablandador de las partículas del suelo, haciendo que se deslicen unas sobre otras y se muevan a una posición más densa.

Dado que la compactación es esencialmente un proceso de construcción, la energía y el método de compactación dependen de variables relacionadas con el tipo de compactador utilizado, su peso y el número de pasadas determinadas durante la construcción. Si bien la prueba Proctor se usa más ampliamente en el laboratorio, su mecanismo de densificación por impacto está lejos de lo que ofrece el equipo de campo. Por esta razón, diferentes grupos de investigación en muchos países han optado por utilizar un dispositivo conocido como "compactador giratorio", que puede compactar muestras con diámetros de 10,16 y 15,24 cm y con la capacidad de cambiar factores como: ángulo de rotación, número de revoluciones, presión vertical, altura, densidad, humedad y velocidad de rotación (Mokwa, Cuelho, & Browne, 2008), simulando mejor las condiciones del campo que el compactador de impacto por el proceso de amasado.

Por tanto, este proyecto de grado tiene diferenciación en los entregables que se plantean respecto a los proyectos réplica, los cuales hacen parte de la investigación global de MGMs. La cual se enfoca en evaluar el comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase empleando probetas compactadas con el método giratorio en diferentes condiciones de

humedad, teniendo en cuenta un contenido de finos del 21% e índices de plasticidad de 8% y 12%. Así mismo establecer y evaluar curvas de compactación, la relación de succión total, el nivel de degradación del tamaño de partículas y la influencia del contenido de humedad de compactación sobre resistencia a la tracción indirecta (ITS) en las muestras granulares.

Los resultados de esta investigación podrían llegar a justificar o a definir una nueva propuesta de tratamiento para su aplicabilidad como materiales de construcción en una estructura de pavimento, ya que, un importante volumen de estos materiales considerados como “marginales-inadecuados” son muy habituales y abundantes en los depósitos, de tal forma que puedan ser reutilizados lo que conllevaría un evidente beneficio en términos económicos y ambientales.

Tabla 1.

Tabla Global de Ensayos.

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

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento hidromecánico de muestras compactadas con materiales granulares marginales MGM-2, teniendo en cuenta un contenido de finos del 21% e índices de plasticidad de 8% y 12%

1.2 Objetivos Específicos

Establecer las curvas de compactación de los materiales granulares teniendo en cuenta un contenido de finos de 21% e índices de plasticidad del 8% y 12% (MGM-2).

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 (ITS) en las muestras granulares identificadas como MGM-2.

2. Marco Teórico

2.1 Material Granular Marginal (MGM)

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

2.2 Material tipo subbase

Los materiales para subbase pueden provenir de canteras o depósitos aluviales, o del procedimiento para el manejo de los residuos de construcción y demolición (RCD), compactos y durables, con llenante de arena u otro material mineral finamente dividido, libres de terrones de arcilla, materiales vegetales, u otros elementos objetables (TDX, sf). El material de subbase debe ser seleccionado y tener mayor capacidad de soporte que el material de subrasante compactado.

2.3 Compactación Giratoria

El uso del Compactador Giratorio Superpave (SGC) para el diseño de mezclas asfálticas es cada vez más común en muchos países, sin embargo, en los últimos años se ha estado utilizando también para compactar suelos y materiales granulares (Browne, 2006). Es un ensayo controlado y preciso que consiste en la aplicación de acciones simultáneas como la presión vertical y la acción giratoria, con un ángulo de inclinación con respecto al eje vertical, ejercidas por el equipo, asemejando los procesos constructivos en obra.

2.4 Ensayo Tracción Indirecta (ITS)

El ensayo consiste en aplicar una carga de compresión externa en una de las superficies de la muestra cilíndrica, mientras que el extremo opuesto a la carga permanece apoyado. De esta manera, se generan dos fuerzas opuestas provocando una distribución uniforme de tracciones transversales a lo largo del eje de carga, causando la rotura a tracción en la probeta (Mora & Gramage, 2022).

2.5 Succión del Suelo

La succión en términos prácticos es una medida de la afinidad del suelo por retener agua y puede proporcionar información sobre los parámetros del suelo que están influenciados por el agua en este; por ejemplo, las características de cambio de volumen, deformación, y resistencia del suelo. La succión del suelo está relacionada con el contenido de agua a través de las curvas características de retención (TDX, sf).

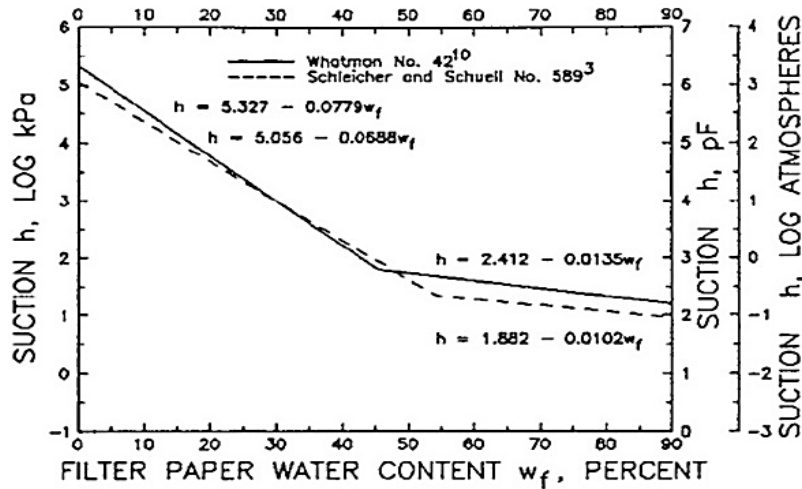
2.6 Técnica del Papel Filtro

El papel filtro es un papel semipermeable que se elabora generalmente de celulosa u otros compuestos como fibra de vidrio. La técnica de medición de succión empleando papel filtro compara el potencial de la retención de agua en un medio poroso, en este caso el papel de filtro Whatman, cuyo rango de medición llega hasta 7 pF (expresada como logaritmo en base 10 de la altura) (INVIAS E-159, 2013).

En la figura 1 se presenta la curva succión-humedad hecha por R.G. Fawcett y N. Collis George (1967) para papel de filtro número 42. La succión se determina así, midiendo directamente la humedad del papel filtro y utilizando las ecuaciones de calibración presentadas en la figura (Ballena).

Figura 1.

Curvas de Calibración Succión-Humedad para Papel Filtro.



Nota: Tomada de Norma INVIAS E-159-13

3. Revisión de Literatura

Actualmente en Colombia según el artículo 610-13 del INVIAS hace una clasificación en suelos para rellenos de estructuras divididos en tres categorías: adecuados, seleccionados y tolerables; pero en ningún apartado, norma o guía clasifican a los suelos marginales para su utilización en la construcción de carreteras. Es por esto que la investigación y estudio de los MGMs se hace poco habitual.

La modificación del artículo 330 PG-3 (Reglamento de Construcción de Carreteras de España) enumera cinco grupos de suelo; seleccionados, adecuados, tolerables, marginales e inadecuados; de un suelo de mejor rendimiento a un suelo de menor calidad. Por lo general, estos suelos marginales son de grano fino, tamaño limo o arcilla. Suelen tener baja resistencia mecánica y alta plasticidad. También pueden incluirse en esta categoría debido a la concentración de sales

disueltas o materia orgánica, que, si no se toman las medidas adecuadas, pueden generar afecciones en estructuras posteriores que se quieran edificar (Ministerio de Fomento, 2000).

Para realizar esta clasificación la normativa española se basa en las siguientes condiciones:

- Contenido en materia orgánica inferior al cinco por ciento ($MO < 5\%$), según UNE 103204.
- Hinchamiento libre según UNE 103601 inferior al cinco por ciento (5%), para muestra remoldeada según el ensayo Proctor normal UNE 103500.
- Si el límite líquido es superior a noventa ($LL > 90$) el índice de plasticidad será inferior al setenta y tres por ciento del valor que resulta de restar veinte al límite líquido ($IP < 0,73 (LL - 20)$).

El empleo de estos materiales según lo expuesto en el PG-3 se limita al núcleo del terraplén; siendo la zona que constituye el mayor volumen de material puesto en obra, por lo que la posibilidad de reutilizar suelos marginales permitiría un ahorro económico considerable en el presupuesto de la obra, sobre todo en zonas donde los suelos de mayor calidad geotécnica no estuviesen disponibles en áreas próximas. Para su aprovechamiento en núcleo de terraplén, el porcentaje de cal añadido está entorno al 2%. Si se emplea en espaldones o cimientos los porcentajes son más elevados, entorno al 2.4%. El uso de RCD en la estabilización y mejora de suelos marginales implica una reducción de los residuos generación de las plantas de reciclaje de hormigón y la mejora ambiental asociada.

3.1 Estudios y Antecedentes

Según el estudio de caracterización y mejora de suelos marginales en obra civil por Jorge Fuentes (2016) En las carreteras de España se han aplicado este tipo de materiales para la construcción de terraplenes, entre ellos la variante de Alcalá de los Gazules 2004-2006 donde se

utilizó como material marginal la arcilla de Jimena (Arcilla expansiva) estabilizada con cal y compactado mínimo al 95% de la densidad del proctor modificado. Aunque se esté extendiendo el hábito de emplear materiales marginales para la construcción de terraplenes, todavía no es una práctica muy habitual. No existen muchos casos documentados y no se han elaborado guías y recomendaciones técnicas de aplicación práctica que fomenten su uso.

La investigación realizada por Cáceres, Ó. D. & Rodríguez, AD (2021) estudia experimentalmente las propiedades mecánicas de los MGMs, con el fin de determinar si son aptos para su utilización como subbases granulares en Colombia. Concluye que los materiales granulares son adecuados, en términos de porcentaje de resistencia, para la construcción de subbases, siempre que la sustitución del material que pasa por el tamiz #200 por caolín y/o bentonita sea baja. Es importante señalar que, en términos de límites de consistencia, el material en estudio no cumple con los mínimos en las normas colombianas para subbases granulares, el drenaje se convierte en un parámetro de vital importancia para la aplicación de estos materiales.

En España existen abundantes zonas en las que se identifican frecuentemente suelos marginales e inadecuados; la mayor parte de ellas están asociadas a los suelos arcillosos y margosos de las grandes cuencas terciarias, las arcillas yesíferas, los suelos arcillosos producto de alteración, entre otros, no sólo porque fueran materiales plásticos y/o expansivos, sino porque su distribución granulométrica, contenido de arcilla y composición mineralógica, no les permite estar en el grupo de materiales adecuados (de Santos, 2018, abril).

