

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE MARGINALIDAD EN TÉRMINOS DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y EL PORCENTAJE DE FINOS, SOBRE LA RESPUESTA MECÁNICA DE LA TOLERANCIA A LA FISURACIÓN EN MGM SIMPLES

Marco Antonio Díaz Santodomingo, Angie Dayanna Mesa López

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

PhD. En Ingeniería Civil

Codirector

Johan Sebastián Bustamante Plata

Ing. Civil, Estudiante de maestría en ingeniería Civil

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

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

Queremos expresar nuestra más sincera gratitud a nuestros padres, quienes, con su apoyo incondicional, motivación y confianza han sido el pilar fundamental para alcanzar esta meta académica.

De igual manera, extendemos un especial reconocimiento a los profesores Alex Eduardo Álvarez Lugo y Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, por su orientación, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo, los cuales enriquecieron de manera significativa nuestro aprendizaje.

Asimismo, agradecemos a los estudiantes que en investigaciones anteriores contribuyeron a la construcción de una base de datos sólida y confiable, la cual resultó esencial para el desarrollo de este estudio y permitió dar continuidad al proceso investigativo.

Finalmente, expresamos nuestro profundo agradecimiento a nuestro codirector Johan Sebastián Bustamante Plata, por su constante disposición, compromiso y acompañamiento, brindando siempre la guía necesaria para realizar una investigación rigurosa y detallada.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Teórico.....	14
2.1 Materiales y composición	14
2.2 Diseño de las probetas	15
3. Metodología	16
3.1 Elaboración de probetas	17
3.1.1 Tamizaje.....	17
3.1.2 Proceso de secado	18
3.1.3 Mezcla en húmedo	18
3.1.4 Curado.....	19
3.1.5 Compactación	19
3.2 Curvas de compactación	20
3.3 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ITS).....	20
3.4 Ensayo de resistencia a la compresión inconfínada (UCS).	22
3.5 Análisis de Imágenes 3D	22

4.	Resultados.....	24
4.1	Auditoria de la información de la base de datos de los resultados experimentales de respuesta mecánica de los MGM 1 al 10.....	24
4.2	Análisis de imágenes 3D.....	26
4.3	Estimación del índice CT de MGM partiendo del ensayo de tracción indirecta.....	27
4.4	Análisis del índice de agrietamiento en resistencia a la tracción indirecta con respecto a factores de porcentaje de humedad, porcentaje de saturación y la relación de vacíos.....	30
4.5	Efecto de los parámetros de fricción según el ángulo sobre la variación del índice de agrietamiento en compresión inconfínada.....	33
4.6	Estimación del índice CT de MGM partiendo del ensayo de compresión inconfínada.....	34
4.7	Análisis del índice de agrietamiento en compresión inconfínada con respecto a factores de porcentaje de humedad, porcentaje de saturación y la relación de vacíos.....	36
4.8	CT-TI en comparación con CT-CI.....	38
5.	Conclusiones.....	40
6.	Recomendaciones.....	41
	Referencias Bibliográficas.....	42

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Características materiales granulares marginales MGM Características materiales granulares marginales MGM.	14

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Ubicación del área de estudio.....	15
Figura 2 Metodología.....	16
Figura 3 Montaje realizado en el laboratorio Albaro Pinzón.....	17
Figura 4 Secado de material en el horno.....	18
Figura 5 Curado de la muestra en húmedo	19
Figura 6 Compactador giratorio.....	20
Figura 7 Ensayo de tracción indirecta.....	21
Figura 8 Ensayo de compresión inconfiada.....	22
Figura 9 Imagen superficie de falla 3D vista en Meshlab	23
Figura 10 Comparación de curva de compactación recopilada en base de datos y curva de compactación con nueva	25
s humedades en MGM7	25
Figura 11 Comparación de curva de compactación recopilada en base de datos y curva de compactación con nuevas humedades en.....	26
MGM2.....	26
Figura 12 Análisis de variación de los valores obtenidos en Área corregida y Área plana	27
Figura 13 Comparación de la resistencia a la tracción indirecta con núcleo reforzado teniendo en cuenta el índice de plasticidad y el porcentaje de finos	28

Figura 14 Comparación valores de índice Ac y A en resistencia a la tracción indirecta con núcleo reforzado frente a valores de índice de plasticidad.	28
Figura 15 Comparación valores de índice Ac y Ap en resistencia a la tracción indirecta con núcleo reforzado frente a valores de porcentaje de finos	29
Figura 16 Comparación valores de índice Ac y Ap en resistencia a la tracción indirecta con núcleo reforzado frente a valores de resistencia a la tracción indirecta	30
Figura 17 Comportamiento valores de índice CT-Ideal, CT Ac, CT Ap en función de la humedad	31
Figura 18 Comportamiento valores de índice CT-Ideal, CT Ac, CT Ap en función de la saturación	32
Figura 19 Comportamiento valores de índice CT-Ideal, CT Ac, CT Ap en función de la relación de vacíos.....	33
Figura 20 Relación del ángulo de fricción al índice de agrietamiento en compresión inconfiada (CT-CI).....	34
Figura 21 Comparación valores de índice de agrietamiento en compresión inconfiada (CT-CI) con núcleo reforzado frente a valores de índice de plasticidad	34
Figura 22 Comparación valores índice de agrietamiento en compresión inconfiada (CT-CI) con núcleo reforzado frente al porcentaje de finos	35
Figura 23 Comportamiento valores de índice CT-CI en función de la humedad	36
Figura 24 Comportamiento valores de índice CT-CI en función de la saturación	37
Figura 25 Comportamiento valores de índice CT-CI en función de la relación de vacíos	37

Figura 26 Comparación valores de resistencia a la tracción indirecta (RTI) con núcleo reforzado frente a la resistencia a la compresión inconfiada (RCI)..... 38

Figura 27 Comparación valores índice de agrietamiento en tracción indirecta (CT-TI) con núcleo reforzado frente al índice de agrietamiento compresión inconfiada (CT-CI) 39

Resumen

Título: Análisis de la influencia de marginalidad en términos del índice de plasticidad y el porcentaje de finos, sobre la respuesta mecánica de la tolerancia a la fisuración en MGM simples

Autor: Marco Antonio Díaz Santodomingo, Angie Dayanna Mesa López

Palabras Clave: material, ductilidad, resistencia, comportamiento, plasticidad.

