

ESTADO DEL ARTE SOBRE LA EVALUACIÓN DE LA SUCCIÓN EN MATERIALES
GRANULARES Y SU INFLUENCIA EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE
PAVIMENTO

Diego Andrés Madero Vesga y Jhessen Aldemar Villa Ramos

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Alex Eduardo Álvarez Lugo

Ph.D. en Ingeniería Civil

Codirector

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Ph.D. en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Hoy queremos tomar un momento para dedicar unas palabras a cada una de nuestras amadas familias, agradecemos infinitamente su apoyo constante, sus palabras de aliento y su amor incondicional. Sin ustedes, este logro hubiera sido mucho más difícil de obtener. Cada uno de ustedes han sido nuestra roca, nuestro hombro en el que apoyarnos y nuestra motivación para seguir adelante.

A Yoleny Ramos Romero y Arlet Madero Gómez, queremos dedicarles este gran triunfo. Aunque ya no estén físicamente presente, sabemos que sus espíritus perduran y sigue impulsándonos hacia adelante. Cada paso que hemos dado en este proyecto ha sido motivado por ese amor incondicional y el inmenso deseo de vernos triunfar, nos hubiera gustado poder compartir este momento con ustedes y escuchar sus palabras de aliento, pero sabemos que están mirando desde algún lugar allá arriba, llenándonos de fuerza desde el cielo.

Finalmente, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a Alex Eduardo Alvarez Lugo y a Vladimir Ernesto Merchán Jaimes por su orientación experta y apoyo constante a lo largo de este arduo pero gratificante viaje académico. Su dedicación y conocimientos han sido fundamentales para el desarrollo y éxito de este trabajo de grado. Agradecemos sinceramente a todos aquellos que han sido parte de este proceso, contribuyendo de diversas maneras a la culminación de este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Objetivos	11
1.1 Objetivos Específicos.....	11
2. Metodología	11
3. Conceptos Básicos	13
3.1 Succión.....	13
3.2 Curva Característica de Retención de Agua	15
4. Succión y Estructuras de Pavimento.....	24
4.1 Los Efectos de la Succión sobre la Respuesta Mecánica.....	32
4.2 Influencia de la Técnica de Compactación sobre las Curvas de Retención de Agua	44
4.3 Influencia de Ciclos de Humedecimiento y Secado en las Swrc para Materiales Compactados Granulares	49
4.4 Influencia de la Succión Sobre el Módulo Elástico	52
5. Conclusiones	55
Referencias Bibliográficas	58

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Definición de succión	13
Tabla 2 Métodos comúnmente usados para la determinación de la succión	18

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Representación de los conceptos de succiones matricial, osmótica y total.....	15
Figura 2 Curva característica de succión de suelo.....	16
Figura 3 Curvas características para suelos con diferentes granumelotria	17
Figura 4 Curva de compactación Proctor que muestra los contornos de succión.....	19
Figura 5 SWCC para material de desecho de C&D en diferentes niveles de compactación ajustado usando el modelo de Fredlund y Xing (1994)	21
Figura 6 Curva de retención obtenida mediante el potenciómetro	22
Figura 7 Curvas características de algunos materiales.	24
Figura 8 Curva de retención SWCC ajustado para agregado de concreto reciclado (RCA) de RCO	26
Figura 9 Curva de retención SWCC ajustada para el material de agradado de concreto reciclado (RCA) de ARR.....	26
Figura 10 La curva característica suelo-agua (SWCC) de las mezclas de agregados de granulación	28
Figura 11 Esquema del aparato de columna de agua colgante	29
Figura 12 Curva de retención SWCC ajustado para los materiales reciclados provenientes de RCO	30
Figura 13 Curva de retención SWCC ajustado para los materiales RAA y el material virgen ...	31
Figura 14 La vista esquemática del aparato.....	33
Figura 15 La deformación axial permanente vs. la succión matricial	34

Figura 16 La tensión axial permanente final vs. MCR	35
Figura 17 Valores de módulo resiliente a diferentes niveles de compactación y niveles de succión	37
Figura 18 Influencia de la succión matricial inicial sobre el módulo resiliente y la deformación permanente de los materiales	38
Figura 19 Esquema del aparato de columna colgante.....	40
Figura 20 Curvas de características del agua medidas y predichas por varios modelos: a Cuarquita roja de Bakel, b Cuarquita negra de Bakel, c Basalto de Diack, d Caliza de Bandia	41
Figura 21 Módulo resiliente en función del grado de saturación.....	43
Figura 22 Módulo resiliente versus succión matricial en escala semilogarítmica.....	43
Figura 23 Alteración en PSD de CB y RCA después de la compactación.	46
Figura 24 SWCC previsto para (a) CB modificado, (b) CB estático, (c) RCA modificado, (d) RCA estático	47
Figura 25 Módulo resiliente predictivo vs. medido para todos los especímenes usando (a) AASHTO (2002), (b) Yang et al. Alabama. (2005), (c) Liang et al. (2008) y (d) modelos de Azam y Cameron (2013)	48
Figura 26 Fenómeno de histéresis hidráulica.....	49
Figura 27 Variación de la deformación volumétrica con la densidad seca y el contenido de agua	52
Figura 28 Variaciones del esfuerzo desviador máximo y el módulo de Young estático con succión matricial inicial para mezclas al 20 % a una presión de confinamiento de 75 kPa	53
Figura 29 Módulo de Young frente a la tensión normal media	54

Resumen

Título: Estado del arte sobre la evaluación de la succión en materiales granulares y su influencia en el análisis y diseño de estructuras de pavimento *

Autor: Diego Andrés Madero Vesga y Jhessen Aldemar Villa Ramos **

Palabras Clave: Succión, Materiales granulares, Estructuras de pavimento, Compactación

Descripción: En el presente artículo se realiza un estado del arte sobre la influencia del efecto de succión en estructuras de pavimento y cómo esto afecta la rigidez de los materiales granulares. En este sentido, se revisó exhaustivamente la literatura existente en el período 2011-2023, utilizando la técnica investigativa de la revisión sistemática de documentos como investigaciones, artículos científicos, y tesis de grado. De esta manera, este estudio compila y analiza una amplia gama de temas de gran relevancia en este contexto. Se analiza en profundidad el fenómeno de succión, así como la curva característica de retención de agua, la energía de compactación, la influencia de ciclos de humedecimiento y secado en las Curvas Típicas de Retención de Agua en el Suelo (SWRC) para materiales compactados granulares. Estos aspectos proporcionan una visión integral de los factores que inciden en las propiedades de los materiales granulares de los pavimentos, y se determina la importancia de la succión en el análisis y diseño de estas estructuras; debido a factores determinantes como la resistencia al corte, la capacidad portante, la rigidez y la deformación, al igual que incide en la respuesta del suelo a cargas estáticas y cíclicas, lo que afecta el desempeño de las estructuras de pavimento en el tiempo.

* Trabajo de Grado

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

Abstract

Title: State of the art on the evaluation of suction in granular materials and its influence on the analysis and design of pavement structures*

Author(s): Diego Andrés Madero Vesga and Jhessen Aldemar Villa Ramos **

Key Words: Suction, Granular materials, Pavement structures, Compaction

Description: This article presents a state of the art on the influence of the suction effect on pavement structures and how this affects the stiffness of granular materials. In this sense, the existing literature in the period 2011-2023 was exhaustively reviewed, using the research technique of systematic review of documents such as research, scientific articles, and degree theses. In this way, this study compiles and analyses a wide range of topics of great relevance in this context. The suction phenomenon is analyzed in depth, as well as the characteristic water retention curve, the compaction energy, the influence of wetting and drying cycles on the Typical Soil Water Retention Curves (SWRC) for granular compacted materials. These aspects provide a comprehensive view of the factors that affect the properties of granular pavement materials and determine the importance of suction in the analysis and design of these structures; due to determining factors such as shear strength, bearing capacity, stiffness and deformation, as well as influencing the response of the soil to static and cyclic loads, which affects the performance of pavement structures over time.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. Civil Engineering School. Civil Engineering. Director: Alex Eduardo Álvarez Lugo. Ph.D. in Civil Engineering. Codirector: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Ph.D. in Civil Engineering

Introducción

La construcción de vías es un elemento influyente en el desarrollo de un país, es por ello que al momento de realizar dichas obras de ingeniería se espera obtener estabilidad y durabilidad de ellas; por lo que se requiere la realización de estudios acorde a las necesidades de cada país para que se pueda alcanzar este objetivo.

Dentro de todos los estudios requeridos para una óptima construcción de las vías, son de valor los relacionados con la estructura de pavimento, definidas por Montejo Fonseca (2002), como “aquella que soporta cargas vehiculares y de tráfico catalogadas como dinámicas, conformadas por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, diseñadas y construidas de manera técnica empleando materiales apropiados y debidamente compactados”.

Por ejemplo, Bañón Blazquez & Beviá García (2000), investigaron el comportamiento sobre las capas granulares cuya función principal es la absorción y distribución de los esfuerzos generados por las cargas de tráfico, para que no ocurran deformaciones y la preservación del pavimento y del agua filtrada en el terreno, contribuyendo a la durabilidad de la carretera.

Uno de los aspectos que se ha comenzado a estudiar recientemente, involucra estudiar el componente hidráulico de estos materiales compactados y su influencia en el comportamiento mecánico. En este sentido, la succión total o matricial surge como una variable hidráulica significativa para caracterizar los materiales desde esta perspectiva y su análisis ha permitido establecer las bases del entendimiento de su influencia en el comportamiento mecánico.