El artículo publicado por Wilson, Li, Tam, & Black, 2017 titulado “Permanent Strain Behavior of Marginal Granular Material” tiene como objetivo evaluar y comprender el comportamiento de deformación permanente de materiales granulares marginales mediante el uso de pruebas triaxiales de carga repetida en diferentes condiciones de humedad. Es posible resaltar

que el agregado marginal tiene una capacidad razonablemente buena de resistir la deformación permanente en condiciones secas, pero esta capacidad se deteriora cuando el material está saturado y bajo niveles de esfuerzo altos, debido a la presencia de arcillas expansivas. Además, “el comportamiento plástico del agregado marginal cambia radicalmente cuando el material está expuesto a un período prolongado de remojo, destacando la susceptibilidad del material marginal al entrar en contacto con el agua” (Wilson, Li, Tam, & Black, 2017).

La tesis doctoral publicada por Carlota Gómez de Santos en Madrid del año 2019 titulada “Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compactados, respuesta a cargas estáticas y dinámicas” Aborda fundamentalmente el estudio de las propiedades ingenieriles de suelos cohesivos de alta plasticidad y expansividad dentro del marco de “mejora de las propiedades geotécnicas de suelos definidos como marginales-inadecuados”. Como material de estudio se ha seleccionado Arcillas Azules del Guadalquivir (AAG) que se encuentran localizadas en la zona sur de la Península Ibérica. Siendo materiales de granulometría final con una plasticidad de alta a media, presentan una expansividad muy elevada “incluso superior a las arcillas en estado in situ”, que les confiere el carácter marginal o inadecuado para cualquier obra de tierra. En este sentido, las probetas compactadas del lado seco presentaron mayor expansividad (presión de hinchamiento e hinchamiento libre), que las muestras compactadas a humedades mayores (lado húmedo), consecuencia de la porosidad y el grado de saturación. Por lo tanto, para este tipo de suelos arcillosos, no adecuados y rechazados para su uso como material de construcción, mediante la compactación y la estabilización se ha conseguido que el material mejore sus propiedades geotécnicas tanto estática como dinámicamente, y pase a ser un material adecuado para su puesta en obra (de Santos, 2018, abril).

Los suelos marginales, que poseen propiedades mecánicas adecuadas, pero no cumplen con los requisitos de índice de plasticidad y contenido de partículas finas para los muros de tierra estabilizada mecánicamente (MSE), son de particular interés para la industria de la construcción como un reemplazo potencial para los materiales de relleno granulares. Se realizó un análisis numérico del flujo no saturado para evaluar el impacto potencial de cada parámetro de flujo no saturado en las condiciones hidrológicas en un muro MSE con un geocompuesto. Los resultados estudiados indican que el uso de suelo marginal como material de relleno da como resultado un área generalizada con alto contenido de agua dentro de la zona de relleno, incluso cuando el geocompuesto se instaló correctamente. Se debe tener cuidado al usar un suelo marginal con un alto contenido de partículas finas como material de relleno, ya que el área con alto contenido de agua podría extenderse ampliamente dentro de la zona protegida (Bui Van, y otros, 2017).

4. Descripción de Materiales

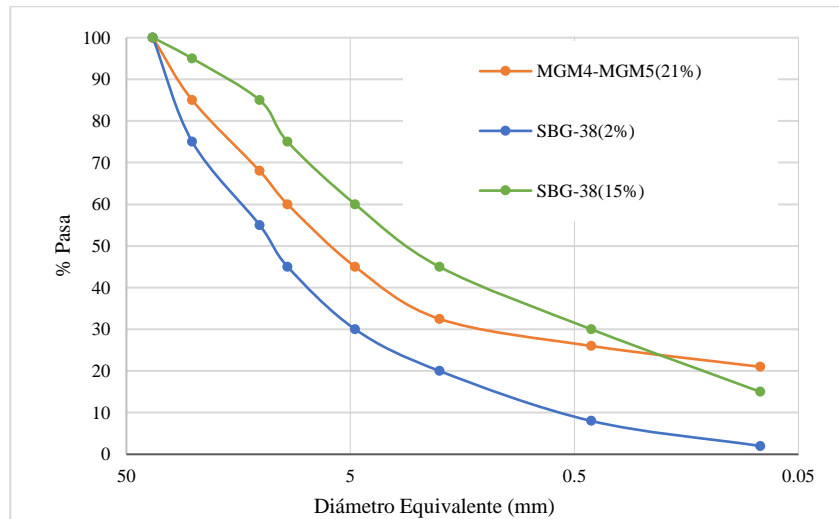
4.1 Cantera

Se utilizó material de cantera como componente principal en la construcción de los MGMs y fue tomado de la cantera Paviandi en el km 4.5 vía Piedecuesta-Aratoca, Santander. El material presenta un IP en fracciones finas (pasa tamiz No 200) de 11%, pérdida por sulfatos de 3.70%, un equivalente de arena de 48% y un valor de DMA de 60.73% (Rios, 2022).

Nota: si bien este valor DMA supera la especificación INVIAS correspondiente a 50%, se ha adoptado como material de control desde el punto de vista de que satisface la plasticidad y contenido de finos. En investigación futura caracterizará el material de control de tal manera que cumpla totalmente las especificaciones INVIAS.

Figura 2.

Franja Granulométrica MGM4, MGM5 y SBG-38

**4.2 Triturado**

El material se obtuvo a partir de la trituración de roca de la planta asfáltica Paviandi, presentando plasticidad nula. Una característica importante es la poca retención de agua en su estructura.

4.3 Caolinita y Bentonita

Estos materiales tienen el fin de reemplazar la fracción fina de cantera y alcanzar los IP propuestos. La caolinita presenta IP de 11.68% y la bentonita (altamente plástica) tiene un IP de 360%.

4.4 Nomenclatura

Los dos materiales se definen así:

- MGM4 hace referencia a 21% de finos y 8% de plasticidad.
- MGM5 hace referencia a 21% de finos y 12% de plasticidad.

Por su parte cada punto de compactación se diferencia con la letra C seguida del número que corresponda, es decir: MGM4_21_8_C1 para el primer punto y así para las demás probetas.

5. Metodología

Después que se realizó una revisión de literatura acorde con el enfoque global del proyecto se planeó y llevó a cabo una campaña experimental multietapas en la cual cada una de ellas está ligada al alcance y objetivos que se plantean en el proyecto. Para generar una metodología que sea repetible y en lo menor posible susceptible a errores humanos se basó en protocolos y videos para cada uno de los ensayos llevados a cabo en el laboratorio.

La metodología se divide en las siguientes etapas:

5.1 Tamizado Material de Cantera y triturado

Se saca el material en bandejas, se extiende y se procede a tamizar manualmente por los tamices 1 ½", 1", ½", 3/8" y No. 4; el material que pasa el tamiz No. 4 se almacena en bultos y se tamiza mecánicamente en muestras de 500 g durante 5 min por los tamices No. 10, No. 40, No. 200 y fondo (pasa 200).

5.2 Control de Granulometría

En la figura 2 se presenta la franja granulométrica de trabajo que es muy similar a la gradación tipo SBG-38 [23], únicamente con variaciones de porcentajes de finos que en este proyecto se trabajó con 21% e índices de plasticidad de 8% y 12%. La granulometría se controla a partir de la masa por fracción (tamaño de partículas).

5.3 Análisis de Plasticidad (Límites de Atterberg)

Se hace una caracterización del comportamiento de los suelos de grano fino (material pasa N°200) mediante los ensayos de límites INV 125-13 e INV 126-13 del material de cantera, triturado, bentonita y caolinita.

Para alcanzar el IP de 8% fue necesario realizar una mezcla de cantera con material de trituración, asimismo para el IP de 12% la combinación usada fue de cantera, caolinita y bentonita.

Debido a que los materiales no reaccionan simultáneamente ante la adición de agua se tiene un tiempo de curado para cada medición de 40 minutos para IP de 8% y 60 minutos para el IP de 12%.

5.4 Mezclado y Empaquetado

Haciendo uso de una mezcladora mecánica se añade el material para la fabricación de 4 probetas por MGM y se mezcla por 5 minutos con una humedad teórica. Luego se introduce el material en 3 bolsas herméticas y se deja curar en un periodo de 18 a 24 horas máximo.

5.5 Compactación

Finalizado el periodo de curado se introduce el material al molde del compactador, y con el fin de medir la humedad real se extrae una muestra representativa de 200 g y se deja en el horno durante 12-16 horas hasta que su humedad sea 0%.

La compactación de las diferentes probetas se realiza mediante un compactador giratorio utilizando un molde de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, bajo una presión de 600 kPa, ángulo de giro externo de 1.25° y una velocidad de rotación de 30 revoluciones por minuto. Para hallar la curva de densidad seca máxima vs humedad óptima el parámetro que se tiene en cuenta para detener la compactación es el número de giros, establecidos de la siguiente manera:

- Humedad 1 (%): 180 giros
- Humedad 2 (%): 140 giros
- Humedad 3 (%): 140 giros
- Humedad 4 (%): 180 giros

Con el fin de establecer este número de giros específico se tiene en cuenta la teoría usada en la compactación giratoria llamado *Locking Point*, en el cual al repetirse 2 veces o más la densidad húmeda y luego 3 veces consecutivas o más otra densidad húmeda la compactación en ese número de giros es la óptima y no estaría involucrando procesos de desgaste del material por exceso de cargas.

Mediante probetas de prueba preliminares se observa el comportamiento del material y se establecen los números de giros para alcanzar el locking point con respecto a la humedad. Una vez salga la probeta (figura 3) se procede a retirarla y pesarla para determinar la masa final, se recubre en papel vinipel con el fin de no perder material fino y conservar la humedad. Así mismo se marca y almacena en un cava para utilizarla en estudios posteriores. La altura final de las probetas es de 20 cm aproximadamente.

Figura 3.

Probeta Compactada en Ensayo Giratorio.



5.6 Resistencia a la Tracción Indirecta

Luego de la compactación se procede a la máquina universal de ensayos (MTS) adaptada con un cabezal de carga [anexo 1] donde se ubica la probeta de forma horizontal, centrada a los ejes verticales bajo las franjas de aplicación de fuerza (figura 4).

La máquina se programa a una velocidad de penetración uniforme constante de 50.8 mm/min y con una carga máxima en situación estática de 31 kN. El software de la MTS, toma las lecturas de carga para las distintas penetraciones, hasta que se produce el fallo (partición de dos) de la probeta.

Para conservar la totalidad de la probeta antes de iniciar el ensayo se coloca medio tubo de PVC de 20 cm de diámetro a ambos lados de manera que se puedan recibir las dos caras fracturadas (figura 4).