Descripción: El presente estudio tiene como propósito analizar los resultados obtenidos de ensayos mecánicos realizados bajo carga estática en materiales granulares marginales (MGM). Se pretende evaluar la eficacia de un nuevo parámetro denominado Índice de Tolerancia al Agrietamiento (Índice CT), el cual busca ofrecer una alternativa rápida y económica para caracterizar el comportamiento mecánico de estos materiales. La investigación se centró en el análisis de diez tipos de MGM (identificados de M1 a M10), los cuales se componen de distintas proporciones de finos e índices de plasticidad, evaluando su comportamiento mediante ensayos de tracción indirecta y compresión no confinada. Se implementó una metodología que incluye el uso de un área de fractura corregida para el ensayo de tracción indirecta, lo que permitió un análisis más detallado de la respuesta del material. A partir de las curvas fuerza-desplazamiento, Además, se emplearon imágenes 3D capturadas con el sensor Kinect y procesadas en Google Colab para calcular el área de fractura. Los resultados revelaron que el contenido de finos y el índice de plasticidad no influyen de forma significativa sobre el índice CT. Se identificaron materiales con alta resistencia, pero baja ductilidad (M3, M6 y M8), y otros con buena tolerancia al agrietamiento, pero baja resistencia (M7 y M5), resaltando M4 y M10 por su equilibrio entre rigidez y ductilidad. También se observó una posible correlación lineal entre los índices CT obtenidos en ambos tipos de ensayo, aunque se requiere mayor validación experimental. En conclusión, el índice CT se perfila como un parámetro prometedor para evaluar el desempeño mecánico de MGM, aunque se recomienda continuar con estudios adicionales para consolidar su aplicabilidad en el diseño de pavimentos.

Pasantía de investigación

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. PhD. En Ingeniería Civil. Codirector: Johan Sebastián Bustamante Plata. Ingeniero Civil.

Abstract

Title: Analysis of the influence of marginality in terms of the plasticity index and the percentage of fines, on the mechanical response of crack tolerance in simple MGM.

Author: Marco Antonio Díaz Santodomingo, Angie Dayanna Mesa López

Key Words: material, ductility, endurance, behavior, plasticity.

Description: The purpose of the present study is to analyze the results obtained from mechanical tests carried out under static load on marginal granular materials (MGM). It is intended to evaluate the efficacy of a new parameter called Agrieting Tolerance Index (CT Index), which seeks to offer a rapid and economical alternative to characterize the mechanical behavior of these materials. The investigation focused on the analysis of ten types of MGM (identified from M1 to M10), which are composed of different proportions of fine plasticity, evaluating their behavior through indirect traction tests and unconfined compression. A methodology was implemented that includes the use of a corrected fracture area for the indirect traction test, which allowed a more detailed analysis of the material's response. From the strength-displacement curves, in addition, 3D images captured with the Kinect sensor and processed in Google Colab were used to calculate the fracture area. The results revealed that the fine's content and the plasticity index do not significantly influence the CT index. Materials with high resistance were identified but low ductility (M3, M6 and M8), and others with good tolerance to cracking but low resistance (M7 and M5), highlighting M4 and M10 for its balance between rigidity and ductility. A possible linear correlation between the CT indices obtained in both types of trial was also observed, although greater experimental validation is required. In conclusion, the CT index is emerging as a promising parameter to evaluate the mechanical performance of MGM, although it is recommended to continue with additional studies to consolidate its applicability in the design of pavements.

Research internship

Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, PhD in Civil Engineering. Co-director: Johan Sebastián Bustamante Plata, Civil Engineer.

Introducción

Para el año 2022, Colombia cuenta con una red vial estimada de 205.745 km, distribuida en red primaria (9%), secundaria (22%) y terciaria (69%). De esta última, el 71% está bajo administración municipal, el 10% a cargo de departamentos, y el 19% bajo responsabilidad del Gobierno nacional a través del INVÍAS. Según datos del Departamento Nacional de Planeación (DNP), aproximadamente el 70% de las vías terciarias son en afirmado, el 24% en tierra y solo el 6% están pavimentadas. En términos de estado físico, solo el 19% se encuentra en buen estado, mientras que el 41% está en estado regular y el 40% en mal estado.[1]

La mejora de la red terciaria tiene un impacto directo en sectores productivos como la agricultura, ganadería, piscicultura, turismo, educación rural y minería, además de contribuir a la reducción de la pobreza, el aumento de la comercialización local, la mejora de la movilidad rural y el fortalecimiento del proceso de paz. Asimismo, un plan de mantenimiento eficiente en estas vías tiene el potencial de generar empleo local directo, convirtiéndose en un factor clave para el desarrollo sostenible de las zonas rurales.

Ante este panorama, el uso de Materiales Granulares Marginales (MGM) surge como una alternativa viable para vías de bajo volumen vehicular, gracias a su disponibilidad local y bajo costo, a pesar de no cumplir con las especificaciones técnicas del INVÍAS. Esta investigación evalúa el comportamiento mecánico de MGM mediante ensayos de tracción indirecta y compresión inconfiada, aplicando además el índice CT (Cracking Tolerance) originalmente desarrollado para mezclas asfálticas, como parámetro de resistencia a la fractura. Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

El estudio también analiza el efecto de la segregación granulométrica (concentración de gravas en el centro de la probeta, llamada núcleo reforzado) y utiliza imágenes 3D para obtener áreas reales de fractura, permitiendo una caracterización más precisa del desempeño estructural de los materiales. Los resultados buscan apoyar la adopción de soluciones técnicas sostenibles que mejoren la red terciaria colombiana.[3]

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la influencia de las condiciones de marginalidad en términos del porcentaje de finos e índice de plasticidad sobre la respuesta de fisuración en ensayos de tracción indirecta y compresión no confinada en los MGM 1 al 10.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar una auditoría de la información de la base de datos de los resultados experimentales de respuesta mecánica de los MGM 1 al 10.

Desarrollar una fase experimental complementaria en términos de ensayos mecánicos (resistencia a la compresión no confinada y resistencia a la tracción indirecta) en materiales granulares marginales.

Evaluar la tolerancia a la fisuración mediante la determinación del índice CT en curvas carga-desplazamiento de los ensayos mecánicos.

2. Marco Teórico

2.1 Materiales y composición

En el marco de esta investigación, se analiza la respuesta mecánica de una serie de Materiales Granulares Marginales (MGM), cada uno caracterizado por un contenido específico de finos y un índice de plasticidad como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Características materiales granulares marginales MGM Características materiales granulares marginales MGM.

Características materiales granulares marginales MGM Características materiales granulares marginales MGM.

Material	(DMA) %	CdF (%)	IP (%)
M1	60	18	8
M2	60	18	12
M3	60	18	15
M4	60	21	8
M5	60	21	12
M6	60	21	15
M7	60	24	8
M8	60	24	12
M9	60	24	15
M10	60	19	11

Nota: DMA: desgaste máquina de los ángulos, CdF: Contenido de finos, IP: Índice de plasticidad.

Para la evaluación experimental, se elaboraron probetas con configuración de núcleo reforzado, con el fin de analizar el efecto de la segregación granulométrica en el comportamiento mecánico del material. La fabricación de las probetas se llevó a cabo utilizando material

proveniente de la cantera de Pavimentos Andinos S.A. (Paviandi) como se observa en la Figura 1 y está ubicada en el kilómetro 4.5 de la vía Piedecuesta–Aratoca, en el departamento de Santander.