De acuerdo con Colmenares Porras (2021), dichas estructuras se encuentran conformadas por capas intermedias de base y subbase, las cuales pueden estar constituidas por materiales triturados, arenas y materiales finos, cumpliendo con la granulometría específica en cada una de

las capas. Cada capa intermedia conforma un elemento estructural importante, debido a que los pavimentos deben su adecuado comportamiento, a la calidad de sus materiales y al espesor de estas capas. Su proceso de compactación involucra un estado de saturación inicial parcialmente saturado y, por tanto, estos materiales nacen con un valor de succión inicial, que puede cambiar si las condiciones ambientales y las condiciones de drenaje no son lo suficientemente efectivas.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, en el presente estado de arte se realiza una compilación de diversos estudios de ingeniería que se han desarrollado a nivel mundial asociados al análisis de la succión, su caracterización e influencia en el comportamiento mecánico de materiales granulares conformados para estructuras de pavimento.

1. Objetivos

Elaborar un estado del arte sobre la caracterización e influencia de la succión en el comportamiento esfuerzo – deformación de materiales granulares compactado de pavimento, para consolidar información de que contribuya a su aplicación y a nuevas investigaciones.

1.1 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica relacionada con la caracterización de la succión en materiales compactados para pavimentos.
- Realizar una revisión bibliográfica sobre la influencia de la succión en parámetros de respuesta elástico -plástica de materiales granulares compactados para pavimentos.
- Revisar los modelos constitutivos utilizados para estudiar desde el punto de vista numérico la influencia de la succión en el comportamiento esfuerzo deformación de estructuras de pavimento.

2. Metodología

El desarrollo metodológico del estudio fue tipo descriptivo-analítico, permitiendo establecer de modo sistemático y crítico las principales características, variables, argumentos y conceptos, desde el acercamiento y observación rigurosa de los diferentes aspectos que componen el escenario del efecto de succión y su incidencia y evaluación frente a los materiales granulares de las estructuras de pavimento.

Para esto, se realizó mediante la revisión documental, de forma analítica de fuentes formales y diferentes bases de datos, la cual consiste en analizar y evaluar documentos relevantes para la investigación en cuestión. El periodo de análisis se limitó a los años comprendidos entre 2011 y 2023.

El trabajo investigativo se desarrolló en tres etapas:

- Recopilación de la información: En esta etapa se involucró la consulta de buscadores como Google académico, Scielo, Scopus, WOS, y Biblioshiny., con el objetivo de encontrar documentos relevantes como investigaciones, artículos científicos, tesis de grado, revistas, entre otros.
- Clasificación de la información: La clasificación se basó en los objetivos específicos propuestos para el desarrollo del estudio, lo que permitió estructurar el trabajo investigativo. En el primer filtro de análisis se seleccionaron treinta (30) estudios relacionados con la temática en particular, los cuales se evaluaron detalladamente para determinar su relevancia en relación con el tema de estudio
- Análisis de la información: Se realizó un análisis detallado en relación con temas específicos para abordar en el estudio, como la succión, curva característica de retención de agua, energía de compactación, índice de plasticidad en materiales compactados vs. succión, influencia de ciclos de humedecimiento y secado en las SWRC para materiales compactados granulares, y datos experimentales. Este análisis detallado de los artículos seleccionados garantizó que se utilicen los resultados más relevantes y significativos para las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

3. Conceptos Básicos

Entre los conceptos básicos para la comprensión de la evaluación de la succión en materiales granulares y su influencia en el análisis y diseño de estructuras de pavimento, se tiene en cuenta aspectos que se presentan a continuación.

3.1 Succión

La succión en materiales granulares es un fenómeno complejo que ha sido objeto de estudio de diversos investigadores. En la tabla 1 se muestran algunas definiciones que se le ha dado en el ámbito de la ingeniería civil.

Tabla 1

Definición de succión

Autor	Definición
Buckingham, (1907)	Propiedad física presente de los suelos no saturados. La cual expone el potencial con el cual un suelo adsorbe y retiene agua en los poros, dependiendo de su estructura y la humedad determinada que contiene.
Lade y Yamamuro, (1997)	La medida de la energía necesaria para separar el agua de los granos del material.
Tindall y O'Loughlin, (2002)	Es una medida de la tensión efectiva en los materiales granulares, que afecta su capacidad de soporte y resistencia.
Fuentes et al. (2020)	La capacidad del material de retener agua en su interior debido a la tensión superficial y a la energía capilar.

Nota. Buckingham (1907); Lade & Yamamuro (1997); O'Loughlin, Kemner, & Burris (2003); Fuentes, et al., (2020).

Alternativamente, algunos autores han establecido una definición de la succión incluyendo un contexto termodinámico. De acuerdo con Meza Ochoa (2012), la energía necesaria para remover el agua del suelo o succión total tiene dos componentes, una asociada al efecto de la capilaridad denominada succión matricial (Ψ_m) y una componente debida a la presencia de sales disueltas en el agua, llamada succión osmótica (π). Según lo anterior, la succión total puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

Succión total

$$St = Sm + Sos \quad (1)$$

La Figura 1 representa la conceptualización expuesta. Al respecto, se puede expresar que el valor de la succión matricial (S_m) depende del tamaño y distribución de las partículas, del tamaño de los poros y del grado de saturación (Meza Ochoa, 2012). Cuando el grado de saturación disminuye, el menisco se retrae en espacios de poros pequeños, el radio de curvatura del menisco se reduce y de esta manera, la succión matricial se incrementa. La succión osmótica (S_{os}) es la componente de la succión asociada a la presencia de sales disueltas en el agua. La presencia de sales disueltas reduce la presión de vapor en el espacio que se encuentra por encima de la interfase agua-aire, por lo tanto, se requiere de una mayor energía para remover una molécula de agua. Esta energía adicional requerida, es la succión osmótica, y es independiente de los efectos por capilaridad.

Figura 1

Representación de los conceptos de succiones matricial, osmótica y total



Nota. Tomado de *Geotecnia en suelos no saturados* por Alfaro Soto, 2008.

3.2 Curva Característica de Retención de Agua

La curva característica de succión, o de retención de agua o curva de retención de humedad del suelo, se refiere a la relación dada entre el contenido de humedad y la succión en un suelo. La cantidad de agua en el suelo generalmente se cuantifica en términos de humedad gravimétrica (w), grado de saturación (S), o humedad volumétrica. Este concepto es muy importante para la mecánica de suelos y la práctica geotécnica, aquí toma relevancia el término de succión matricial, puesto que la mayoría de los problemas ingenieriles son el resultado de cambios ambientales (succión matricial) (Meza, 2012).

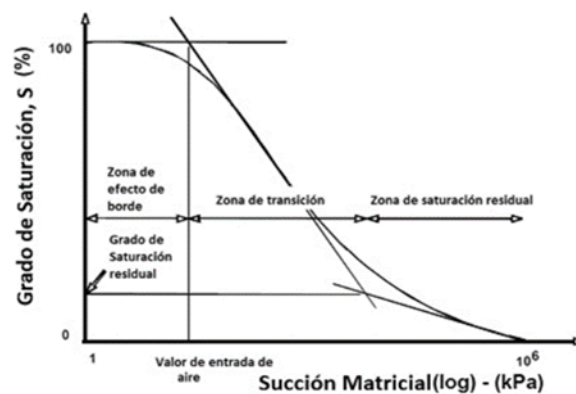
La curva característica de retención del agua (SWRC- por su acrónimo en inglés, a partir de Soil Water Retention Curve) es la representación gráfica (ver Figura 2) generada a partir de la relación entre el grado de saturación que posee la masa de suelo y la succión total que esta presenta; el esfuerzo generado por el suelo en la retención del agua está relacionado con la composición

granulométrica y la estructura de cada suelo y fue caracterizada por White et al. (1970) (como se citó en Fredlund D. D.,2000).

Como se puede observar en la Figura 2, conceptualmente para grados de saturación cercanos al 100%, el agua puede sostener valores de succión mayores que cero, pero con órdenes de magnitud bajos (Zona de efecto de borde). A medida que se reduce el grado de saturación, hay un cambio de comportamiento y el aire comienza a entrar en los poros de manera efectiva. En este punto, se define el valor de entrada de aire, como la succión requerida para que el aire entre a los poros más grandes del suelo y se inicia la desaturación o pérdida de la saturación. En este intervalo, se inicia la zona de transición, en la cual existe una interfase aire-agua, pero el agua se encuentra de manera continua. Finalmente, al seguir disminuyendo el contenido de agua dentro de los poros, se llega al grado de saturación residual, donde se inicia la zona desaturación residual. El grado de saturación residual corresponde al contenido de agua para el cual, la fase líquida deja de ser continua y los poros se encuentran ocupados principalmente por aire.

Figura 2

Curva característica de succión de suelo



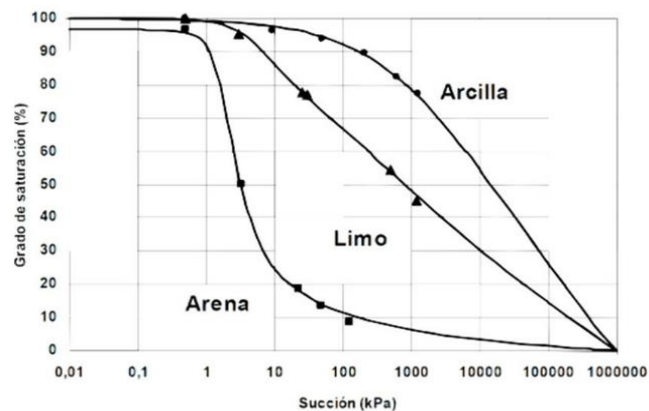
Nota. Tomado de *Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria* por Meza Ochoa, 2012.

De acuerdo a Lu y Likos (2004), la relación del contenido de agua-succión y, por tanto, la forma de la SWCC, se ve influenciada por la distribución de los tamaños de poros, la distribución de tamaños de partículas, la densidad, el contenido de arcilla y la mineralogía del suelo.