Luego se extraen los tubos recolectores con el material para llevarlos a la toma de imágenes.

Figura 4.

Montaje Tracción Indirecta.



5.7 Toma de Imágenes

La adquisición de imágenes 2D y 3D de las probetas de MGM4 y MGM5 se realizan en tres fases:

1. La primera fase se lleva a cabo antes de la TI. La cámara ubica a 16 cm de la probeta y se toman 3 imágenes correspondientes a la vista superior, inferior y frontal.
2. La fase dos va después de fallar la probeta MGM por TI. La cámara se ubica a 16 cm de la probeta y se toman dos imágenes (una para cada superficie fallada).
3. La última fase es la adquisición de la superficie en 3D por medio de un Kinect de Xbox 360, el cual se ubica paralelamente a 68 cm de la probeta para cubrir completamente el área total de la probeta luego de la ruptura. Igualmente, para esta fase se toma toman dos imágenes para cada superficie.

Todas las imágenes se toman con fondo negro e iluminación con luz led blanca, de tal forma que contraste con el color de las probetas, para facilitar el análisis detallado de la morfología pre y post ensayo del suelo; las cuales se encuentran en el anexo (Luques, Junio 2015).

5.8 Medición de Succión Total

La aplicación de esta metodología será basada en la norma INV E – 159 – 13 y ASTM D 5298 – 10. Inicialmente se secan en el horno los papeles filtro en recipientes de aluminio durante 16 a 24 horas antes de realizar el ensayo de tracción indirecta a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$, luego se almacenan hasta su uso en bolsas herméticas para que no ganen humedad.

La muestra de suelo fallada que se escoge para el análisis es aproximadamente de 300 a 400 g y se deposita en un recipiente hermético, en este caso la muestra estará en contacto con un montaje tipo sándwich. Para ello se retira de la bolsa hermética un papel de filtro e inmediatamente se coloca sobre el disco acrílico perforado de 6 cm de diámetro y 0.5 cm de espesor;

posteriormente, en la parte de arriba se coloca un disco acrílico sin perforar, seguido a esto se guarda en una cava durante 7 días para realizar una correcta medición de succión total.

Finalizado el periodo de equilibrio se determina la masa de la bolsa hermética (Tc) y de los papeles filtro junto con bolsa (M1). Realizado este proceso se extrae el papel filtro y se seca durante dos horas a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ para ser registrar nuevamente su peso dentro de la bolsa hermética (M2) y la masa final de esta (Th). En el anexo 3 se presenta el protocolo para la ejecución del ensayo de succión.

Este proceso se realizó a cada una de las probetas compactadas que se usaron para hallar la curva de humedad optima vs densidad seca máxima, esto con el fin de tener una relación del grado de saturación de cada suelo.

5.9 Granulometría Post-ensayos

Después de extraer el material para la medición de succión, todo el restante se recoge y almacena en su respectiva bolsa.

Para iniciar, el material se lleva al horno a temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ en bandejas de secado por un periodo de 24 horas o hasta que su masa sea constante.

Posteriormente el material seco se pesa y se realiza el proceso de lavado por el tamiz # 200 con el fin de separar los finos adheridos a las fracciones de mayor tamaño. Se seca nuevamente el material por un periodo de 24 horas y se pesa para determinar la cantidad de finos pérdidas en el proceso. Después se tamiza mecánicamente como se describe en el ítem 5.1, se separan y pesan por fracciones con una balanza de 0.1 g de precisión y se define su granulometría final.

6. Resultados y Análisis

6.1 Granulometría de Diseño

En la tabla 2 se presenta la granulometría de trabajo para una probeta a partir de un control de masa por fracción y teniendo en cuenta 21% de finos.

Tabla 2.

Granulometría de Diseño 21% Finos.

Granulometría SBG-38-21% finos				
Tamiz	% Pasa	% Retenido acumulado	% Retenido	Masa [g]
1" 1/2"	100	0	0.0	0
1"	85	15.0	15.0	1090
1/2"	68	32.0	17.0	1236
3/8"	60	40.0	8.0	581
No. 4	45	55.0	15.0	1090
No. 10	33	67.5	12.5	909
No. 40	26	74.0	6.5	472
No. 200	21	79.0	5.0	363
Fondo	0	100.0	21.0	1526
Total			100	7269

La masa seca total tiene incluido los 200 g necesarios para la medición de humedad.

6.2 Límites de Consistencia

Los resultados de los ensayos de límite líquido y plástico para las mezclas de grano fino se presentan en las tablas 3 y 4 correspondientes a los IPs objetivos de 8% y 12%. La masa total para cada ensayo fue de 200 g.

Tabla 3.*Resultados Límites de Consistencia para IP de 8%.*

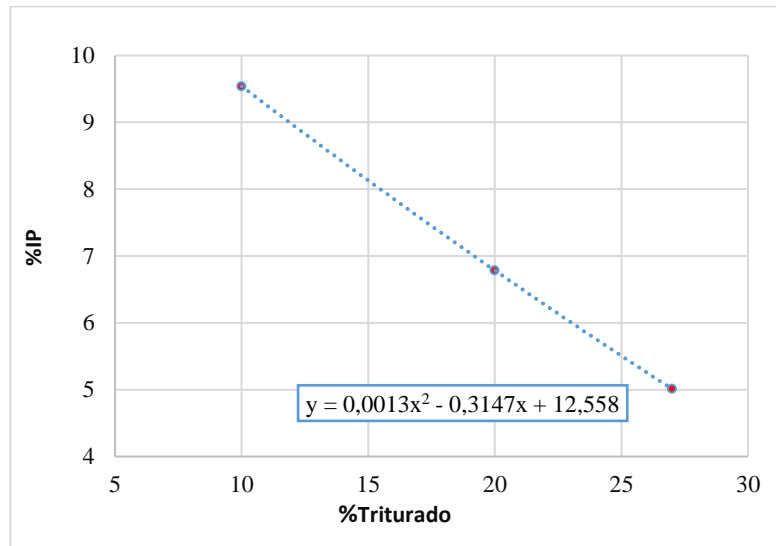
Cant. de Cantera [%]	Cant. Triturado [%]	%LL	%LP	% IP
73	27	34	29	5
80	20	33	26	7
90	10	36	26	10

Tabla 4.*Resultados Límites de Consistencia para IP de 12%.*

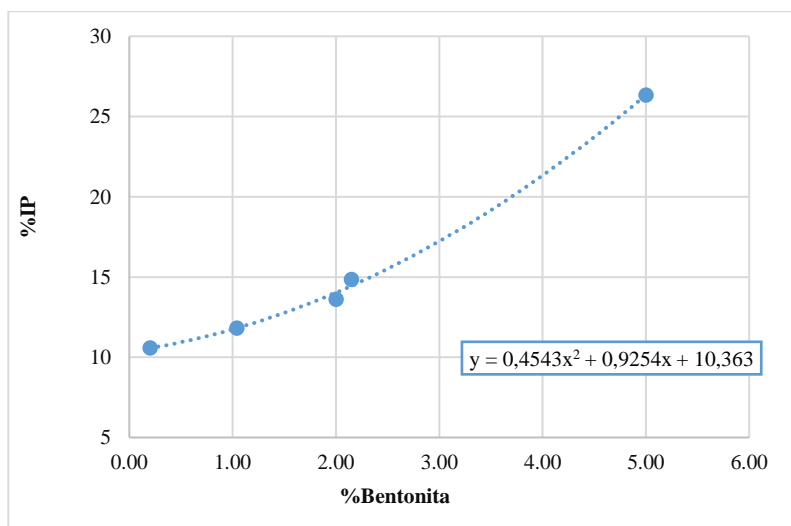
Cant. Bentonita [%]	Cant. Cantera [%]	Cant. Caolinita [%]	%LL	%LP	% IP
0.20	49.90	49.90	40	29	11
1.04	49.48	49.48	40	28	12
2.00	49.00	49.00	43	29	14
2.15	48.93	48.93	44	29	15
5.00	47.50	47.50	54	27	26

Para obtener la ecuación del IP 8% se realizaron mezclas de cantera y material de trituración, teniendo en cuenta que el IP de cantera es de 11% y el de trituración es nulo.

En la figura 5 se muestra la ecuación final usada para hallar el porcentaje necesario de material de trituración que cumpla con el IP de 8%, el porcentaje restante corresponde a material de cantera.

Figura 5.*%IP vs %Triturado*

Por su parte para el IP de 12% la mezcla necesaria fue de cantera y caolinita (en igual proporción) que presentan IPs de 11.2% y 11.6%, y un porcentaje mínimo de bentonita que tiene IP de 360%. La ecuación resultante se muestra en la figura 6.

Figura 6.*%IP vs %Bentonita*

En la tabla 5, se muestra el resumen de las cantidades en porcentaje y masa necesarias de material fino para los IPs de 8 y 12%.

Tabla 5.

Cantidades de Material Fino para IPs de 8 y 12%.

% IP	Cantera		Triturado		Caolinita		Bentonita		Fondo
	%	g	%	g	%	g	%	g	g
8	84,53	1105	15,47	203	0	0	0	0	1308
12	49,43	646,5	0	0	49,43	646,5	1,14	15	1308

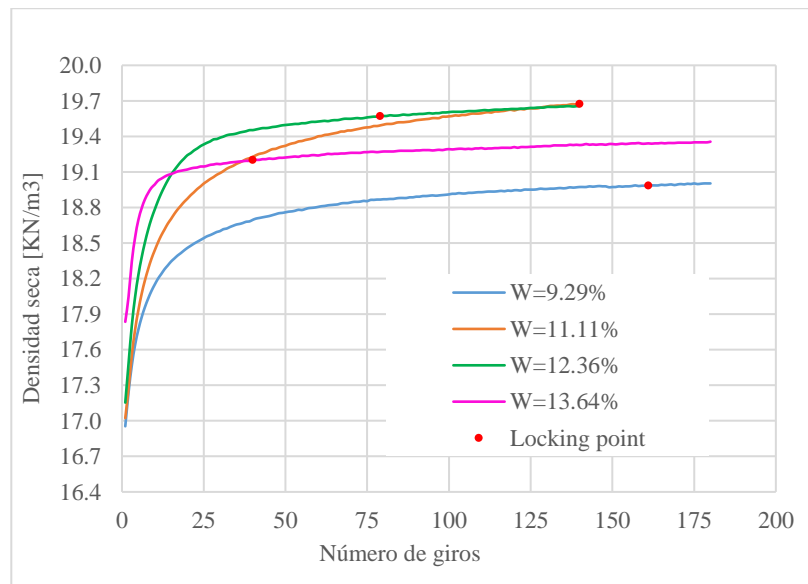
6.3 Curvas de Compactación

En la figura 7 se evidencia el aumento del peso unitario seco con respecto al número de giros correspondiente a cada MGM con sus diferentes humedades. Así mismo el comportamiento de la curva después de registrarse el Locking point.