Figura 1

Ubicación del área de estudio



2.2 Diseño de las probetas

El diseño de las probetas se basó en la curva de compactación obtenida a partir de datos recolectados durante el desarrollo del proyecto. Para cada muestra marginal se incorporó un dato adicional que permitió construir su respectiva curva de compactación, determinando el peso unitario seco máximo y la humedad óptima. Con estos parámetros se fabricaron probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 200 mm de altura, dimensiones establecidas según las normas de ensayo de la línea de investigación. La compactación se realizó mecánicamente con el compactador giratorio Superpave, aplicando una energía de 130 giros para todas las muestras.

3. Metodología

El material utilizado fue suministrado por el laboratorio PAVIANDI y sometido a tamizaje, secado, mezcla en húmedo y curado. Posteriormente, se realizó la compactación de las muestras para desarrollar dos líneas de análisis: curvas de compactación y ensayos mecánicos. Las curvas óptimas de compactación se determinaron para cada muestra. En cuanto a los ensayos, se aplicaron pruebas de ensayo de resistencia a la tracción indirecta (RTI) y ensayos de resistencia a la compresión confinada (RCI), acompañadas de toma de imágenes 2D (y 3D para ITS), las cuales permitieron analizar la superficie de falla y calcular el índice de tolerancia a la fisuración (Índice CT), el proceso metodológico se resume en la Figura 2.

Figura 2

Metodología



3.1 Elaboración de probetas

La fabricación de las probetas se realizó conforme a los procedimientos especificados en caracterización de materiales marginales desde la MGM1 a la MGM10, se tamiza el material extraído de la cantera Paviandi, posteriormente se seca para hacer la mezcla en seco según la granulometría de cada MGM. Adicionalmente, a la humedad óptima para cada MGM se realiza la mezcla; pasado un mínimo de 24 horas en curado, se prepara para la compactación giratoria y así obtener, muestras sometidas a ensayos de carga estática (i.e., ITS, UCS).

3.1.1 Tamizaje

El proceso de tamizado se realiza mecánicamente (ver Figura 3) separando tamaños mediante una serie de tamices (i.e., 1", ½", 3/8", N4, N10, N40, N200). Su funcionamiento se basa en un movimiento vibratorio o circular que facilita el paso de las partículas más pequeñas a través de los tamices, mientras que las más grandes quedan retenidas.

Figura 3

Montaje realizado en el laboratorio Albaro Pinzón



3.1.2 Proceso de secado

Para secar el material granular marginal se utilizaron los hornos mostrados en la Figura 4 a una temperatura de 110 ± 5 °C, separamos el material según su tamaño en diferentes bandejas por un periodo de 18 a 24 horas.

Figura 4

Secado de material en el horno



3.1.3 Mezcla en húmedo

La mezcla en húmedo consiste en añadir agua en flujo controlado hasta alcanzar un contenido de humedad definido. El agua se incorpora de forma gradual, mezclando constantemente para asegurar una distribución homogénea. Así mismo es importante mencionar que la mezcla es realizada en mezcladora con 60 revoluciones por minuto y con un brazo metálico para facilitar el mezclado.

3.1.4 Curado

En la Figura 5 se muestra el proceso de curado después de obtener la mezcla en húmedo consiste en mantener las muestras en condiciones controladas de humedad y temperatura durante un período de 18 a 24 horas para equilibrar u homogeneizar la humedad en toda la masa de la mezcla. Para este proceso se introduce la mezcla húmeda en 3 bolsas tipo Ziploc alternando su posición con el cierre hermético y sacándole todo el aire de la bolsa para evitar la pérdida de humedad.

Figura 5

Curado de la muestra en húmedo



3.1.5 Compactación

Tras cumplirse el periodo de curado de la mezcla, comprendido entre 18 y 24 horas, se procede a utilizar el compactador giratorio el (Ver Figura 6), aplicando una energía de 130 giros para la compactación de las probetas.

Figura 6

Compactador giratorio



3.2 Curvas de compactación

La curva de compactación se elabora realizando ensayos de compactación sobre el mismo material con diferentes contenidos de humedad, obteniéndose en cada caso el peso unitario seco correspondiente. Como podremos ver en los resultados, se grafican los valores de peso unitario seco frente a la humedad para cada ensayo, lo que permite identificar el punto en el que el peso unitario seco alcanza su valor máximo, determinando así la humedad óptima.

3.3 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ITS)

En la Figura 7 se evidencia el desarrollo del ensayo el cual se adecuó un cabezal transmisor de carga con dimensiones apropiadas que garantizan la aplicación uniforme de la carga a lo largo de la longitud diametral de las probetas de desempeño. La prueba se llevó a cabo utilizando una

máquina Controls Multi Loader con control de desplazamiento, empleando una velocidad de carga estandarizada de 3 mm/min, considerando que la norma ASTM D8225-19

[4], está dirigida a muestras asfálticas y no a suelos. No obstante, se toma como referencia el procedimiento descrito en dicha norma, que consiste en aplicar una carga de compresión sobre la probeta a lo largo de su diámetro horizontal. Este ensayo permite evaluar el fallo inducido por las tensiones de tracción en el espécimen, proporcionando información sobre sus propiedades de fisura por fatiga, deformación permanente y comportamiento elástico.

Para calcular el índice de agrietamiento se usó la Ecuación 1 donde h es la altura de la probeta, Gf el área de fractura (Área curva /Área superficie de falla), m75 es la pendiente al 75%, 175 es el desplazamiento al 75% y 10⁶ es un factor de escala, esta misma se usó para hallar el índice de agrietamiento en ensayos de tracción indirecta.

Ecuación 1

$$\text{Índice CT} = \frac{h}{2} * \frac{Gf}{|m75|} * \frac{175}{D} * 10^6$$

Figura 7

Ensayo de tracción indirecta



3.4 Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada (UCS).