La Figura 3, muestra las curvas características de succión, representativas de arenas, limos y arcillas, donde se observa la forma de la curva, asociada al tipo de suelo, que indirectamente indica la influencia del tamaño de partículas y el tamaño de poros.

Figura 3

Curvas características para suelos con diferentes granumelotria



Nota Tomado de Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos por Pérez, 2017.

El valor de entrada de aire de los suelos gruesos es menor que para los suelos finos, debido a la presencia de poros de mayor tamaño, predominio de la capilaridad en la succión matricial y menor requerimiento de succión para iniciar la desaturación del suelo.

En ese orden de ideas, para medir la SWCC según Fredlund et al. (2002), se puede realizar de dos formas, por medio de mediciones directas en el laboratorio o indirectas mediante estimaciones de otras variables que se correlacionan con los valores de succión. En cuanto a los métodos directos, las técnicas más utilizadas para medir la succión matricial son los tensiómetros

y la técnica de translación de ejes, ambos métodos usan discos o piedras porosas con alto contenido de entrada de aire (HIGH-AIR-ENTRY); mientras que para los métodos indirectos se emplean técnicas como la del papel filtro y el sensor de conductividad térmica o eléctrica.

Cuando se genera una medición directa como su nombre lo indica se mide la cantidad relevante bajo estudio (energía capilar disponible en los poros), mientras que cuando se realizan mediciones indirectas, se emplea otro parámetro (humedad relativa, resistividad o conductividad o contenido de agua) la cual se mide a través de una calibración contra valores conocidos de succión. En la tabla 2, se puede observar las técnicas más comunes para la determinación de la succión en el suelo.

Tabla 2

Métodos comúnmente usados para la determinación de la succión

Métodos	Técnica	Succión	Rango (PA)
Placa de succión (Croney & Coleman, 1961; Coleman & Marsh, 1961)	Mecánica (directa)	Matricial	0-3,0
Placa de Presión (Richards, 1941)	Mecánico (directa)	Matricial	0-4,2
Membrana de Presión (Coleman, 1959; Richards, 1980)	Mecánica (directa)	Matricial	0-5,2
Desecador de Vacío (Altchinson & Richards, 1965; Baker et al. 1973)	Termo dinámica (directa)	Total	4,5-7,0
Palcrometro (Spanner, 1951; Snethen, 1977; Daniel et al. 1981)	Termo dinámica (indirecta)	Total	3,0-4,0
Papel Filtro (Gutiérrez, 1985; Duran, 1986)	Termo dinámica (indirecta)	Matricial/ Total	0-6,2
Termohigrómetro (Gee et al. 1992; Leong et al. 2003, Agus & Schanz, 2005)	Termo dinámica (indirecta)	total	0,1-3,0

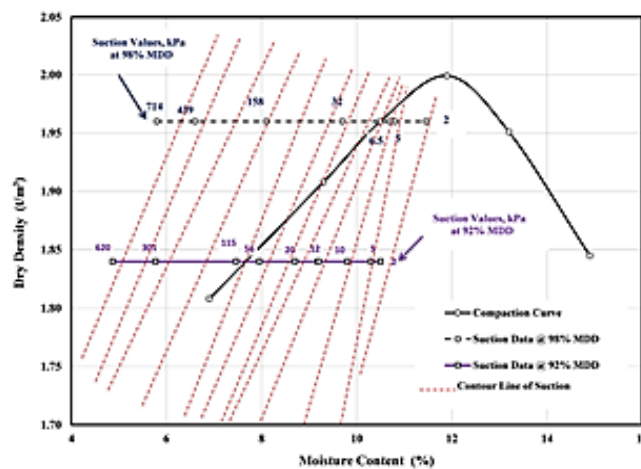
Métodos	Técnica	Succión	Rango (PA)
Sensores de conductividad (Douglas et al, 1997)	Termodinámica (directa)	matricial	0-4,0

Nota. Tomado de *Obtención de la curva de retención de agua en suelos caoliníticos con mixturas de óxido de hierro usando los métodos del papel filtro y placa de succión* por Umbarila Moreno & Rodríguez Ramirez, 2019.

En la Figura 4, se presenta la curva de compactación comparado con los límites superior e inferior recomendados el Ministerio de Transporte, Reino de Arabia Saudita. La Distribución del tamaño de las partículas (PSD) se encuentra dentro de los límites con porcentaje de finos (P#200), coeficiente de uniformidad, coeficiente de curvatura de 7.6%, 53 y 1.4, respectivamente.

Figura 4

Curva de compactación Proctor que muestra los contornos de succión



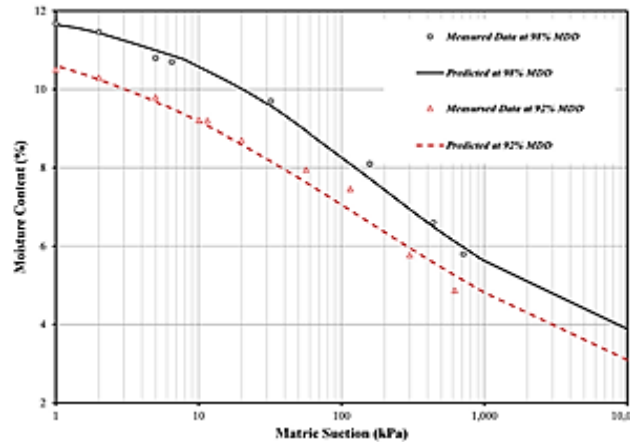
Nota. Tomado de *Combined effect of compaction level and matric suction conditions on flexible pavement performance using construction and demolition waste* por Arab, et al. 2020.

En este estudio, el ensayo de compactación Proctor modificado se realizó en el Material de desecho de construcción y demolición (C&D), obteniendo que los valores de la Densidad Seca Máxima (MDD) y Contenido de Humedad Optimo (OMC) fueron 2,0 t/m³ y 11,8% respectivamente. Así entonces, el conjunto de datos de succión en las diferentes compactaciones se utilizó para generar los niveles en la curva de compactación del material y las líneas de contorno de succión como se muestra en la figura 4. Cabe destacar que los datos de succión se ajustaron de acuerdo con el modelo de Fredlund y Xing. (1994).

En ese orden de ideas, la curva de retención SWCC se construyó para el material de desecho de C&D, en la que se puede observar que la succión matricial aumenta con el aumento del esfuerzo de compactación a un cierto contenido de humedad. Esto se debe al aumento del esfuerzo de compactación que resultó en la producción de más finos causados por la rotura de partículas y reducción en el volumen de vacíos entre los agregados, que a su vez aumentó el valor de succión matricial y de entrada de aire, lo que puede atribuirse principalmente a la disminución del volumen de los vacíos, tal como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

SWCC para material de desecho de C&D en diferentes niveles de compactación ajustado usando el modelo de Fredlund y Xing (1994)



Nota. Tomado de *Combined effect of compaction level and matric suction conditions on flexible pavement performance using construction and demolition waste* por Arab, y otros, 2020.

Finalmente, la prueba de Modulo Resiliente se realizó a dos diferentes densidades secas (92% y 98% de MDD) con diferentes contenidos de humedad. El procedimiento de compactación se llevó a cabo para preparar especímenes asumiendo menos esfuerzo de compactación (92% y 98% de MDD) a diferentes contenidos de humedad inicial (60%, 70%, 80% y 90% OMC). Para áridos bases no ligados con contenido fino menos del 8%, el MR está dominado principalmente por el tipo de agregado grueso y forma.

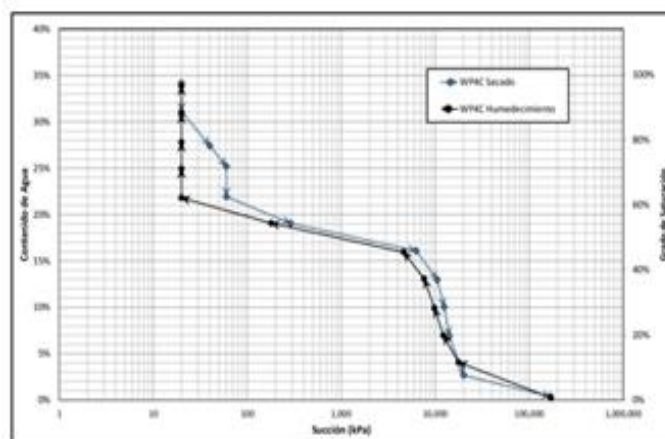
Para investigar el efecto del esfuerzo de compactación en MR, se utilizó un molde partido de acero de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, y se aplicó un procedimiento de compactación estática. Los especímenes se mantuvieron en bolsas de plástico para equilibrar durante dos días antes de las pruebas. Se aplicaron combinaciones de presiones de confinamiento y esfuerzos cíclicos axiales en 15 secuencias. El número de ciclos de carga fue 100 ciclos para

cada secuencia y la muestra se acondicionó primero con una presión de confinamiento de 41,4 kPa y estrés desviador de 24,8 kPa para 500 ciclos. El MR se calculó como el promedio de los últimos cinco ciclos.

La curva de retención de agua de estos suelos es bimodal, como se evidencia en la Figura 6, que para contenidos de agua superiores a 22%, tanto en humedecimiento como en secado, la curva presenta una limitante en cuanto a la precisión de la medida de succión llegando apenas a 20 kPa. Sin embargo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos para el proceso de secado se observa que se insinúa una curva bimodal, es decir, presenta dos sectores en donde cambia fuertemente la pendiente de la curva (semejando aparentemente dos valores aparentes de entrada de aire), así como también se observa una histéresis al comparar los procesos de secado con el de humedecimiento.

Figura 6

Curva de retención obtenida mediante el potenciómetro



Nota. Tomado de *Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos* por Pérez, 2017.