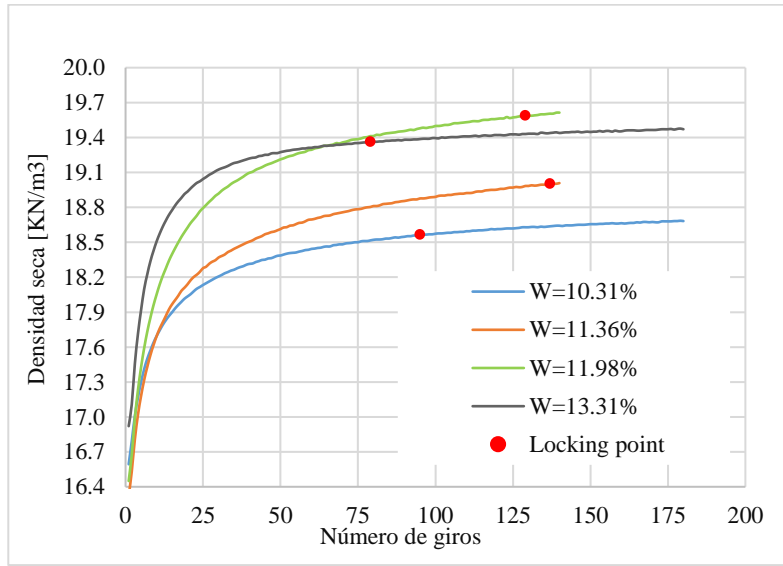
Figura 7.

Densidad seca vs N°Giros.

7a Densidad seca vs N°Giros de MGM4



7b Densidad seca vs N°Giros de MGM5

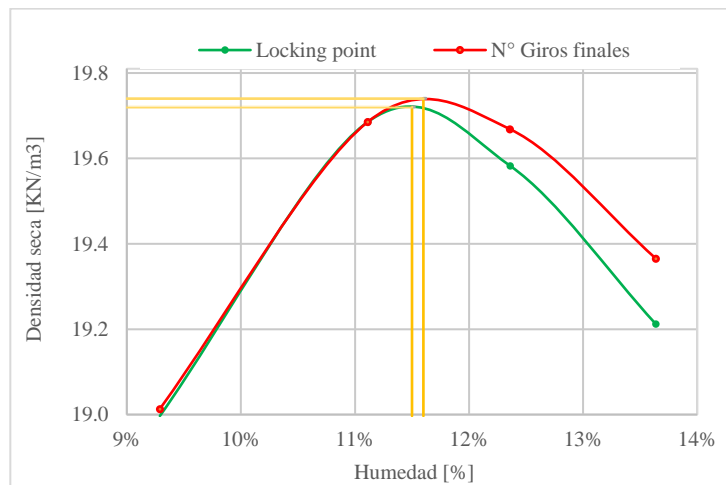


En la figura 8 se observa la curva de compactación obtenida a partir de las densidades secas finales, donde se puede evidenciar la humedad óptima para alcanzar el mayor peso unitario seco.

Figura 8.

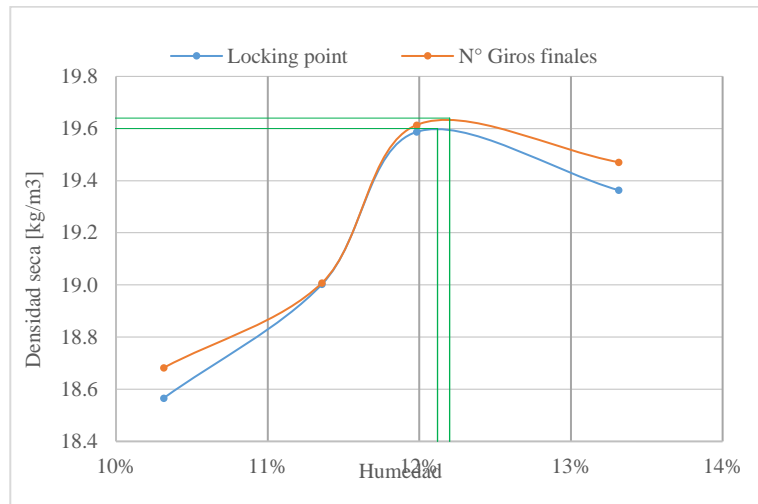
Densidad seca vs %humedad.

8a Densidad vs humedad MGM4



Presenta una densidad seca máxima de 19.73KN/m³ correspondiente a una humedad óptima de

11.6%

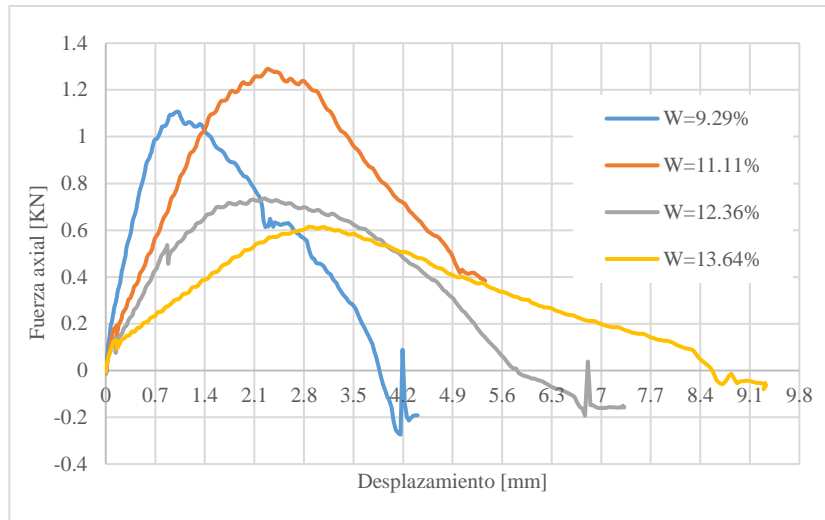
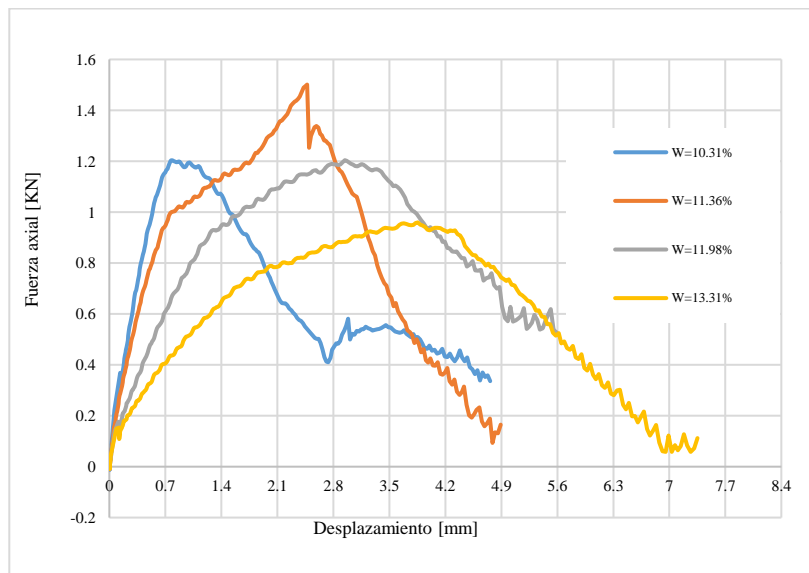
8b Densidad vs humedad MGM5

Presenta una densidad seca máxima de 19.64KN/m^3 correspondiente a una humedad óptima 12.2%

La influencia del IP se ve ligeramente evidenciada en el porcentaje de humedad óptima, se puede analizar que la tendencia va en aumento con respecto a la plasticidad del material.

6.4 Tracción Indirecta

En la figura 9 se presentan las curvas de carga vs el desplazamiento realizadas a partir del ensayo de resistencia a tracción indirecta el cual fue realizado a cada una de las probetas.

Figura 9.*Fuerza axial vs Desplazamiento.**9a. MGM4**9b. MGM5*

De estas figuras 9a-9b se obtiene la carga máxima de rotura, la cual nos permite identificar la resistencia a compresión diametral, de una probeta, mediante la ecuación (DNP , 2020):

$$R\tau = \frac{2P}{\pi h d} [\text{Ecuación 1}]$$

Donde:

Rτ = Resistencia a compresión diametral, (N/mm²).

P = Carga máxima de rotura, N.

π = Constante 3,14159...

h = Altura de la probeta, mm.

d = Diámetro de la probeta, mm

Los resultados se muestran en la tabla 6.

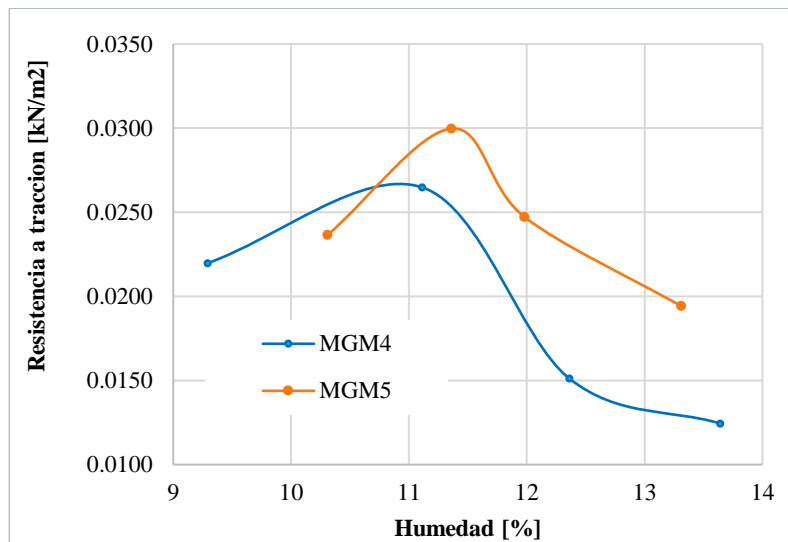
Tabla 6.

Resultados Ensayo a Traccion Indirecta.