La Figura 8 el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada es una prueba geotécnica utilizada para determinar la capacidad de un suelo cohesivo, ya sea en condiciones inalteradas, para soportar una carga axial sin confinamiento lateral. Consiste en aplicar una carga axial sobre una muestra cilíndrica de suelo hasta provocar su falla, registrando la resistencia a la compresión inconfiada como la carga por unidad de área en el instante de la rotura. Este ensayo resulta fundamental para estimar de manera aproximada la resistencia al corte del suelo, proporcionando información clave para el diseño y análisis de obras geotécnicas.[5]

Figura 8

Ensayo de compresión inconfiada



3.5 Análisis de Imágenes 3D

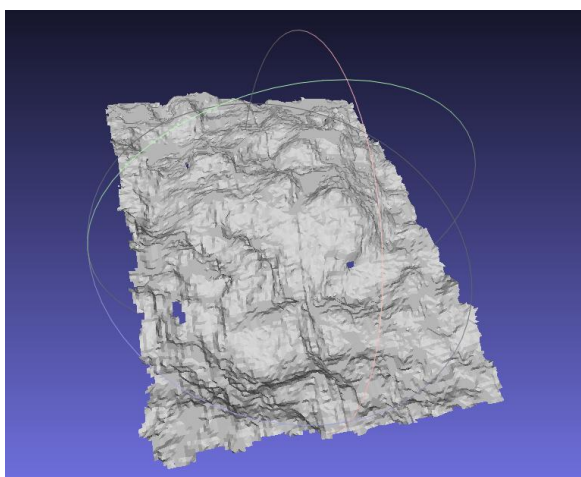
Para capturar el área verdadera de fractura, primero se registraron imágenes tridimensionales (Ver Figura 9) tras ejecutar el ensayo de tracción indirecta empleando el sensor

infrarrojo Kinect. Este dispositivo es capaz de escanear y medir con precisión los objetos localizados dentro de un volumen espacial determinado.

Para determinar el área ajustada, la imagen previamente procesada en MeshLab se exportó a Google Colab. Mediante un script suministrado por investigadores de la Universidad Militar Nueva Granada que calcula el área de cada triángulo definido por sus vértices y suma esos valores, se obtuvo la superficie total. Con este valor corregido, se comparan los resultados del Índice CT frente a los obtenidos considerando el área plana. Asimismo, se analizó la variabilidad de las medidas de área corregida y plana para cada probeta: se calculó el promedio de las réplicas de cada material y, a partir de la desviación estándar, se determinó el coeficiente de variación.

Figura 9

Imagen superficie de falla 3D vista en Meshlab



4. Resultados.

En esta fase se llevó a cabo una auditoría de la base de datos de respuesta mecánica correspondiente a los MGM 1 al 10, constituyendo el primer paso para asegurar la coherencia y confiabilidad de los registros recopilados previamente. A partir de ello, se desarrolla una fase experimental complementaria mediante ensayos de resistencia a la compresión no confinada y tracción indirecta, que refuerza la caracterización de los materiales granulares marginales. Finalmente, la determinación del índice CT a partir de las curvas carga-desplazamiento permite evaluar la tolerancia a la fisuración, aportando criterios técnicos más robustos para comprender el comportamiento y la aplicabilidad de estos materiales en obras de ingeniería.

4.1 Auditoría de la información de la base de datos de los resultados experimentales de respuesta mecánica de los MGM 1 al 10.

En la auditoría a realizar se tomó en cuenta los siguientes trabajos de investigación realizados por los siguientes estudiantes: Paredes y Álvarez [6], Bustamante y Infante [7], Arciniegas y Garzón [8], Joya [9], Méndez y García [10], Serrano y Agudelo [11], Anaya y Rodríguez, [12], Orduz y Torres[13].

Se llevó a cabo una auditoría de información con el objetivo de consolidar y verificar la calidad de los datos obtenidos en ensayos realizados con anterioridad. Primeramente, se recolectó la información faltante proveniente de diferentes ensayos (i.e., archivos crudos curvas de compactación, gráficos esfuerzos vs deformación, relaciones de fase, parámetros volumétricos).

Posteriormente los datos fueron procesados y validados, con el fin de evaluar su veracidad y consistencia con los parámetros teóricos de diseño.

Como parte de este proceso, se estableció un porcentaje de tolerancia del 10% entre la humedad experimental y la teórica para cada MGM, que permitió determinar la aceptabilidad de las variaciones encontradas, garantizando así la confiabilidad de la información final utilizada en el estudio.

Así mismo, como se aprecia en la Figura 10 y Figura 11, los datos obtenidos en la recopilación de información, junto con los puntos experimentales (Color azul), permiten concluir que en la mezcla MGM7 se evidencia una variación significativa en la curva de compactación, lo que implica un ajuste en la humedad óptima, la cual se modifica a 11,5%. En contraste, para la mezcla MGM2 no se registraron cambios, manteniéndose en un valor de 12,3%.

Figura 10

Comparación de curva de compactación recopilada en base de datos y curva de compactación con nuevas humedades en MGM7

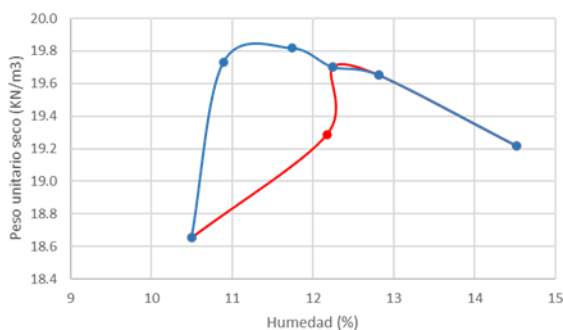
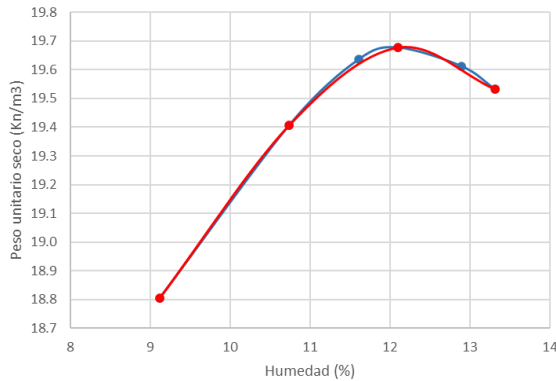


Figura 11

Comparación de curva de compactación recopilada en base de datos y curva de compactación con nuevas humedades en MGM2



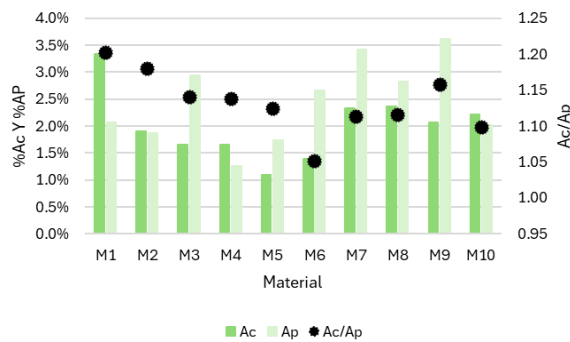
4.2 Análisis de imágenes 3D

Para el análisis en imágenes 3D se realizó una comparación entre los resultados del coeficiente de variación del área corregida y del área plana. Dicho coeficiente se calculó a partir de la desviación estándar de cada réplica, seguida del cálculo individual del coeficiente de variación y, finalmente, del promedio de estos valores, representados en la Figura 12.

El coeficiente no supera el 4% evidenciando la similitud en el comportamiento de cada material.