La resistencia del material está asociada principalmente a la microestructura del material y al efecto que tiene la succión en la rigidez del material. La influencia del esfuerzo normal sobre la resistencia al corte del material se ve reducida al incrementarse el nivel de succión, es decir, la ganancia en la rigidez del material por efecto de la succión es tan alta que les resta importancia a los incrementos en el esfuerzo normal. La ganancia en la resistencia al corte del material por efecto del incremento en el nivel de succión generalmente le es atribuida al incremento en la cohesión, pero los resultados experimentales le atribuyen este aumento al ángulo de fricción del material.

Por otro lado, se determinó que, en el material analizado, la succión generada por la microestructura es similar a la resistencia del material en comparación con su estado saturado. Al realizar la comparación de la resistencia al corte del material en su estado saturado (71kPa) con la resistencia del material obtenida para un grado de saturación del 70% (137kPa), se observa que este valor es casi del doble. Esto se debe a que los poros predominantes en la masa de suelo, que son la microestructura (0.02 μ m), generan estos enormes esfuerzos de succión. Además, se estima que la contribución de la succión en la resistencia al corte es más influyente en materiales como el analizado (de tipo arcillo – limoso), debido a que por sus condiciones mineralógicas y estructurales este se mantiene en un estado de saturación parcial. Lo anterior se explica puesto que a partir del 90% de saturación este empieza un proceso de drenado natural, es decir que, a pesar de que se le adicione más agua el material permite que el agua salga por acción de la gravedad. Este hecho hace que la evaluación de la succión sea un punto clave en la estimación del comportamiento mecánico del material.

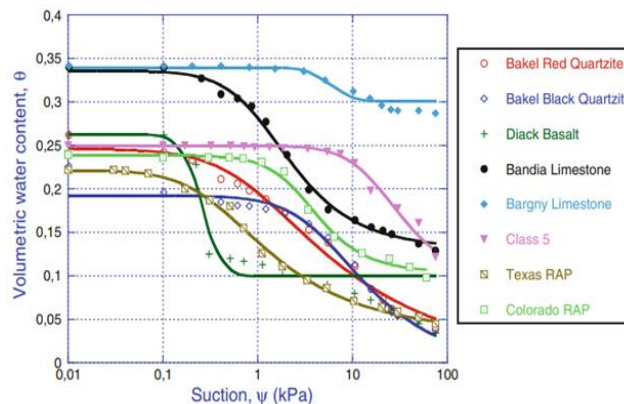
4. Succión y Estructuras de Pavimento

En este apartado se muestran algunas de las curvas de retención en materiales granulares con el propósito de comparar los resultados obtenidos en las diferentes investigaciones.

Con respecto a la curva de retención, Ba et al. (2013), afirma que en materiales granulares la Curva de retención SWCC para diferentes materiales de pavimento asfáltico granular y reciclado, describiendo el contenido volumétrico de agua ($X=Sr*n$) como función de la succión matricial. Por tanto, para su estudio Ba et al. (2013), sintetiza en la Figura 7, las curvas de retención para los distintos materiales granulares utilizados en su estudio.

Figura 7

Curvas características de algunos materiales.



Nota. Tomado de *Effect of Matric Suction on Resilient Modulus of Compacted Aggregate Base Courses* por Ba, et al. 2013.

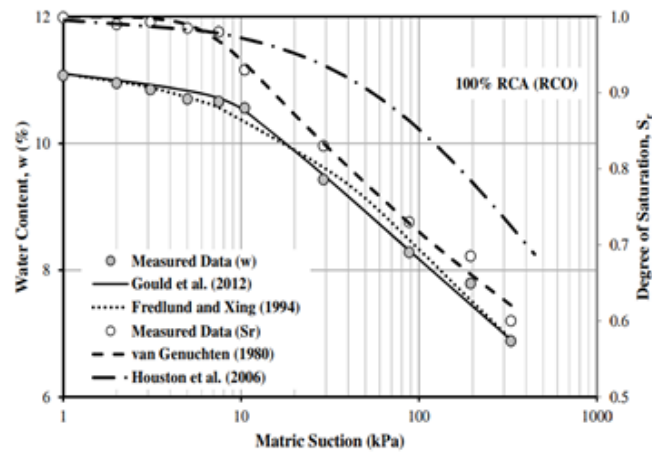
De esta manera, en la Figura 7, se tiene que las presiones de entrada de aire de las calizas (Bandia y Bargny), Material reciclado de Minnesota (Clase 5) y concreto asfáltico reciclado de

Colorado (Colorado RAP) son más altas en comparación con las cuarcitas roja y negra (Bakel red Quartzite y Bakel Black Quartzite), el Basalto (Diack Basalt), y el concreto asfáltico reciclado de Texas (Texas RAP). Además, se puede determinar que en las Cuarcitas (Bakel red y Bakel black), el basalto (Diack Basalt) y el pavimento reciclado de Texas (Texas RAP), los valores de agua residual tienden a cero. Por el contrario, los valores de agua residual de la piedra Caliza (Bargny Limestone) son los más altos, esto se debe a la cohesión y al efecto de cementación de la piedra caliza en comparación con las calizas y los demás materiales utilizados. Por lo tanto, la forma del SWCC no es solo en función de la distribución del tamaño de las partículas, sino también en función de las propiedades de cementación por deshidratación de los agregados. Vale la pena resaltar, que ninguno de los materiales analizados presenta valores de entrada aire superiores a 10 kPa.

Por otro lado, en el estudio de Azam et al. (2014), para investigar el efecto de la succión matricial en el comportamiento cíclico de los agregados, se realizó la prueba de retención de agua sobre muestras compactadas utilizando como agregados concreto reciclado (RCA) y mampostería de triturada reciclada (RCM) mediante la técnica del papel filtro y el método de la columna de agua colgante para obtener las curvas características suelo-agua (SWCC) expresadas en términos del contenido de humedad (w) y el grado de saturación (S_r), tal como se evidencia en la Figura 8 y Figura 9.

Figura 8

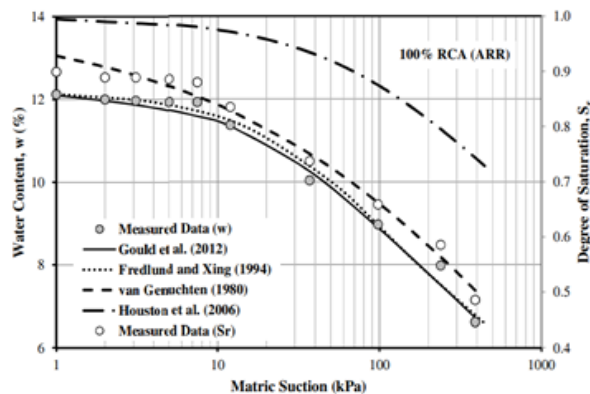
Curva de retención SWCC ajustada para agregado de concreto reciclado (RCA) de RCO



Nota. Tomado de *Matric Suction in Recycled Unbound Granular Materials* por Azam et al. 2014.

Figura 9

Curva de retención SWCC ajustada para el material de agregado de concreto reciclado (RCA) de ARR



Nota. Tomado de *Matric Suction in Recycled Unbound Granular Materials* por Azam et al. 2014.

De acuerdo con las Figuras 8 y 9 se determinó que las formas de los SWCC eran las esperadas, siendo casi curvas para materiales para los que se pudo establecer una succión residual. Los datos de SWCC fueron menos claros para la mezcla de RCO, ya que la succión residual no

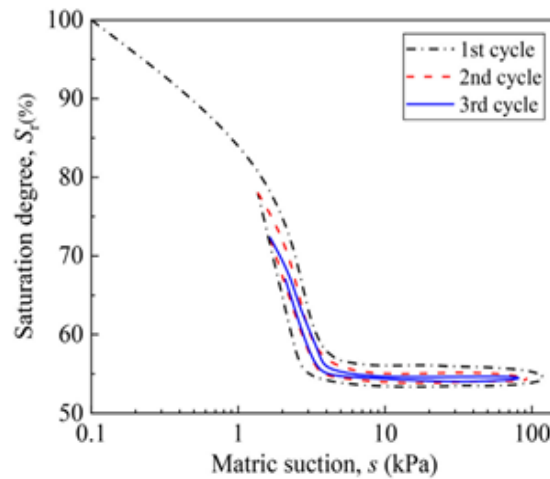
fue evidente y tuvo que ser fijado igual a la succión máxima (106 kPa) para eliminar el segundo punto de inflexión del SWCC, como lo sugiere Gould et al. de 2012. Además, se encontró que las ecuaciones empíricas del modelo de Houston et al. de 2006 proporcionan predicciones insatisfactorias del SWCC para los materiales de este estudio.

El modelo de Houston et al. de 2006 puede ser adecuado para bajo valores de succión (< 1500 kPa). Sin embargo, se ha encontrado que el modelo no es adecuado incluso en rangos bajos de succión para los agregados reciclados en este estudio; Por otra parte, los modelos de Van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) (como se citó en Rahimi, et al., 2015) son aceptables para la construcción del SWCC para los materiales granulares no ligados UGM. Nuevamente, para los materiales analizados el valor de entrada de aire está por debajo de los 10kPa.

Teniendo en cuenta lo anterior en la Figura 10, se evidencia la de la mezcla de agregados de toba triturada y finos de arcilla en la subestructura de una antigua vía férrea, analizados por Cao et al. (2020), en donde se analizaron tres ciclos de secado y humedecimiento. Se observó que, en el primer ciclo, hay un efecto histerético porque durante el humedecimiento, la succión se reduce para un mismo grado de saturación. Asimismo, en el segundo y tercer ciclo, el efecto histerético, se redujo considerablemente, por lo cual se sugiere que la tendencia de la curva de retención es única para múltiples ciclos de secado y humedecimiento.

Figura 10

La curva característica suelo-agua (SWCC) de las mezclas de agregados de granulación



Nota. Tomado de *The effects of suction history on the cyclic behavior of unsaturated road base filling materials* por Cao et al. (2020).