Código de la probeta	W [%]	P [N]	h [mm]	d [mm]	Rτ [N/mm ²]
MGM4_21_8_C1	9,29	1107,73	210,65	152,4	0,0220
MGM4_21_8_C2	11,11	1290,54	203,56	152,4	0,0265
MGM4_21_8_C3	12,36	736,56	203,50	152,4	0,0151
MGM4_21_8_C4	13,64	614,93	206,44	152,4	0,0124
MGM5_21_12_C1	10,31	1204,20	212,71	152,4	0,0236
MGM5_21_12_C2	11,36	1501,15	209,22	152,4	0,0300
MGM5_21_12_C3	11,98	1204,18	203,5	152,4	0,0247
MGM5_21_12_C4	13,31	959,66	206,44	152,4	0,0194

El comportamiento del MGM4 sigue la lógica de los resultados de la compactación, es decir que la probeta con la humedad más cercana a la humedad óptima es la que resiste la mayor carga. Mientras que en el MGM5 la resistencia es mayor un punto antes de la humedad óptima.

La resistencia a tracción del material más plástico es mayor en humedades muy similares como se evidencia en la figura 10.

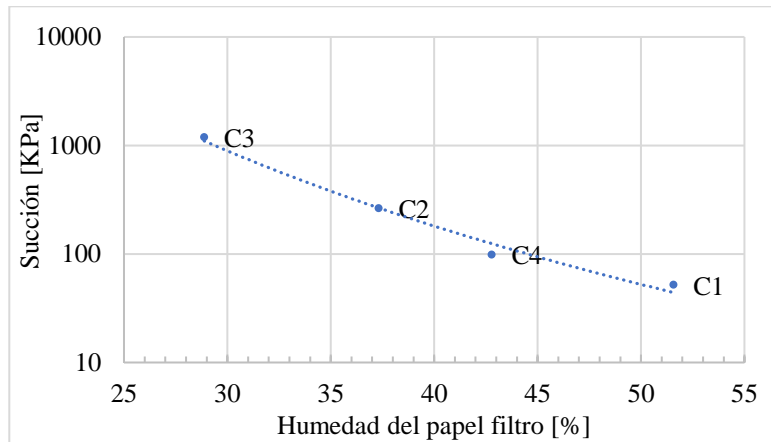
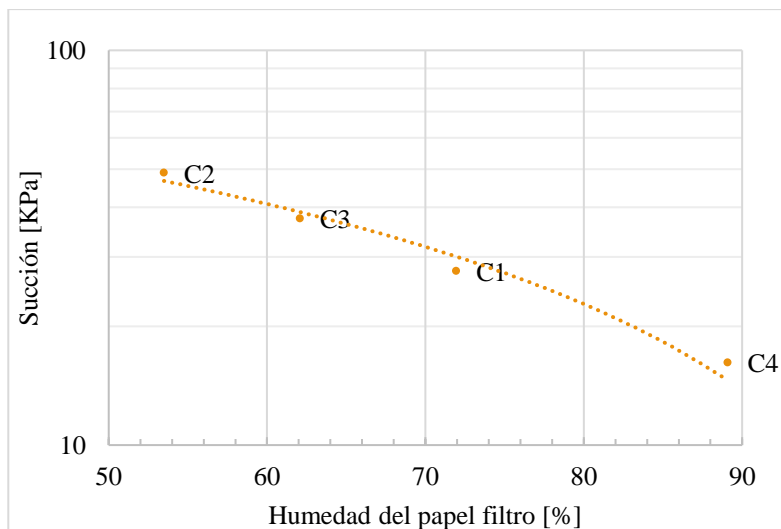
Figura 10.*Humedad vs Resistencia a Tracción.*

6.5 Succión

En la figura 11 y 12 la succión mayor se presenta en el MGM4 con humedad de 12.36% y una succión total de 1194 kPa, por su parte la que menos succión alcanzó fue la de menor humedad (9.3%) con 52 kPa.

En el MGM5 la probeta de humedad 11.36% obtuvo una succión total de 49 kPa y la probeta más húmeda 13.3% con una succión total de 16 kPa.

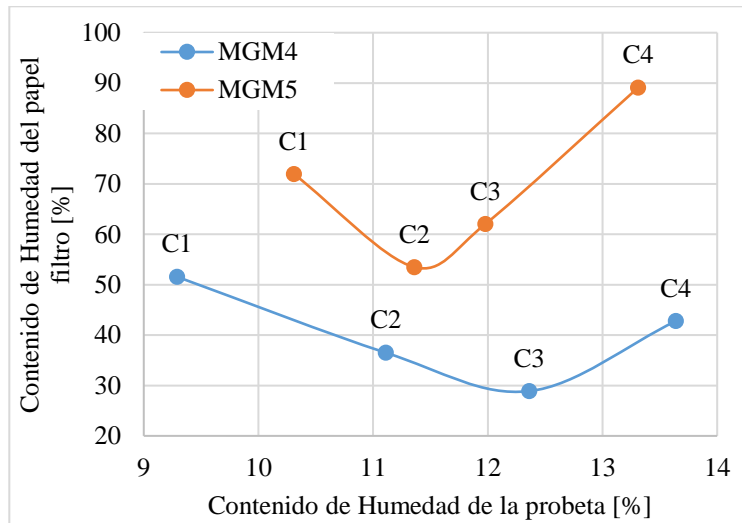
También se evidencia una mayor rigidez del MGM4 debido a que alcanza una succión significativamente alta con respecto al MGM5.

Figura 11.*Curva de Retención de Humedad MGM4.***Figura 12.***Curva de Retención de Humedad MGM5.*

En la figura 13 se comparan las humedades del papel de filtro con la humedad del suelo; la lógica es que a una mayor humedad en el suelo se presenta más humedad en el papel de filtro, esto se está cumpliendo únicamente en los 3 últimos puntos del MGM5 y en los dos últimos puntos del MGM4.

Figura 13.

Humedad del Suelo vs Humedad del Papel Filtro.



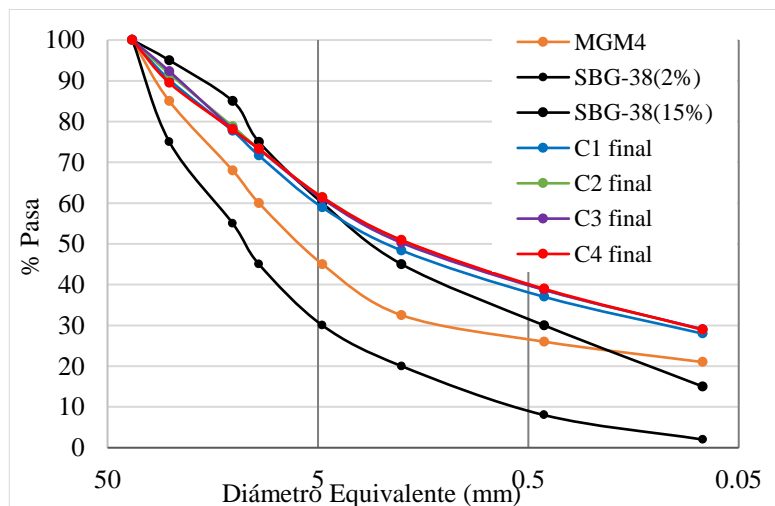
6.6 Granulometría post-ensayos

En la figura 14 se muestra la granulometría final del MGM4 y MGM5 luego de los ensayos de compactación y tracción indirecta, de igual forma se agregan las bandas granulométricas SBG-38 con los límites inferior y superior, y la granulometría inicial del material.

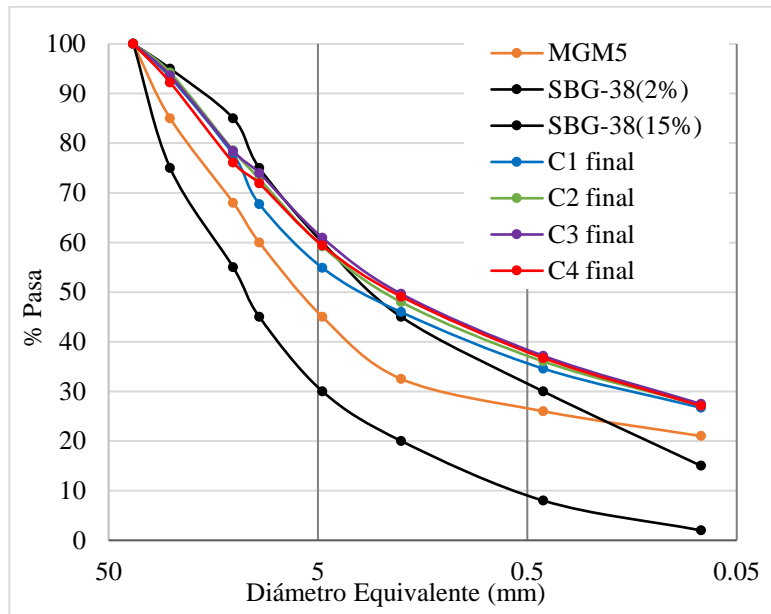
Figura 14.

Granulometría post-ensayos MGM4-MGM5.

14a. MGM4.



14b. MGM5.



Luego del lavado los finos aumentaron en un 8% para el MGM4 y 6 % en el MGM5 con respecto a la granulometría de trabajo inicial, y las demás fracciones también se modificaron. Se deduce que la mayoría de los finos excedentes se encontraban adheridos a las partículas más gruesas, ya que el material inicial no experimento lavado.

Hasta el tamiz No. 4 la granulometría está dentro de los límites de la gradación SBG-38. A partir de esto el material se estaría transformando en marginal no solo por su porcentaje de finos sino también por las fracciones anteriores.

Las humedades finales se presentan en la tabla 7 y 8, en la cual se observa una disminución con respecto a la humedad hallada inicialmente, esto debido a la exposición de las probetas al ambiente mientras se realizaban los ensayos previos. También se puede analizar que las probetas al tener mayor humedad el porcentaje de agua perdido es mayor, y en las probetas menos húmedas la pérdida es poca.

Tabla 7.*Humedades post-ensayos MGM4.*

MGM4	C1	C2	C3	C4
Peso inicial	6949	7278	7588	7630
Peso final	6388	6564	6785	6760
Humedad final	8.78%	10.88%	11.83%	12.87%
Humedad inicial	9.29%	11.11%	12.36%	13.64%

Tabla 8.*Humedades post-ensayos MGM5.*

MGM5	C1	C2	C3	C4
Peso inicial	7336	7441	7504	7548
Peso final	6704	6730	6747	6737
Humedad final	9.43%	10.56%	11.22%	12.04%
Humedad inicial	10.31%	11.36%	11.98%	13.31%

7. Conclusiones

- A pesar de que los materiales en estudio MGM4 (21% finos con IP 8%) y MGM5 (21% con IP 12%) tienen igual porcentaje de finos, la influencia del IP se refleja en el contenido de humedad óptimo, que es mayor en el material más plástico, esto debido a los reemplazos de material fino con caolinita y bentonita.
- Por otra parte, en términos de peso unitario seco, el MGM4 y MGM5 alcanzan su máximo en valores muy similares.
- Para lograr eficiencia en la compactación y no degradar el material en la maquina giratoria el número máximo de giros es de 180.