Figura 12

Análisis de variación de los valores obtenidos en Área corregida y Área plana



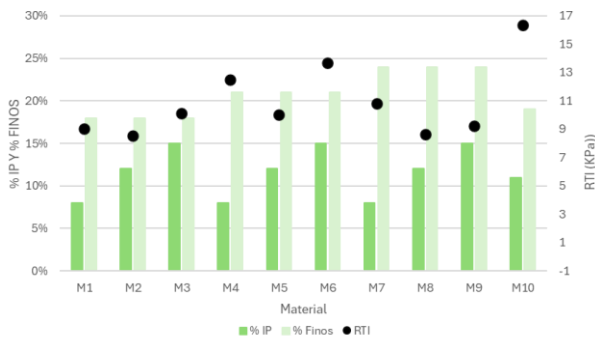
Nota: Ac: Variación área corregida, Ap: Variación área plana, Ac/Ap: área corregida/área plana

4.3 Estimación del índice CT de MGM partiendo del ensayo de tracción indirecta.

En la Figura 13 se presenta la comparación de la RTI para el conjunto de MGM analizados en función del índice plástico (IP) y del porcentaje de finos. En el primer grupo (M1-M2-M3), que posee el mismo porcentaje de finos (18%) y diferentes valores de IP, no se evidencia una influencia marcada del IP sobre la RTI. De manera similar, en los otros dos conjuntos (M4-M5-M6 y M7-M8-M9) se observa de forma consistente que la menor respuesta corresponde al IP intermedio de 12%. En promedio, los tres conjuntos indican que la mejor respuesta de RTI se alcanza en las muestras con un porcentaje de finos intermedio del 21% (M4-M5-M6), mientras que las menores respuestas se registran en los grupos con 18% y 24% de finos. Finalmente, se destaca el caso del M10, que presenta el mejor desempeño al integrar un bajo contenido de finos, un índice de plasticidad medio y la mayor resistencia a la tracción indirecta.

Figura 13

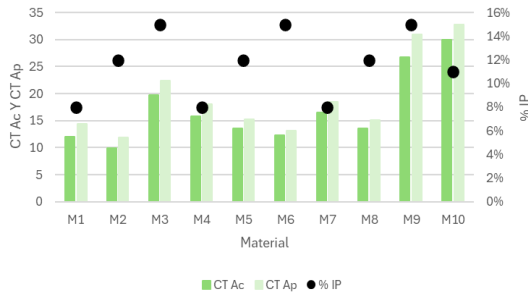
Comparación de la resistencia a la tracción indirecta con núcleo reforzado teniendo en cuenta el índice de plasticidad y el porcentaje de finos



En la Figura 14 y la Figura 15 luego de tener como base Análisis de datos de ensayos de caracterización mecánica bajo carga estática de materiales granulares marginales (MGM) se observa que en los dos conjuntos de datos analizados no se evidencia una tendencia definida, lo cual se atribuye a la alta variabilidad de los resultados. Esto implica que, aunque el porcentaje de finos y el índice de plasticidad permanecen constantes, la respuesta mecánica de las probetas difiere de manera significativa en cada caso.

Figura 14

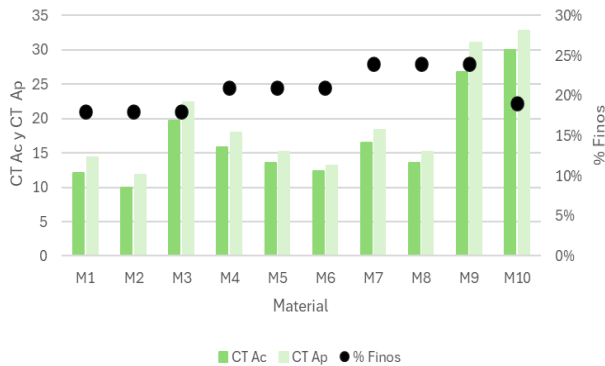
Comparación valores de índice A_c y A_p en resistencia a la tracción indirecta con núcleo reforzado frente a valores de índice de plasticidad.



Nota: CT Ac: Índice de agrietamiento en área corregida, CT Ap: Índice de agrietamiento en área plana.

Figura 15

Comparación valores de índice Ac y Ap en resistencia a la tracción indirecta con núcleo reforzado frente a valores de porcentaje de finos.

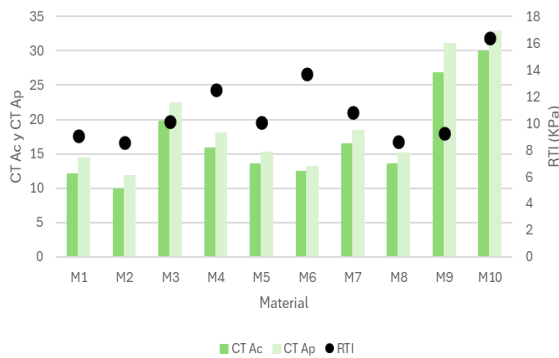


En la Figura 16 se observa que los materiales M3, M9 y M10 alcanzan los valores más elevados de CT, por el contrario, mientras que M1, M2, M5 y M6 presentan los valores más bajos (10-15), asociados a un comportamiento más estable. En cuanto al índice de resistencia a la tracción indirecta (RTI), se observa una variación entre 7 y 16 sin una correlación estricta con el

CT; por ejemplo, M3 y M10 combinan alta resistencia y susceptibilidad al agrietamiento, mientras que M5 y M6 exhiben bajos valores en ambos parámetros. Estos resultados sugieren que la relación entre resistencia y fisuración no es lineal y que el desempeño estructural de los materiales depende de la interacción simultánea de ambas variables.

Figura 16

Comparación valores de índice Ac y Ap en resistencia a la tracción indirecta con núcleo reforzado frente a valores de resistencia a la tracción indirecta



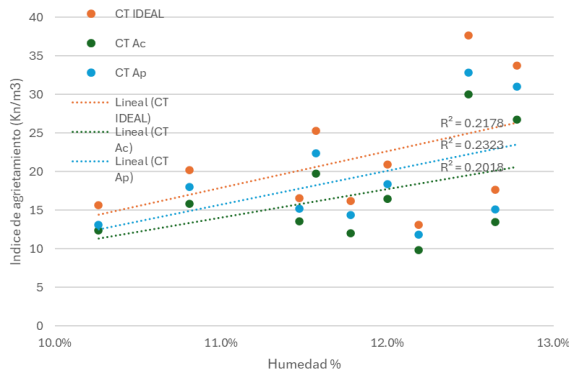
4.4 Análisis del índice de agrietamiento en resistencia a la tracción indirecta con respecto a factores de porcentaje de humedad, porcentaje de saturación y la relación de vacíos.