Se han realizado diversos estudios sobre la succión en materiales granulares, uno de ellos fue adelantado por Azam et al. (2014), en el cual se analizó la succión matricial dentro de los materiales granulares no ligados (UGM), en el cual se presentaron los resultados matriciales de succión de siete productos reciclados y uno virgen. Los productos fueron agregados de concreto reciclado (RCA) y mampostería triturada reciclada de mezclada con RCA. El porcentaje de mampostería en los materiales mezclados varió entre 10% y 30% en masa.

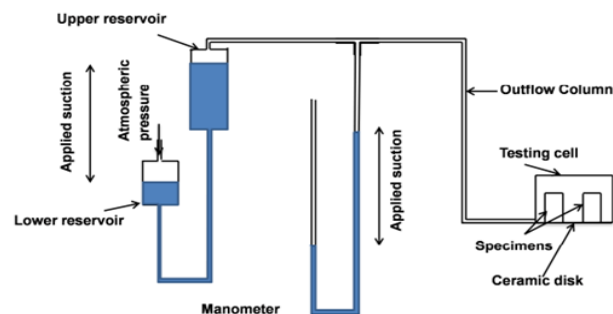
En este proyecto se investigaron dos productos; Agregado de Concreto Reciclado (RCA) y Mampostería Triturada Reciclada (RCM). Se eligieron dos fuentes de la industria para ambos productos; ResourceCo (RCO) y Adelaide Resource Recovery (ARR). El agregado para concreto que es triturado por estas dos empresas se extrajeron de Adelaide Hills y generalmente se obtienen de cuarcita o dolomita. La empresa ARR tenía un producto combinado (80 % RCA + 20 % RCM)

y se suministraron muestras de dos lotes diferentes, ARR (I), ARR (II). Como RCO no tenía tal mezcla, ResourceCo realizó una trituración de mampostería de arcilla cocida con el fin de mezclar con el producto base RCA de la empresa. Los materiales RCO se mezclaron en tres materiales en laboratorio con 10%, 20% y 30% RCM por masa total de agregados.

Además, se utilizó el método del papel de filtro para la medición indirecta de la succión matricial para las mezclas según ASTM D 5298 (2003). Se utilizaron papeles de filtro Whatman No 1. Se utilizó la técnica de la columna de agua colgante para acondicionar las muestras a succiones de matriz inferiores a 10 kPa. El aparato utilizado constaba de cuatro partes principales: celda de prueba, columna de salida, manómetro y la columna colgante, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11

Esquema del aparato de columna de agua colgante



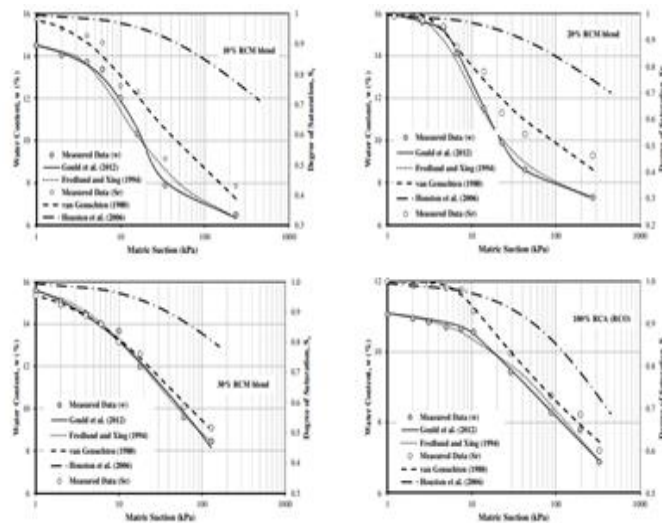
Nota. Tomado de *Matric Suction in Recycled Unbound Granular Materials* por Azam et al. (2014).

De esta manera, en este estudio se presentaron las curvas características del agua del suelo SWCC para los siete productos reciclados y el nuevo agregado, por lo que se determinó que los productos reciclados tuvieron succión matricial superior a la del agregado virgen en cualquier

contenido de humedad dado. Los datos de succión fueron ajustados con tres modelos diferentes. Los modelos de van Genuchten (1980) y el de Fredlund y Xing (1994) (como se citó en Rahimi, et al., 2015) fueron los más adecuados y relativamente simples en su aplicación para la realización de la SWCC, especialmente cuando se compara con el modelo de Gould et al. de 2012. Por otro lado, el modelo SWCC predictivo de Houston, et al. de 2006 proporciona predicciones insatisfactorias del SWCC para los materiales de este estudio, tal como se muestra en las Figuras 12 y Figura 13.

Figura 12

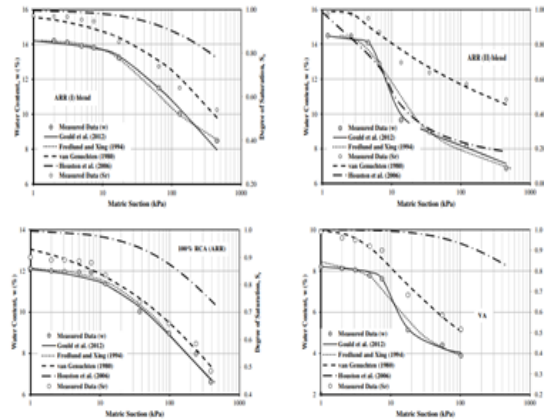
Curva de retención SWCC ajustado para los materiales reciclados provenientes de RCO



Nota. Tomado de *Matric Suction in Recycled Unbound Granular Materials* por Azam et al. (2014).

Figura 13

Curva de retención SWCC ajustado para los materiales RAA y el material virgen



Nota. Tomado de *Matric Suction in Recycled Unbound Granular Materials* por Azam et al. (2014).

Además, otro aspecto importante a destacar del estudio de Azam et al. (2014), es que los productos reciclados tuvieron succión matricial superior a la del agregado virgen en cualquier contenido de humedad dado. De esta manera, los materiales granulares no ligados pueden verse influenciados por las succiones desarrolladas durante la colocación y secado posterior del material durante la construcción.

Finalmente, en este estudio se determinó que la deformación permanente y el módulo resiliente pueden determinarse a partir de cargas repetidas ensayo triaxial de muestras compactadas. En este estudio se aplicó una tensión de confinamiento constante de 196 kPa, seguida de una tensión vertical del desviador de 460 kPa pulsada durante 50.000 ciclos de carga. Después de una serie de ensayos, se encontró que el modelo fue adecuado para predecir la deformación permanente, para todas las mezclas y que la succión matricial inicial también estaba adecuadamente representada por una función de potencia.

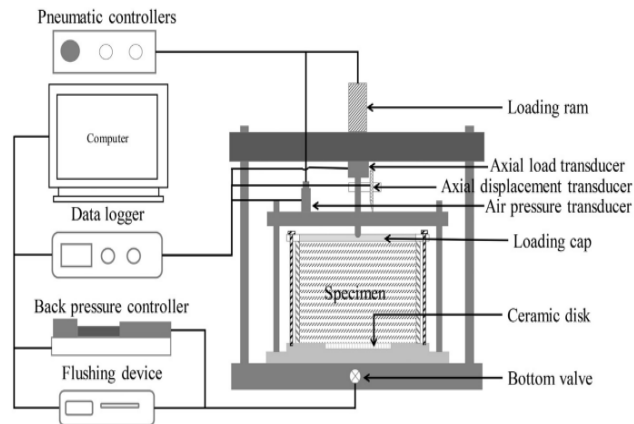
Así entonces, tal como se muestra en la Figura 13, la succión matricial inicial tiene un impacto también en el módulo resiliente y la tensión permanente de estos materiales de pavimento y, por lo tanto, la succión debe incorporarse en el desarrollo de modelos para la predicción del comportamiento ingenieril de materiales granulares no ligados (UGM).

4.1 Los Efectos de la Succión sobre la Respuesta Mecánica

De acuerdo con Cao et al. (2020), la base granular de la estructura de pavimento suele estar sujeta a cargas de tráfico cíclicas, así como a cargas ambientales. La evidencia muestra que la deformación permanente excesiva de la base granular de la carretera puede ocurrir bajo la acción de las cargas del tráfico y la complicada historia de succión inducida por el cambio climático.

En su artículo Cao et al. (2020), destaca que se realizaron pruebas de carga cíclica en los agregados de base de carretera contaminados con finos, los CTA se mezclaron con arcilla de caolín en una proporción de masa relativamente baja del 3 %. Para esto, se diseñó un equipo triaxial cíclico utilizando la técnica de traslación de ejes para muestras de gran tamaño. Por eso el aparato utilizado fue diseñado y fabricado para la prueba de retención de agua de la muestra de gran tamaño, debido a esto la adaptación permitió la imposición, equilibrado y control de la succión matricial durante el ensayo para la determinación del módulo resiliente.

La Figura 14 muestra cual fue el aparato utilizado para la prueba de retención de agua en muestras de gran tamaño. Por tanto, algunas características que se le atribuye son que el cambio de agua dentro de él.

Figura 14*La vista esquemática del aparato*

Nota. Tomado de *The effects of suction history on the cyclic behavior of unsaturated road base filling materials* por Cao et al. 2020.