- El MGM5 soporta mayor resistencia a tracción indirecta en su humedad cercana a la óptima, pero alcanza menos deformación antes de fallar con respecto al MGM4.
- La humedad es directamente proporcional a la deformación del material y las probetas cercanas a la humedad óptima soportan la mayor carga axial lo que es de esperarse.
- El material menos plástico sufrió más degradación por efecto de las presiones verticales del compactador y la carga diametral del ensayo de tracción.
- El MGM4 tiene mayor capacidad de succión y esto se vería reflejado en la rigidez y resistencia de los contactos entre agregados del material debido a que soporta esfuerzos mayores que el MGM5.
- Los contenidos de humedad del papel de filtro no siguen la tendencia del contenido de humedad en todas las probetas, por ello, es necesario mejorar la metodología para la medición de succión como las condiciones de aislamiento y sello de la muestra para futuras mediciones.
- El porcentaje de finos en las probetas del MGM4 aumentó en promedio un 8% y en el MGM5 un 6% con respecto a la granulometría inicial, esto puede ser efecto del lavado post ensayos y en menor medida a la degradación del material debida a los ensayos de compactación giratoria y tracción indirecta.
- Las humedades post-ensayos presentan leves variaciones con respecto a la humedad real, en promedio las pérdidas fueron de 0.5%.
- Aun se requiere investigación adicional para caracterizar de una mejor manera aspectos de rigidez, deformación y capacidad de succión de los MGMs en estudio y tener una repetitividad y confiabilidad en los resultados obtenidos.

8. Recomendaciones

Hacer un estudio al material netamente de cantera sin reemplazo de finos con el propósito de analizar y comparar su comportamiento con los materiales estudiados.

Avanzar con los análisis de Módulo resiliente y deformación permanente para estas muestras en la segunda fase del proyecto.

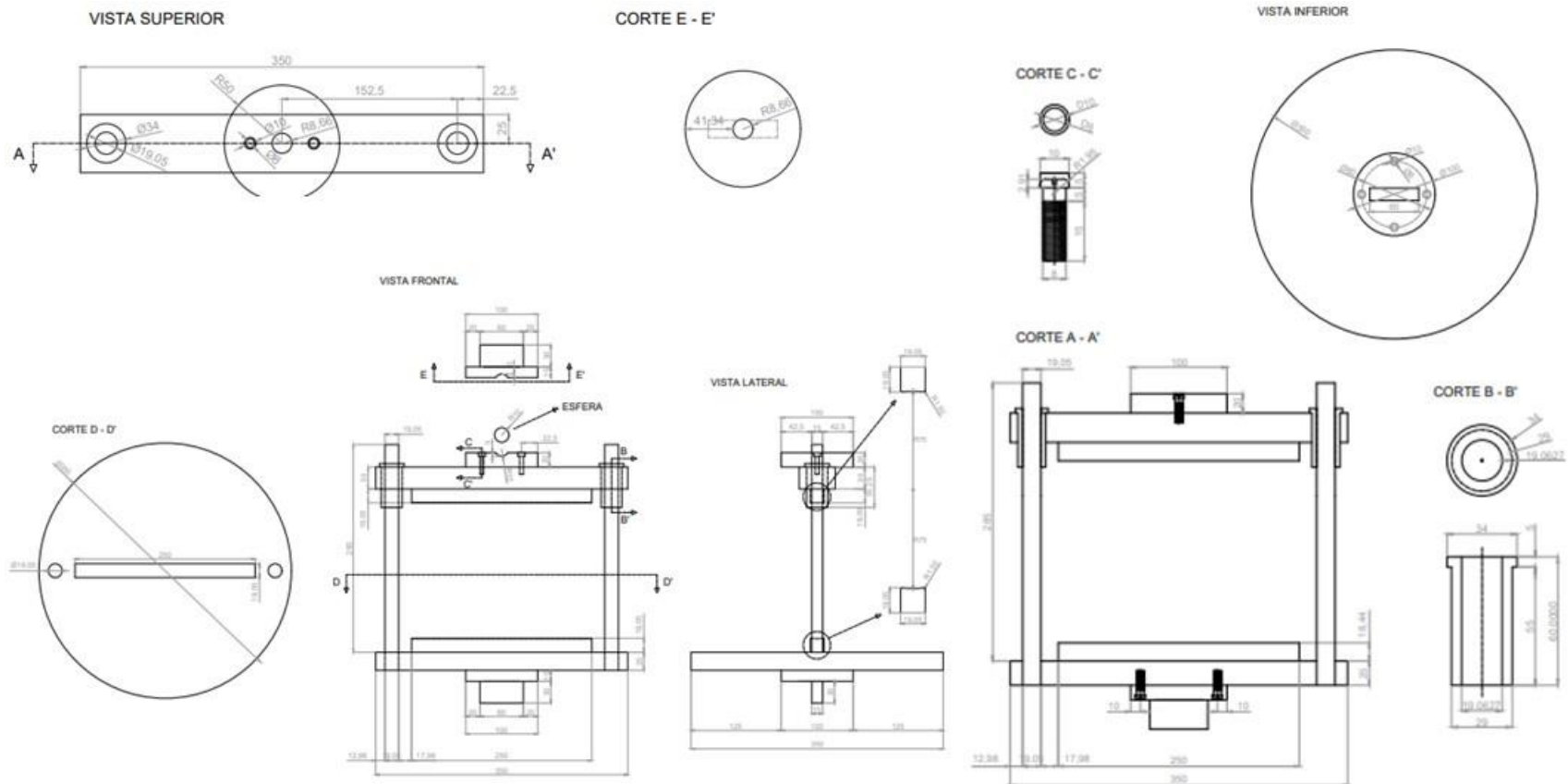
Referencias Bibliográficas

- Ballena, J. (s.f.). *Características Técnicas de la Subbase y base del pavimento*.
- Browne, M. (2006). *Viabilidad del uso de un compactador giratorio para determinar las características de compactación del suelo. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Civil*.
- Bui Van, D., Chinkulkijniwat, A., Horpibulsuk, S., Yubonchit, S., Limrat, I., Arulrajah, A., & Jothityangkoon, C. (2017). *Geosintéticos Internacional*.
- Cáceres, Ó., & Rodríguez, A. (2021). *Estimación de la resistencia monotónica en materiales granulares marginales como alternativa para la construcción de vías* . Obtenido de <http://hdl.handle.net/10654/38106>
- DAS, B. (2002). *Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica*. 594 pág. México: Thomson Learning.
- de Santos, C. G. (2018, abril). *Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compactados, respuesta a cargas estáticas y dinámicas. Tesis Doctoral*, . Universidad Complutense De Madrid.
- DNP . (2020). *Mejoramiento de vías terciarias - vías de tercer orden* . Proyecto tipo (2), p. 11-13.
- Fuentes, J. (2016). *Caracterización y mejora de suelos marginales en obra civil. Departamento de Ciencias de la Tierra Universidad Zaragoza, p. 1-22*.
- INVIAS E-159. (2013). *Determinación de la succión de un suelo con el método de papel filtro*.
- Luques, T. (Junio 2015). *Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión(P)*. [Trabajo especial de grado, Universidad Católica Andres Bello]. . Archivo digital.

- Ministerio de Fomento. (2000). *Geotecnia vial en lo referente a materiales para obras de la construcción de explanaciones y drenajes. Orden circular 326/00 (PG-3). Serie normativas. Instrucciones de construcción.* . Madrid.
- Mokwa, R., Cuelho, E., & Browne, M. (2008). *Laboratory Testing of Soil Using Superpave Gyratory Compactor.* . Transportation Research Board.
- Mora, A., & Gramage, J. (2022). *Ensayos a tracción del hormigón: Ensayos Indirectos MÁSCUEINGENIERÍA.* Obtenido de <https://masqueingenieria.com/blog/ensayos-a-traccion-indirecta-del-hormigon/>
- Rios, G. (2022). *Estudio geológico, Geología regional y geología estructural Paviandi. Versión 1, p.4-10.*
- Sánchez, F. (2016). *Modulo 7: materiales para base y subbase.*
- TDX. (sf). *Capítulo 2: comportamiento de suelos no saturados pg. 31.* <. Obtenido de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6220/21CAPITULO2.pdf?sequence=8&isAllowed=y>>
- Wilson, D., Li, W., Tam, L., & Black, P. (2017). *Permanent Strain Behavior of Marginal Granular Material.* . Transportation Research Record, p.54-63