En la Figura 17 los valores de R^2 obtenidos ($<0,3$) evidencian que la humedad explica menos del 25% de la variabilidad del índice de agrietamiento CT, lo que indica que este fenómeno depende también de otros factores. La gráfica muestra la relación entre el índice CT y la humedad (%) bajo tres condiciones: CT IDEAL, CT Ac y CT Ap. En todos los casos, las tendencias presentan pendiente positiva, lo que confirma que a mayor humedad se incrementa el riesgo de agrietamiento. La condición CT IDEAL presenta los valores más altos (hasta 40) y la mayor

pendiente, siendo la más sensible a los cambios de humedad. En contraste, CT Ac registra los valores más bajos y con mayor dispersión, lo que refleja una respuesta inestable frente a la variación de humedad. Finalmente, CT Ap se posiciona en un rango intermedio, tanto en magnitud como en sensibilidad, entre las otras dos condiciones.

Figura 17

Comportamiento valores de índice CT-Ideal, CT Ac, CT Ap en función de la humedad

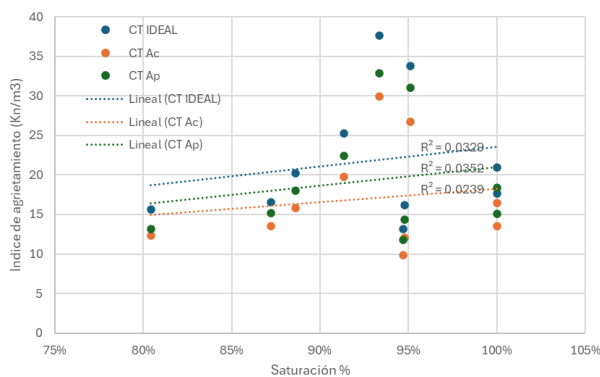


En la Figura 18 el análisis del índice de agrietamiento (CT) en función del grado de saturación evidencia que, aunque la tendencia general es un incremento del CT al aumentar la saturación, los bajos valores de R^2 (<0.01) confirman que esta variable por sí sola no explica de manera significativa el fenómeno. Los resultados muestran que el agrietamiento alcanza sus valores máximos en torno al 95% de saturación, disminuyendo tanto en condiciones de baja como de alta saturación, lo que indica una mayor susceptibilidad a la fisuración cerca de la saturación óptima. Entre las condiciones evaluadas, CT Ac se comporta como la más estable, mientras que

CT IDEAL y CT Ap presentan mayor dispersión y picos de agrietamiento, reflejando una respuesta más crítica frente a la variación de humedad.

Figura 18

Comportamiento valores de índice CT-Ideal, CT Ac, CT Ap en función de la saturación

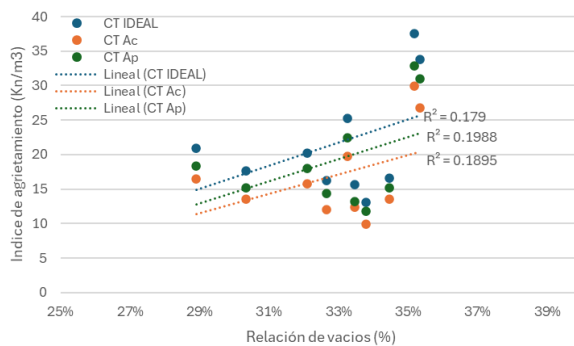


La Figura 19 evidencia que el índice de agrietamiento (CT) presenta una variabilidad marcada entre las muestras, con valores mínimos cercanos a 10 y máximos superiores a 35, alcanzando los picos más altos en los MGM9 y MGM10. Por su parte, la relación de vacíos mantiene un comportamiento relativamente estable alrededor del 32 al 35%, salvo una ligera caída en el MGM 7, lo que indica que este parámetro no muestra una dependencia directa con las variaciones del índice de agrietamiento. Esta discrepancia sugiere que el agrietamiento no responde únicamente a la condición volumétrica del material (vacíos), sino que intervienen factores adicionales como la granulometría, la distribución de humedad y la resistencia a la compactación. En consecuencia, la relación de vacíos podría considerarse un parámetro de control

secundario frente al agrietamiento, mientras que los picos observados señalan la influencia de condiciones locales del material que intensifican la susceptibilidad a fisuración.

Figura 19

Comportamiento valores de índice CT-Ideal, CT Ac, CT Ap en función de la relación de vacíos



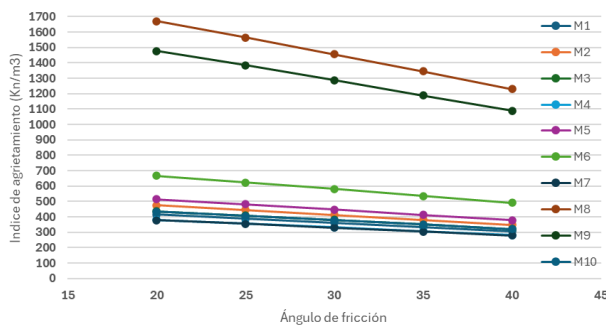
4.5 Efecto de los parámetros de fricción según el ángulo sobre la variación del índice de agrietamiento en compresión confinada.

El análisis de la Figura 20 se evidencia que el índice de agrietamiento disminuye conforme aumenta el ángulo de fricción de la superficie de falla, lo cual sugiere que a bajos ángulos se favorece una mayor generación de grietas, mientras que a valores más altos la falla tiende a presentarse de manera más frágil y con menor propagación previa; adicionalmente, se identifican tres niveles de comportamiento (alto, medio y bajo) que representan diferentes grados de susceptibilidad al agrietamiento. Para obtener un valor de referencia que permita comparar el comportamiento del material entre condiciones críticas de mayor agrietamiento y condiciones

estables de menor fisuración, facilitando un análisis equilibrado y representativo, por tal motivo se escoge el ángulo de 30.

Figura 20

Relación del ángulo de fricción al índice de agrietamiento en compresión inconfiada (CT-CI)

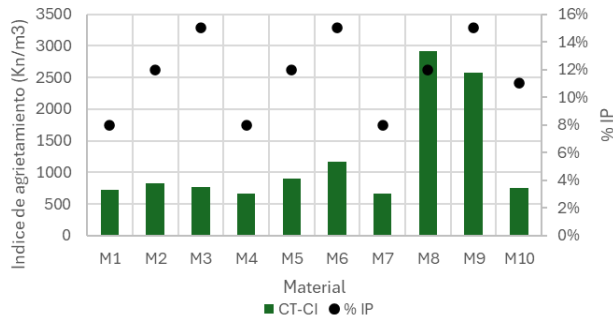


4.6 Estimación del índice CT de MGM partiendo del ensayo de compresión inconfiada.

En la Figura 21 nos evidencia el incremento notable en los materiales M8 y M9, que alcanzan valores cercanos a 3000 y 2500 Kn/m3 respectivamente, evidenciando una mayor susceptibilidad a la fisuración bajo condiciones ideales.