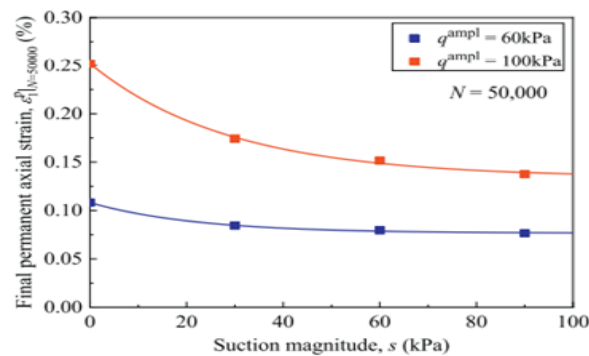
Los programas de prueba se dividieron en cuatro series los cuales estaban enfocados en los efectos de la corriente de succión ($S_{current}$) en el comportamiento cíclico de la mezcla bajo dos tensiones cíclicas y la máxima historia de succión (S_{max}), dirección de la ruta de succión reciente y ciclos de secado y humedecimiento respectivamente. Las trayectorias de esfuerzo de las cuatro series de pruebas se muestran una presión de confinamiento neta típica $\sigma_{net} = 40$ kPa para todas las pruebas en el estudio para considerar la presión de confinamiento relativamente baja en la capa base de la carretera. Se adoptó la onda de compresión sinusoidal en la dirección axial vertical para simular las cargas de tráfico cíclicas, la frecuencia de carga f fue de 1 Hz, y el número total de ciclos de carga N fue de 50.000. Todas las pruebas se realizaron bajo condiciones de drenaje con válvula de presión de aire y presión de agua válvula abierta.

Así entonces, la Figura 15 se presenta la deformación axial permanente final $\epsilon_1|_{N=50000}$ versus la succión actual para dos amplitudes de tensión desviadoras cíclicas ($q_{ampl} = 60$ kPa y

100 kPa). Se muestra que hay una relación no lineal existente entre la tensión axial permanente final y la corriente de succión, y $\epsilon_1|_{N=50000}$ disminuye con la succión a un ritmo descendente. El efecto de succión en la tensión axial permanente final se amplifica a mayores amplitudes de tensiones cíclicas. La deformación plástica ϵ_p entre $q_{ampl} = 60$ kPa y 100 kPa disminuye con el aumento de la magnitud de succión s .

Figura 15

La deformación axial permanente vs. la succión matricial

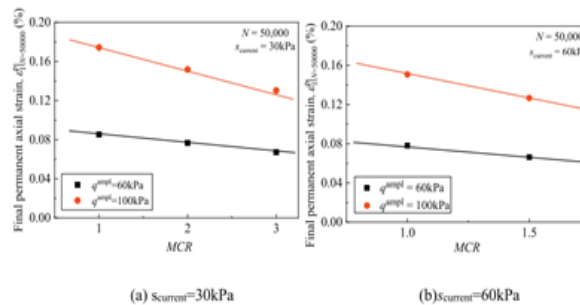


Nota. Tomado de *The effects of suction history on the cyclic behavior of unsaturated road base filling materials* por Cao et al. 2020.

De este modo, para ilustrar claramente los efectos de la historia de la succión asociadas a S_{max} , la Figura 15 presenta el resultado final de la deformación axial permanente ($\epsilon_1|_{N=50000}$) contra la Succión máxima histórica (MCR). La tensión permanente final disminuye a medida que aumenta la MCR, y la tasa decreciente es positiva correlacionada con la amplitud del esfuerzo desviador cíclico. la diferencia de la deformación axial permanente final entre $q_{ampl} = 60$ kPa y $q_{ampl} = 100$ kPa disminuye a medida que aumenta la MCR.

Figura 16

La tensión axial permanente final vs. MCR



Nota. Tomado de The effects of suction history on the cyclic behavior of unsaturated road base filling materials por Cao et al. 2020.

Posteriormente, se muestra que la deformación axial permanente aumenta con el aumento de los ciclos de secado-humectación en el camino de la succión (s) mientras disminuye con los ciclos de secado-humectación en la ruta de secado. La divergencia de la deformación axial permanente entre diferentes ciclos de secado-humectación se vuelve más pequeño con el aumento de los ciclos de secado-humectación.

Los resultados de las pruebas de carga cíclica muestran que la deformación axial permanente de la mezcla arcilla-CTA bajo condiciones cíclicas generan disminución de las cargas con la succión, y la tensión axial permanente se puede reducir mediante el aumento de la historia de succión máxima (S_{max}). Además, El espécimen en la ruta de secado presenta mayor axial permanente tensión que la del camino de humectación. Los ciclos de secado y humectación afectan la deformación axial permanente de manera diferente bajo diferentes trayectorias de succión recientes.

Por otro lado, se ha comenzado a incluir la modelación de las estructuras de pavimento en condición de saturación parcial, incluyendo el efecto de la succión. En este sentido, en el artículo de Arab et. al (2020), se investigó el impacto del nivel de compactación y las succiones matriciales iniciales del material de desecho de construcción y demolición (C&D) utilizado como capa base en el rendimiento del pavimento simulado utilizando el software AASHTO Ware Pavement. El material de desecho de construcción y demolición (C&D), consiste principalmente en un 20% de mampostería reciclada y 80% hormigón reciclado en masa.

En las entradas del software los análisis de desempeño del pavimento simulado consideran dos condiciones climáticas (seco y húmedo), dos niveles freáticos (superficiales y profundos), dos tipos de subrasante suelo (fuerte y débil), y dos niveles de espesor para las capas superficiales de base y asfalto (delgada y gruesa). Posteriormente, se realizaron análisis estadísticos completos de los efectos principales y de interacción sobre los resultados de AASHTOWare. A continuación, se demuestran los principales resultados obtenidos en esta investigación.

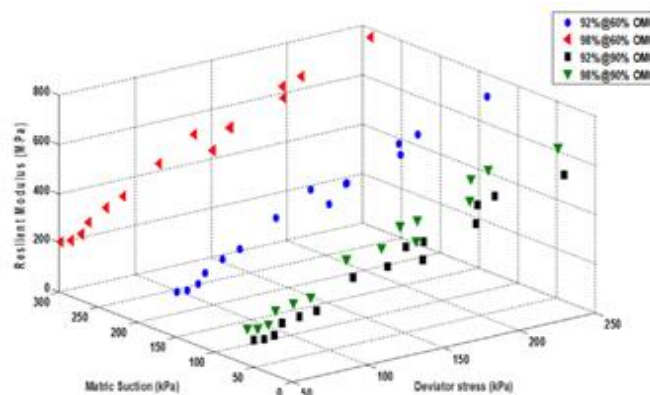
Para investigar el efecto del esfuerzo de compactación en el MR, se utilizó un molde partido de acero de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, y se aplicó un procedimiento de compactación estática. Los especímenes se mantuvieron en bolsas de plástico para equilibrar durante dos días antes de las pruebas. Se aplicaron combinaciones de presiones de confinamiento y esfuerzos cíclicos axiales en 15 secuencias. El número de ciclos de carga fue 100 ciclos para cada secuencia y la muestra se acondicionó primero con una presión de confinamiento de 41,4 kPa y estrés desviador de 24,8 kPa para 500 ciclos. El MR se calculó como el promedio de los últimos cinco ciclos.

En la Figura 17 se presenta los resultados de MR para las muestras que se prepararon en 60% y 90% de contenido de humedad optima (OMC) en dos niveles de compactación. se puede

notar que el MR aumenta (aproximadamente 12% en promedio) con el aumento del esfuerzo de compactación y el consiguiente aumento del nivel de succión. Además, se observaron diferencias notables en los valores de MR en 60% OMC para ambos esfuerzos de compactación debido a la mayor diferencia en succión matricial (100 kPa al 92% en comparación con 250 kPa al 98% MDD), que a su vez aumentó los valores de MR al 98 % de MDD. Este aumento en MR puede atribuirse al aumento en la rigidez del suelo y rigidez con respecto a la succión matricial del suelo dentro de la zona de desaturación. La contribución de succión del suelo en esta zona es más efectiva debido a la mayor área de contacto húmedo de las partículas del suelo. Cabe señalar que los valores de MR disminuyen en aproximadamente 25% en promedio cuando el contenido de humedad cambió de 60% a 90% OMC. Este estudio sugiere que el efecto del contenido de humedad sobre el módulo resiliente es mayor que el efecto de compactación

Figura 17

Valores de módulo resiliente a diferentes niveles de compactación y niveles de succión

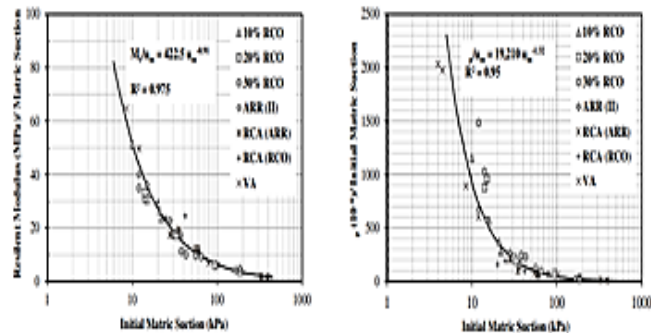


Nota. Tomado de *Combined effect of compaction level and matric suction conditions on flexible pavement performance using construction and demolition waste* por Arab et. al (2020).

Se determinó que el módulo resiliente de los residuos de construcción y demolición utilizados como materiales base es sensible al estado de humedad y al nivel de compactación. Además, la influencia del nivel de compactación es más pronunciada en el agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba que en la base y la formación de surcos en la subrasante. Finalmente, el efecto del nivel de entrada agua del suelo (curva característica del agua del suelo, SWCC) difiere según el espesor del pavimento y las condiciones climáticas. Por lo tanto, los parámetros asociados a la SWRC de estos materiales influyen en el desempeño del SWCC que se considera un parámetro muy sensible para una predicción precisa del desempeño del pavimento. Por tanto, es importante tener control estricto sobre la compactación de los materiales de Construcción y Demolición cuando se utiliza como material base en comparación con el contenido de humedad.

Figura 18

Influencia de la succión matricial inicial sobre el módulo resiliente y la deformación permanente de los materiales



Nota. Tomado de *Matric Suction in Recycled Unbound Granular Materials* por Azam et al. 2014.