Apéndices

Apéndice A. Modelo cabezal de carga



Apéndice B. *Toma de Imágenes*

Toma de Imágenes EN 2D - MGM4

Figura 1. *Probeta con humedad de 9.29% – Toma cara superior*

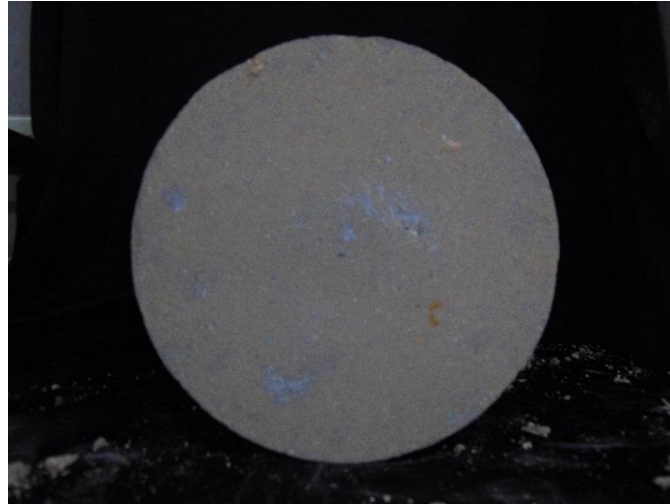


Figura 2. *Probeta con humedad de 9.29% – Toma cara lateral*



Figura 3. *Probeta con humedad de 9.29% – Toma falla 1*



Figura 4. *Probeta con humedad de 11.11% – Toma cara superior*

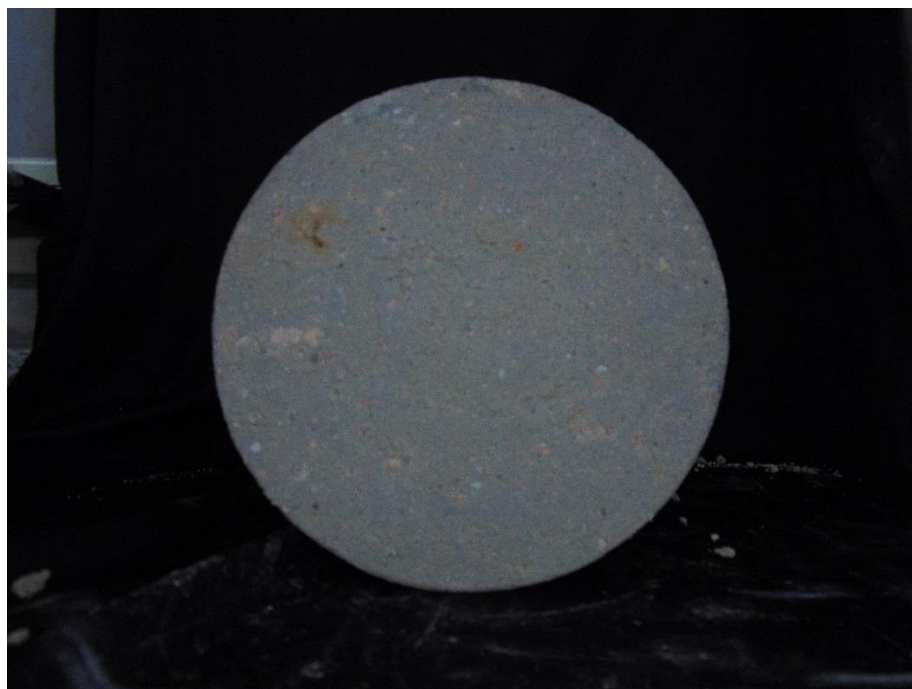


Figura 5. *Probeta con humedad de 11.11% – Toma cara lateral*



Figura 6. *Probeta con humedad de 11.11% – Toma falla 1*



Figura 7. *Probeta con humedad de 12.36% – Toma cara superior*



Figura 8. *Probeta con humedad de 12.36% – Toma cara lateral*



Figura 9. *Probeta con humedad de 12.36% – Toma falla 1*



Figura 10. *Probeta con humedad de 13.64% – Toma cara superior*



Figura 11. *Probeta con humedad de 13.64% – Toma cara lateral*



Figura 12. *Probeta con humedad de 13.64% – Toma falla 1*



Toma de Imágenes en 2D – MGM5

Figura 13. *Probeta con humedad de 10.31% – Toma cara superior*

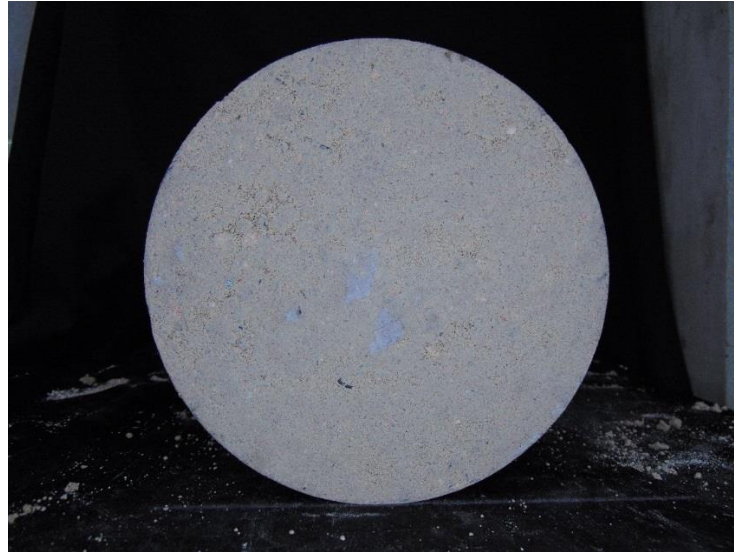


Figura 14. *Probeta con humedad de 10.31% – Toma cara lateral*



Figura 15. *Probeta con humedad de 10.31% – Toma falla 1*



Figura 16. *Probeta con humedad de 10.31% – Toma falla 2*



Figura 17. *Probeta con humedad de 11.36% – Toma superior*

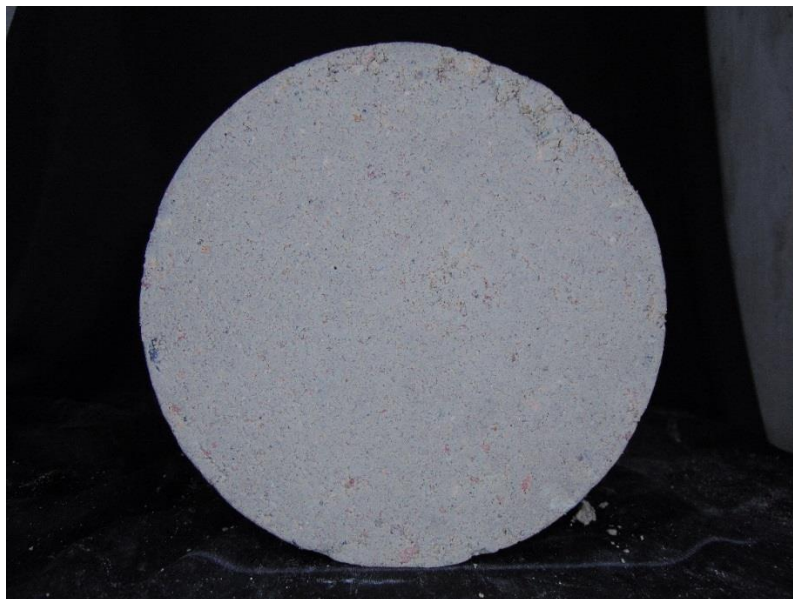


Figura 18. *Probeta con humedad de 11.36% – Toma cara lateral*



Figura 19. *Probeta con humedad de 11.36% – Toma falla 1*



Figura 20. *Probeta con humedad de 11.36% – Toma falla 2*



Figura 21. *Probeta con humedad de 11.98% – Toma superior*



Figura 22. *Probeta con humedad de 11.98% – Toma cara lateral*



Figura 23. *Probeta con humedad de 11.98% – Toma falla 1*



Figura 24. *Probeta con humedad de 11.98% – Toma falla 2*



Figura 25. *Probeta con humedad de 13.31% – Toma cara superior*



Figura 26. *Probeta con humedad de 13.31% – Toma cara lateral*



Figura 27. *Probeta con humedad de 13.31% – Toma falla 1*



Figura 28. *Probeta con humedad de 13.31% – Toma falla 2*



Toma de imágenes en 3D – MGM4

Figura 29. *Probeta con humedad de 9.29% – Toma falla 1*

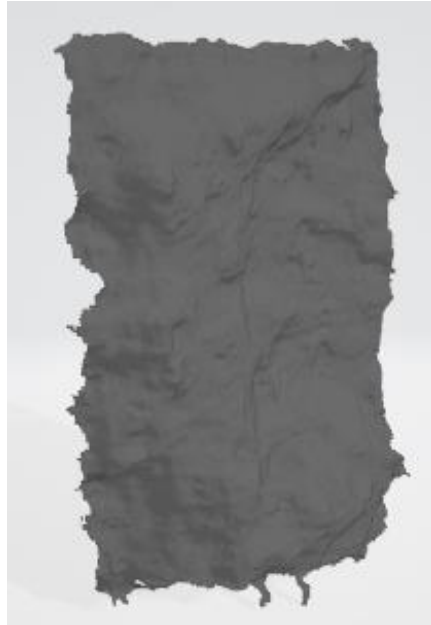


Figura 30. *Probeta con humedad de 11.11% – Toma falla 1*



Figura 31. *Probeta con humedad de 12.36% – Toma falla 1*

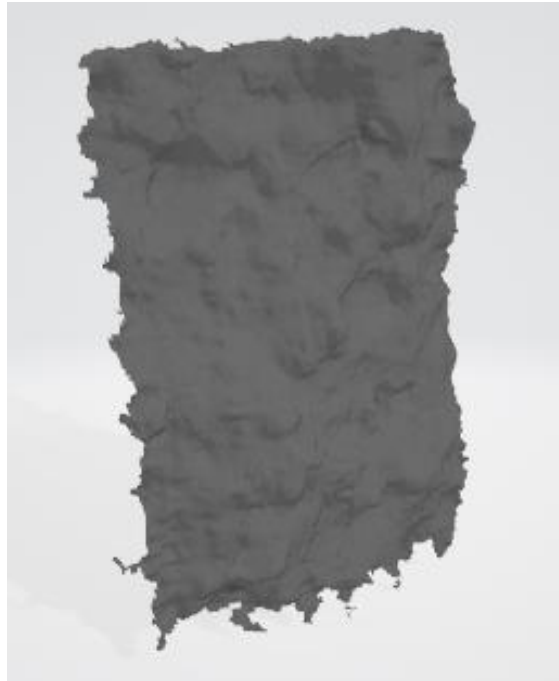


Figura 32. *Probeta con humedad de 13.64% – Toma falla 1*



Toma de imágenes en 3D – MGM5

Figura 33. *Probeta con humedad de 10.31% – Toma falla 1*



Figura 34. *Probeta con humedad de 10.31% – Toma falla 2*

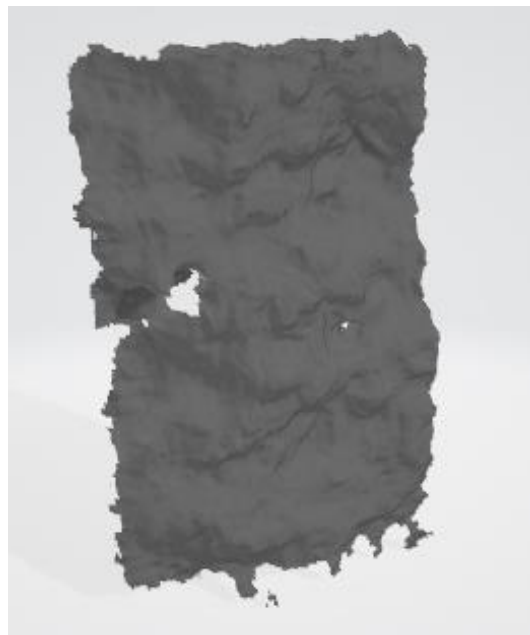


Figura 35. *Probeta con humedad de 11.36% – Toma falla 1*



Figura 36. *Probeta con humedad de 11.36% – Toma falla 2*



Figura 37. *Probeta con humedad de 11.98% – Toma falla 1*



Figura 38. *Probeta con humedad de 11.98% – Toma falla 2*



Figura 39. *Probeta con humedad de 13.31% – Toma falla 1*



Figura 40. *Probeta con humedad de 13.31% – Toma falla 2*



Apéndice C. Protocolo Medición de Succión sobre Probetas Irregulares**Angie Vanessa Angarita Cuevas****Yeison José Acevedo**

El presente método describe la determinación de la succión total haciendo uso de papel filtro, de una matriz de suelo compactada luego de ser aplicada una carga de tracción indirecta. o. La aplicación de esta metodología será basada en la norma INV E – 159 – 13 y ASTM D 5298 – 10.