Figura 21

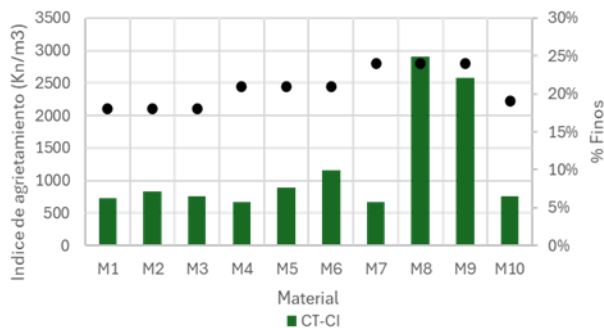
Comparación valores de índice de agrietamiento en compresión inconfiada (CT-CI) con núcleo reforzado frente a valores de índice de plasticidad



En la Figura 22 el M8 y M9 registran un incremento significativo superiores a 2500 Kn/m³ lo que evidencia una mayor susceptibilidad a la fisuración. En contraste, el contenido de finos se mantiene en un rango relativamente estrecho, entre el 18% y 25%, sin variaciones abruptas. esto sugiere que el porcentaje de finos no explica directamente los picos observados en el índice de agrietamiento, por lo que la respuesta mecánica de los materiales estaría influenciada por otros factores estructurales y de composición.

Figura 22

Comparación valores índice de agrietamiento en compresión inconfiada (CT-CI) con núcleo reforzado frente al porcentaje de finos

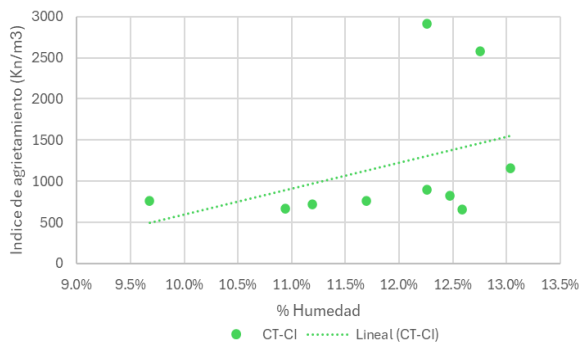


4.7 Análisis del índice de agrietamiento en compresión inconfiada con respecto a factores de porcentaje de humedad, porcentaje de saturación y la relación de vacíos.

En la Figura 23 se muestra que la humedad se mantiene relativamente estable en un rango de 10 al 13 %, con una tendencia lineal prácticamente horizontal, el CT presenta una marcada variabilidad, alcanzando valores entre 500 y 3000 kN/m³.

Figura 23

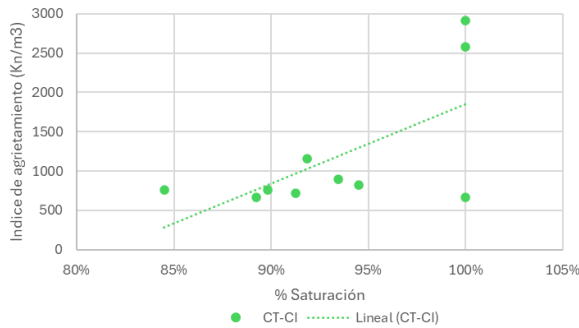
Comportamiento valores de índice CT-CI en función de la humedad



En la Figura 24 la relación entre el índice de agrietamiento (CT IDEAL) y el grado de saturación (Sr) muestra que, a medida que aumenta la saturación, el CT IDEAL incrementa progresivamente hasta alcanzar un valor máximo cercano a 3200 kN/m³ en condiciones próximas al 100 % de saturación. Posteriormente, se observa un descenso abrupto, lo que evidencia la existencia de un límite crítico en el que el exceso de agua reduce la resistencia del material y compromete su estabilidad estructural.

Figura 24

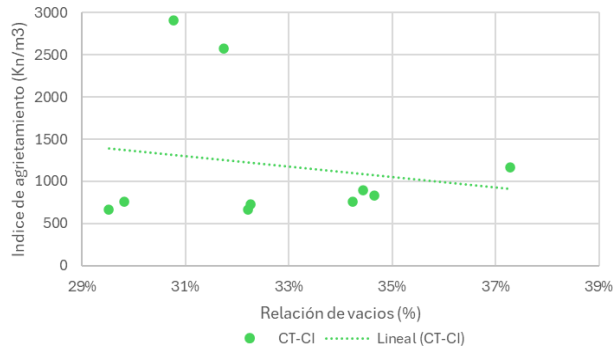
Comportamiento valores de índice CT-CI en función de la saturación



En la Figura 25 el cambio abrupto en el índice de agrietamiento sugiere que, bajo determinadas condiciones de vacíos, el material granular alcanza una mayor resistencia frente a la fisuración, aunque posteriormente pierde estabilidad estructural. La relación de vacíos (e) se mantiene relativamente constante entre 28 % al 35 %, con ligeras fluctuaciones y una tendencia decreciente en los valores finales, evidenciada en la recta de tendencia lineal. De lo anterior se deduce que a menor relación de vacíos corresponde un mayor índice de agrietamiento, lo cual concuerda con la teoría del comportamiento de suelos granulares, donde la reducción de vacíos, asociada a una mayor compactación, produce un material más denso y con mayor resistencia a la fisuración.

Figura 25

Comportamiento valores de índice CT-CI en función de la relación de vacíos

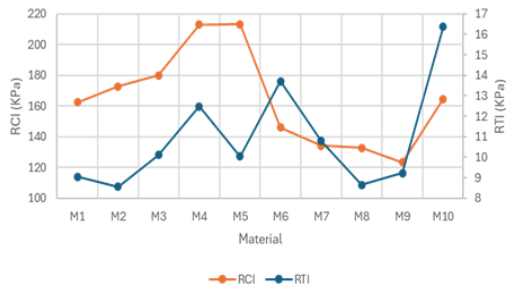


4.8 CT-TI en comparación con CT-CI.

Se observa en la Figura 26 que el RCI exhibe fluctuaciones marcadas, con valores máximos en M4, M6 y M10, lo que indica diferencias significativas en la resistencia relativa entre materiales. En contraste, el RTI presenta una tendencia ascendente hasta M5, alcanzando su valor máximo, seguido de una disminución progresiva hasta M9 y un repunte final en M10. Esta divergencia entre ambos parámetros sugiere que la resistencia relativa y el índice de tenacidad no evolucionan de forma lineal ni directamente proporcional, evidenciando un comportamiento dependiente de la heterogeneidad propia de los materiales evaluados.