Teniendo en cuenta lo anterior, los mismos autores proponen un modelo para predecir el módulo resiliente incorporando la succión matricial en materiales granulares reciclados sin aglomerar, esta vez Azam et al. (2013) proponen las pruebas con cuatro reciclados materiales

granulares no ligados. Los materiales reciclados se prepararon con contenidos de humedad que oscilaban entre el 70% y el 90% de contenido óptimo de humedad (OMC) y probado en un aparato de prueba triaxial de carga repetida (RLTT) bajo varios regímenes de estrés.

Posteriormente, se desarrolló un modelo con cuatro términos y seis constantes, que seguía la ley general de potencias. Se encontró un conjunto único de constantes de material para todos los materiales reciclados para proporcionar predicciones satisfactorias del módulo resiliente ($R^2 = 0,88$), en una amplia gama de tensiones y estados de humedad. Los módulos resilientes de RLTT bajo el protocolo AustRoads fueron determinados para cuatro productos mezclados.

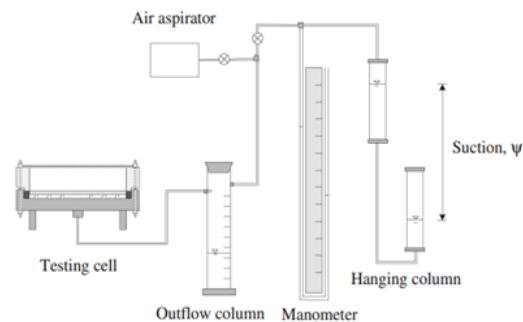
El modelo de módulo resiliente final planteado por Azam et al. (2013), requiere mampostería triturada contenido (puede ser cero), densidad seca, resistencia al corte, matriz inicial succión y estado de tensión. El modelo propuesto no requiere la determinación del valor de entrada de aire de SWCC para evaluar el factor de esfuerzo efectivo, w . Requiere conocimiento de la succión matricial inicial antes de la carga, que puede medirse por FP o por otros métodos de prueba, o mediante el uso de ecuaciones empíricas disponibles para el SWCC, combinado con el contenido de humedad de la UGM. Además, el modelo no requiere pruebas especializadas.

Por otro lado, el estudio de Ba et al. (2013), se realizó para investigar el efecto de la succión matricial en el módulo resiliente de capas base de áridos no consolidados. El estudio caracterizó las curvas características del agua versus relaciones de succión matricial de cursos de base agregados que se compactaron a diferente contenido de agua y entre 98 y 100% de la Densidad Proctor modificada. La curva característica del agua del suelo (SWCC) y la relación entre resiliencia del módulo (M_r) y la succión matricial se establecieron para diferentes materiales granulados reciclados no ligados para predecir cambios en el módulo debido a cambios en humedad de los materiales de pavimento.

En esta investigación, durante las pruebas para la determinación de la SWCC, se aplicó succión a través de una columna colgante en la que la diferencia de nivel de los depósitos proporciona la succión. El esquema del diagrama de la columna colgante y la celda de prueba es presentado en la Figura 19. El equipo de prueba incluye cuatro artes principales: celda de prueba, columna colgante, tubo de salida, y manómetro. La prueba de la columna colgante puede aplicarse baja succión ($w \leq 1$ kPa) con alta precisión ($\pm 0,02$ kPa). Lo más alto que puede la columna colgante aplicar es de alrededor de 80 kPa debido a la limitación de la altura del agua. Los especímenes fueron compactados en la celda de prueba entre el 95 % y el 98 % del peso unitario seco máximo. Se usó una mesa vibratoria durante la compactación para asegurarse de que la muestra alcance la densidad deseada.

Figura 19

Esquema del aparato de columna colgante



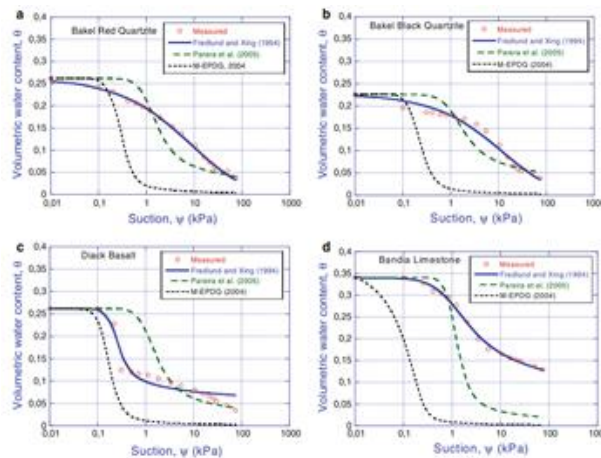
Nota. Tomado de *Effect of Matric Suction on Resilient Modulus of Compacted Aggregate Base Courses* por Ba, et al. 2013.

Sin embargo, varios estudios han intentado predecir la SWCC, a partir de ecuaciones empíricas basadas en la correlación entre el SWCC y parámetros tales como la textura del suelo,

tamaño de las partículas e índice de plasticidad (Rahimi, et al., 2015; Perera & Fredlund, 2005). En la Figura 20 se presenta la relación entre las curvas SWCC medidas y ajustadas al modelo de Fredlund y Xing (1994), y aquellos predicho por modelos empíricos como el de Pereira et al. (2005) y modelos M-EPDG (NCHRP 2004).

Figura 20

Curvas de características del agua medidas y predichas por varios modelos: a Cuarcita roja de Bakel, b Cuarcita negra de Bakel, c Basalto de Diack, d Caliza de Bandia



Nota. Tomado de *Effect of Matric Suction on Resilient Modulus of Compacted Aggregate Base Courses* por Ba, et al. 2013.

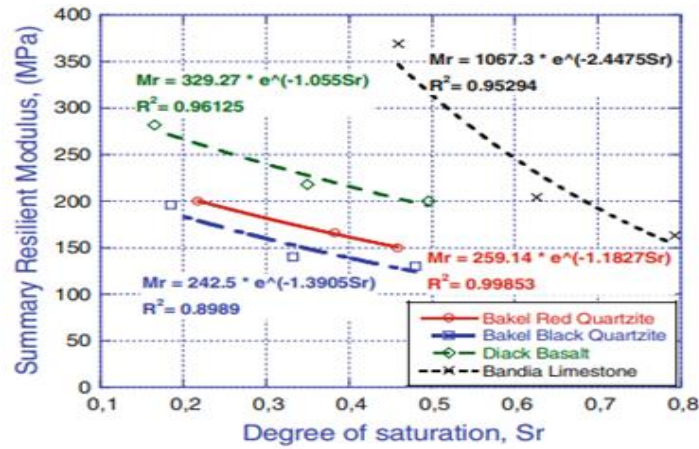
De esta manera, se observa que todos estos modelos predicen una caída dramática ("colapso") del contenido volumétrico de agua, que es visible solo para el Basalto (Diack Basalt), cuyo tamaño máximo de partícula es muy alto. Para las cuarcitas de Bakel (Red and Black), cuyos poros son relativamente más estrechos que las del Basalto ((Diack Basalt), este "colapso" no se observa. Sin embargo, si se observa una disminución continua del contenido volumétrico de agua,

que no puede ser predicho por los dos modelos empíricos, y que es evidente. Para los agregados evaluados en este estudio (a excepción de la piedra caliza Bargny), los finos están marginalmente involucrados en la retención de agua en los poros.

En cuanto al Modulo Resiliente (MR) en este estudio se calculó como la media de los últimos cinco ciclos de cada secuencia de la deformación y esfuerzo axiales cíclico. El Módulo Resiliente es el cual fue definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable. En este caso, Ba et al. (2013), consideraron tres módulos resilientes resumen de referencia (SRM): en contenido de agua óptimo, contenido de agua óptimo +2 %, y contenido óptimo de agua -2 %. A continuación, Las Figuras 21 y 22, muestran la variación de SRM en función del grado de saturación (S_r) y Succión (ψ), respectivamente. Tal como lo menciona Sawangsuriya et al. (2009), se obtiene una relación más singular con la succión matricial que con contenido de agua (o grado de saturación). Gradualmente, a medida que aumenta la Succión, el capilar entre las partículas sólidas aumenta, provocando un aumento de las fuerzas inter capilares y, por tanto, un aumento de los Módulos Resilientes.

Figura 21

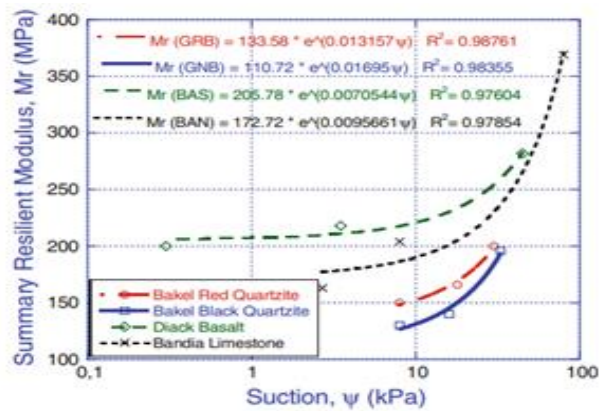
Módulo resiliente en función del grado de saturación



Nota. Tomado de *Effect of Matric Suction on Resilient Modulus of Compacted Aggregate Base Courses* por Ba, et al. 2013.

Figura 22

Módulo resiliente versus succión matricial en escala semilogarítmica



Nota. Tomado de *Effect of Matric Suction on Resilient Modulus of Compacted Aggregate Base Courses* por Ba, et al. 2013.

En la Figura 22, se evidencia que las cuarcitas (Bakel Quartzite), se caracterizan por un rápido drenaje de agua por gravedad a partir de niveles muy bajos de succión ($\psi \setminus 0,1$ kPa). El Basalto (Diack Basalt), por el contrario, se caracteriza por una caída dramática en el volumen de agua contenido cuando ψ está cerca de 0,1 kPa. Este "colapso" es debido a la coexistencia de "poros grandes" y "pequeños poros". Estos dos comportamientos son característicos de los materiales granulares no cohesivos, donde el agua se drena principalmente por gravedad, y una pequeña cantidad es retenida por succión matricial. Las calizas Bandia y Bargny (Bandia Limestone), se caracterizan por una mayor capacidad de retención de agua. En estos agregados, gran parte del agua es retenida por matriz de succión, la cual controla el comportamiento del material.