El método del papel filtro es el único que permite la medición tanto de la succión total como de la succión matricial, y por ende se puede determinar de forma indirecta la succión osmótica. Los otros ensayos sólo permiten medir una de estas componentes, lo que implicaría tener que implementar más de un ensayo si se desea obtener una información más completa.

Succión total del suelo, h (kPa)

La succión total se expresa como la suma de dos componentes: la succión matricial (h_m) y la succión osmótica (h_s). En este contexto, la magnitud de la succión total corresponde al trabajo total de las fuerzas de capilaridad, absorción y ósmosis.

EQUIPO

- Papel de filtro – forma circular; diámetro 5 cm.

Figura 1. *Papel filtro*



- Recipiente hermético para el espécimen – redondo, diámetro inferior de 10 cm y 600 ml de capacidad.

Figura 2. *Recipiente hermético.*

- Empaque para el papel filtro – luego de haber alcanzado el equilibrio de succión: bolsa plástica de aproximadamente 6 cm de lado, con posibilidad de ser sellada de modo hermético.

Figura 3. *Empaque papel filtro*

- Caja aislante (cava icopor de 42 litros) – capaz de mantener temperatura de $\pm 1^\circ \text{C}$, y que la temperatura externa varíe $\pm 3^\circ \text{C}$.

Figura 4. *Caja aislante*

- Balanza – capacidad mínima de 20 g, y posibilidad de lectura de 1×10^{-4} g.

Figura 5. *Balanza*



- Horno – capaz de mantener temperatura a $110 \pm 5^\circ \text{C}$.

Figura 6. *Horno*



- Discos de acrílico – funcionan como separadores: de 6 cm de diámetro y 0.5 cm de espesor.

Figura 7. *Discos de acrílico*



- Recipientes de aluminio para el secado del papel filtro.

Figura 8. *Tara para el secado del papel filtro*



- Otros – pinzas, cinta aislante, guantes.

Figura 9. *Pinzas y cinta aislante*



PROCEDIMIENTO

1. Se secan en el horno los papeles filtro en recipientes de aluminio por 16 a 24 horas antes de realizar el ensayo de tracción indirecta a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$, luego se almacenan hasta su uso en bolsas herméticas por un periodo máximo de 24 horas para que no ganen humedad.
2. Preparación de la muestra a ensayar: se pesa una muestra de suelo fallada libre de fragmentos, de 300 a 400 g de masa y se coloca en el recipiente hermético para el espécimen. Para reducir tiempo de equilibrio y cambios de succión, la muestra deberá llenar casi el recipiente.

Nota: en lo posible, la muestra debe contar con una superficie regular para poder acoplarla a la cara del acrílico.

3. Montaje tipo sándwich: encima de la muestra se coloca un disco acrílico perforado de 6cm de diámetro y 0.5 cm de espesor, luego se retira de la bolsa hermética un papel de filtro e inmediatamente se coloca sobre el disco acrílico perforado y posteriormente en la parte de arriba se coloca un disco acrílico sin perforar, todo esto con el fin de que la muestra no entre en contacto con el papel filtro y se pueda realizar una correcta medición de succión total. Para asegurar que los discos se ajustan unos con otros se usa un poco de cinta aislante en dos puntos opuestos.

Figura 10. *Montaje tipo sándwich*

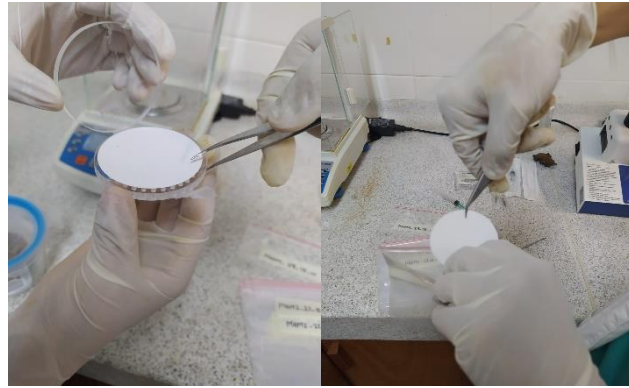


4. Succión de equilibrio – luego de realizar el montaje, se introduce en el recipiente hermético debidamente rotulado (imagen 9) y se cierra. Enseguida se introduce el montaje a la caja aislante y se lleva ésta a un ambiente donde la variación de la temperatura sea menor de 3° C. Durante un lapso mínimo de 7 días para que se alcance el equilibrio.

Nota: lo ideal es que el montaje quede en la parte superior de la muestra, si en algún caso no se logra la estabilidad, se acepta colocarlo a un costado.

Figura 11. *Muestra en recipiente hermético y montaje tipo sándwich*

5. Traslado de la caja aislante – Al terminar el periodo de equilibrio se lleva la cava sellada a las instalaciones donde se encuentra la balanza de precisión de 0.0001 g y no se abre hasta empezar el proceso de pesaje (ver imagen 9).
6. Preparación de las bolsas herméticas – se pesa el empaque donde se va a depositar el papel filtro (masa fría predeterminada T_c), con precisión de 0.0001 g. Hay que rotular cada bolsa para su identificación futura empleando un marcado indeleble.
7. Transferencia de papel filtro – una vez abierto el montaje, haciendo uso de las pinzas, se pasa el papel filtro a la bolsa plástica de masa inicial (T_c) predeterminada. El proceso se debe completar en un lapso de 3 a 5 segundos y se sella la bolsa. La clave para que las medidas del contenido de agua de los papeles de filtro sean exitosas, consiste en minimizar la pérdida de agua durante la transferencia del papel de filtro del recipiente para el espécimen y durante la determinación de la masa antes del secado. Se repite este procedimiento para cada uno de los papeles de filtro.

Figura 12. *Transferencia de papel a la bolsa hermética*

8. Pesado de los papeles filtro: Luego se determina la masa de la bolsa con el papel filtro en su interior (M1) con una precisión de 0.0001 g.
9. Extraer y secar: se extraen los papeles de filtro de sus bolsas y se ponen a secar en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ como mínimo 2 horas.
10. Pesar los filtros secos: Se coloca el papel filtro dentro de la bolsa plástica hermética sellada, se deja reposar 2 minutos y luego se determina la masa total del conjunto (M2), se saca el papel filtro de la bolsa y se determina la masa final de la bolsa (Th). Después de determinadas las masas se deben desechar los papeles de filtro, no se podrán volver a usar para realizar otro ensayo.

Nota: cuando se va a manipular el suelo y los papeles filtro es necesario el uso de guantes para minimizar alteraciones en la muestra y la humedad.

Figura 13. *Peso bolsa y papel filtro*

CÁLCULOS

- Para cada papel filtro se debe determinar:

$$M_f = M_2 - T_h \text{ (DNP , 2020)}$$

$$M_w = [M_1 - T_c] - M_f \text{ (Luques, Junio 2015)}$$

- Donde:
- M_f : Masa del papel de filtro seco, g;
 - M_1 : Masa total humeda (bolsa con papel filtro), g;
 - M_2 : Masa total seca (bolsa con papel filtro), g;
 - T_h : Masa del recipiente (bolsa) caliente, g;
 - M_w : Masa de agua en el papel de filtro, g;
 - T_c : Masa del recipiente (bolsa) frío, g.

- Se determina la humedad de cada papel de filtro W_f así:

$$W_f = \frac{M_w}{M_f} \times 100 \text{ (DAS, 2002)}$$

Donde: W_f : Contenido de agua del papel de filtro, %

M_f : Masa del papel de filtro seco, g

- Ahora se convierte la humedad del papel de filtro W_f a un valor de succión, con ayuda de una curva específica de calibración o mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Log } S = (m \times W_f) + b \text{ (Mokwa, Cuelho, \& Browne, 2008)}$$

Donde: m : Pendiente de la curva de calibración del papel de filtro,
 $\log_{10} \text{ kpa/\%}$ del contenido de agua

b : Ordenada al origen de la curva de calibración del papel de filtro,
 $\log_{10} \text{ kpa/\%}$

- Dependiendo del valor de W_f se hace uso de la calibración disponible en la ASTM

D5298 – 10, para papel Whatman N°42, la cual se presenta en la tabla:

Tabla 1. *Curva de calibración para papel filtro Whatman N°42, ASTM D5298 – 10*

Curva de calibración		
Humedad	m	b
<45,3	-0,0779	5,3270
>45,3	-0,0135	2,4120

Bicalho, Correira, Ferreira, Fleureau y Marino, presentan una recopilación de otras calibraciones para evaluar la succión usando papel filtro Whatman N° 42. Todas estas calibraciones entregan el valor de la succión en \log_{10} (succión) kPa, y responden a la Ecuación (Mokwa, Cuelho, & Browne, 2008). Usando estas calibraciones (Tabla 2).

Tabla 2. *Curvas de calibración para el papel filtro Whatman N° 42 (Modificado Bicalho et al*

Curvas de calibración				
Referencia	Succión [kPa]	Humedad [%]	m [\log_{10} kPa/%]	b [\log_{10} kPa]
ASTM D5298	Total y matricial	<45,3	-0,0779	5,3270
		>45,3	-0,0135	2,4120
Chandler y Gutierrez	Matricial	-	-0,0622	2,85
Chandler et al	Matricial	<47	-0,0622	4,842
		>47	-2,48*log()	6,050
Oliveira y Marino	Total y matricial	<33	-0,0839	4,83
		>33	-0,0154	2,57
Leong et al.	Total	<26	-0,0879	5,31
		>26	-0,222	8,778
Leong et al.	Matricial	<47	-0,0673	4,945
		>47	-0,0229	2,909

- Finalmente se calcula la succión total

$$Succión\ total = 10^{LogS} [Kpa]$$

Apéndice D. *Video Medición de succión total en carpeta comprimida*