Figura 26

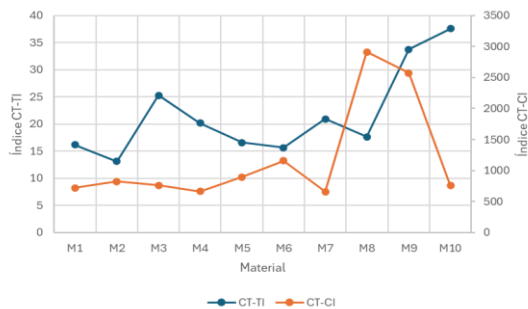
Comparación valores de resistencia a la tracción indirecta (RTI) con núcleo reforzado frente a la resistencia a la compresión inconfiada (RCI)



La Figura 27 Se advierte que el comportamiento del CT-TI (eje izquierdo) permanece relativamente constante en la mayoría de los materiales, con valores entre 10 y 25, a excepción de M8 y M9, en los cuales se evidencian aumentos considerables que superan los 30. En cambio, el CT-CI (eje derecho) muestra una variabilidad más amplia, con registros que van desde cerca de 500 Kn/m³ hasta por encima de 3000 Kn/m³, resaltando picos destacados en M8 y M9, lo que refleja una mayor propensión a la concentración de esfuerzos en estos suelos. Esta diferencia en los patrones de comportamiento indica que, aunque ambos índices guardan relación con la respuesta mecánica de los materiales, el CT-CI manifiesta una sensibilidad más elevada a las propiedades internas de los mismos, evidenciando una respuesta más heterogénea frente al CT-TI.

Figura 27

Comparación valores índice de agrietamiento en tracción indirecta (CT-TI) con núcleo reforzado frente al índice de agrietamiento compresión inconfiada (CT-CI)



5. Conclusiones

La auditoría realizada sobre la base de datos de los resultados experimentales de respuesta mecánica de los materiales MGM 1 al 10 permitió comprobar que la información es consistente y confiable. Se evidenció que los valores registrados se encuentran dentro de un intervalo de tolerancia aceptable del 10%, lo que asegura que los datos cumplen con los criterios de precisión y validez necesarios para sustentar los análisis y conclusiones del estudio.

Los resultados del estudio evidencian que el M10 presenta el mejor desempeño ya que tiene un índice de agrietamiento alto lo que nos dará un material menos propenso a la fisuración. Por su parte, los materiales M2, M5 y M8 presentaron los valores más bajos del índice de agrietamiento, lo cual se asocia con la presencia de un índice de plasticidad intermedio

La disminución de la relación de vacíos en los materiales granulares indica que una mayor compactación genera un material más denso y resistente a la fisuración, aunque con el riesgo de perder estabilidad estructural bajo ciertas condiciones.

Se puede evidenciar que la saturación alrededor del 93% constituye el punto menos crítico ya que se registran los valores máximos de índice de agrietamiento. No obstante, el coeficiente de determinación muy bajo ($R^2 < 0.01$) demuestra que el grado de saturación no es el único factor que controla el índice de agrietamiento, sino que intervienen variables adicionales del material.

6. Recomendaciones

Para investigaciones futuras en curvas de compactación se recomienda realizar un estudio más amplio de probetas para poder obtener valores de húmeda óptima menos variables y lograr poca variabilidad.

Se recomienda, siguiendo la metodología empleada en [9], incorporar el análisis del área corregida en 3D, dado que los resultados obtenidos muestran una mayor proximidad con las condiciones reales del material. Esta corrección permite minimizar los sesgos derivados de simplificaciones bidimensionales y proporciona un marco más robusto para la interpretación de los datos. Por lo anterior, el área corregida 3D se adoptará como referencia principal en las comparaciones presentadas en las tablas posteriores, asegurando una evaluación más representativa y confiable de los parámetros estudiados.

Referencias Bibliográficas

- [1] MINISTERIO DE TRANSPORTE, “INFORME DE RENDENCION DE CUENTAS SECTOR TRANSPORTE 2022,” MINISTERIO DE TRANSPORTE.
- [2] J. D. Cabrales Ospino and E. Y. Bautista Bautista, “Evaluación Mecánica de Materiales Granulares Marginales Para Uso en Capas de Subbase Granular en Vías de Bajo Volumen de Tránsito (MGM 1-2-3-4),” <https://noesis.uis.edu.co/items/21f833b9-d759-416e-839d-6a8d5c3d8bb7>.
- [3] INVIAS, “AFIRMADOS SUBBASES Y BASES,” *Art.320*, 2013.
- [4] ASTM, “Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature,” 05 ABRIL 2019.
- [5] AMinpro, “Ensayo de compresión uniaxial (ucs),” AMINPRO METALLURGICAL SERVICES.
- [6] E. Alvarez and A. Paredes, “EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE MUESTRAS COMPACTADAS DE MATERIALES GRANULARES MARGINALES DE SUBBASE GRANULAR (MGM-1-2-3-4),” *Revista UIS Ingenierías*.
- [7] J. Bustamante and A. Infante, “EVALUACIÓN PRELIMINAR DE MATERIALES GRANULARES MARGINALES BAJO CARGAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS Y UN PROCESO DE RECOMPACTACIÓN EN MUESTRAS IDENTIFICADAS COMO MGM-1, MGM-2, Y MGM-3,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 21, 2022.
- [8] D. Garzón and C. Arciniegas, “EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA DE MUESTRAS DE MATERIALES

GRANULARES MARGINALES DE SUBBASE GRANULAR COMPACTADAS CON DISTRIBUCIÓN ALEATORIA (MGM-1-2-3-4-5-6),” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 21, 2024.

- [9] S. Joya, “Análisis de datos de ensayos de caracterización mecánica bajo carga estática de materiales granulares marginales (MGMs),” *Revista UIS Ingenierías*, 2022.
- [10] J. Méndez and M. García, “EVALUACIÓN PRELIMINAR DE MATERIALES GRANULARES MARGINALES IDENTIFICADAS COMO MGM-4, MGM-5, Y MGM-6 BAJO CARGAS ESTÁTICAS, DINÁMICAS, Y UN PROCESO DE RE-COMPACTACIÓN,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 21, 2022.
- [11] S. Serrano and D. Agudelo, “ANÁLISIS PRELIMINAR DEL IMPACTO DE LA DISTRIBUCIÓN ALEATORIA DE PARTÍCULAS EN EL PROCESO DE COMPACTACIÓN SOBRE EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIAL GRANULAR MARGINAL (MGM-7, MGM-8, MGM-9 Y MGM-10) Y CONVENCIONAL (SBG-C0 Y SBG-C1),” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 21, 2022.
- [12] D. Rodríguez and D. Anaya, “Evaluación del comportamiento mecánico de materiales granulares convencionales de subbase y marginales identificados como MGM-9 y MGM-10,” *Revista UIS Ingenierías*.
- [13] Y. Orduz and Y. Torres, “EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE MUESTRAS COMPACTADAS DE MATERIALES GRANULARES MARGINALES DE SUBBASE GRANULAR (MGM-5-6-7-8),” *Revista UIS Ingenierías*.