4.2 Influencia de la Técnica de Compactación sobre las Curvas de Retención de Agua

La compactación es un proceso que favorece el aumento de las características ingenieriles del suelo, son varios los beneficios que se obtienen mediante su implementación; uno de ellos es que se logra una nueva estructura en el acomodamiento de los granos, aumentando la resistencia al corte del suelo, aumentando así la capacidad de carga de este como consecuencia de esto se genera otro beneficio y es que se disminuye la compresibilidad o la posibilidad de deformaciones. Otro beneficio generado es la disminución de la relación de vacíos reduciendo así la permeabilidad del suelo. Del mismo modo, la compactación reduce el potencial de expansión, contracción o expansión por congelamiento evitando que se generen variaciones en el volumen del material.

Recientemente, algunos investigadores han estado utilizando otros métodos de compactación, como compactación estática, específicamente para el estudio del comportamiento no saturado de materiales de pavimento.

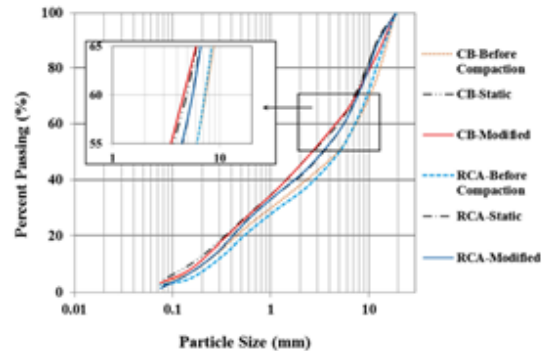
Por ejemplo, el estudio de Yaghoubi, et al., 2016, investigó el efecto de las técnicas de compactación en el comportamiento resiliente de especímenes de laboratorio compactados. En este sentido, se seleccionaron materiales de construcción y demolición (C&D) y se seleccionaron métodos de compactación estática y de impacto. Los materiales granulares utilizados en este estudio fueron Ladrillo Triturado (CB) y Agregado de Concreto Reciclado (RCA) con un tamaño máximo de partícula de 19 mm.

Para esto, se utilizaron dos métodos de compactación: métodos Proctor estático y modificado (ASTM D1557-12 (2012)). Además, una serie de pruebas de compactación de prueba y error (4000 kPa a 12000 kPa presión estática) mostró que la compactación estática bajo una presión de 12000 kPa da como resultado especímenes con densidad cercana a la de una muestra preparada utilizando el procedimiento Proctor modificado. En ambos métodos, los materiales fueron compactados en 5 capas dentro de un molde de 105 mm de diámetro. En el método estático, después de aplicar la presión en cada capa, la presión se mantuvo constante hasta que no hubo más deformación. Las muestras posteriores a la compactación se secaron en horno durante 24 horas y luego se realizó el análisis del proceso tamizado.

Para cada uno de los 4 tipos de especímenes, siendo CB-Estático, CB-Modificado, RCA-Estático y Modificado con RCA, se compactaron 2 especímenes replicados y se analizaron después de la compactación. En la figura 23, se observa la Distribución del tamaño de las partículas (PSD) promedio de especímenes de precompactación y poscompactación CB y RCA. Por lo cual se determinó que la brecha más grande entre la PSD previa y posterior a la compactación de CB, sugiere una mayor cantidad de rotura de agregados en CB.

Figura 23

Alteración en PSD de CB y RCA después de la compactación.



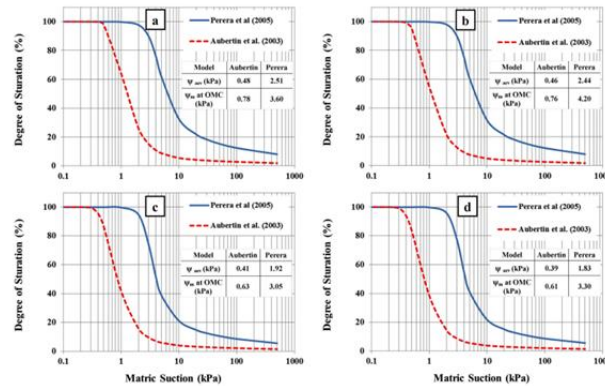
Nota. Tomado de *Impact of Compaction Methods on Resilient Response of Unsaturated Granular Pavement Material* por Yaghoubi, et al., (2016)

En este estudio, se asumió que la succión residual era de 100 kPa según lo recomendado por Perera et al. (2005) para materiales no cohesivos. Esto resultó en valores de succión más altos para especímenes CB en comparación con especímenes RCA en cualquier grado específico de saturación. Por lo tanto, se esperaban valores de succión más altos de especímenes preparados por el método de compactación por impacto.

Con base en los resultados que se muestran en la Figura 24, los resultados de Aubertin et al. (2003) justifican los valores altos de succión mencionados anteriormente, mientras que esto no se percibe en los resultados del modelo de Perera et al. (2005) (Perera & Fredlund, 2005); la razón puede ser el hecho de que este modelo sólo tiene en cuenta los parámetros de PSD, mientras que el modelo de Aubertin et al. (2003), considera tanto la PSD como la relación de vacíos (Perera & Fredlund, 2005).

Figura 24

SWCC previsto para (a) CB modificado, (b) CB estático, (c) RCA modificado, (d) RCA estático

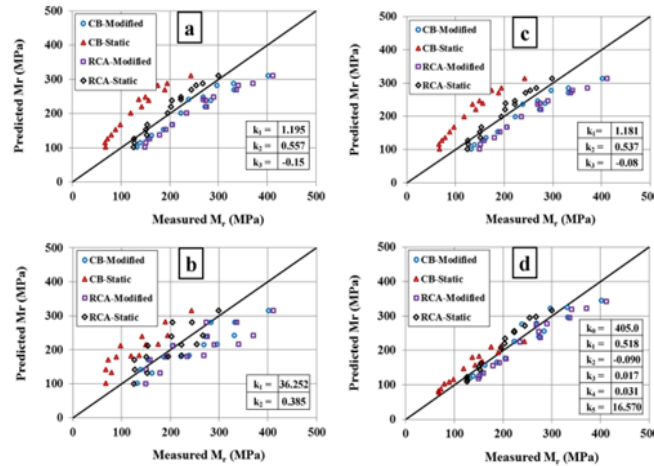


Nota. Tomado de *Impact of Compaction Methods on Resilient Response of Unsaturated Granular Pavement Material* por Yaghoubi et al. (2016).

En cuanto al Módulo Resiliente MR, se utilizó la combinación de un rango de esfuerzo vertical repetido y confinamientos estáticos a través de las secuencias de pruebas RLT de acuerdo con el procedimiento AASHTO T-307, lo que dio como resultado un total de 60 conjuntos de datos para los valores de MR. Dichos valores promedio medidos fueron 242 y 132 MPa para CB-Modificado y CB-Estático y 256 y 197 MPa para RCA-Modificado y RCA-Estático, respectivamente. Obviamente, para ambos materiales, los especímenes compactados que usan el método Proctor modificado tienen mayores valores de MR. La Influencia de la succión en el MR, se estudió para conocer el comportamiento elástico de CB y RCA compactados ajustando el conjunto de datos de las pruebas los cuatro modelos discutidos. En la Figura 25 se observan las relaciones del Módulo Resiliente medido en este estudio para cada uno de los materiales comparado con los modelos predictivos más populares.

Figura 25

Módulo resiliente predictivo vs. medido para todos los especímenes usando (a) AASHTO (2002), (b) Yang et al. Alabama. (2005), (c) Liang et al. (2008) y (d) modelos de Azam y Cameron (2013)



Nota. Tomado de *Impact of Compaction Methods on Resilient Response of Unsaturated Granular Pavement Material* por Yaghoubi et al. (2016).

En ese sentido, se determinó que hubo una mayor rotura de agregados en las muestras de CB, por lo que contienen tamaños de poro más pequeños y, en consecuencia, valores de succión más altos en grados similares de saturaciones, en comparación con las muestras RCA. Además, se observó una diferencia menor en la rotura de agregados de cada material durante el impacto y la aplicación de métodos estáticos. En general, se observó que, en especímenes con densidades secas y contenidos de humedad idénticos, el método de compactación influye de manera diferente en diferentes succiones. Esta diferencia, a pesar de ser mínima (succión < 1 kPa), puede en algunos casos influir en el módulo resiliente de las muestras.

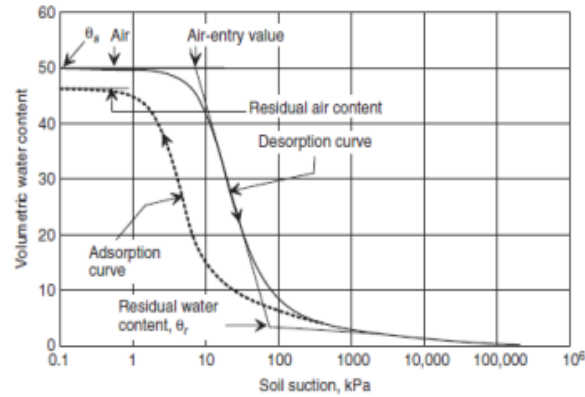
4.3 Influencia de Ciclos de Humedecimiento y Secado en las Swrc para Materiales Compactados Granulares

Los suelos generalmente se encuentran sujetos a ciclos de humedecimiento y secado, encontrándose continuamente expuesto a variaciones en su contenido de agua. De acuerdo con Orjuela (2021), dichas variaciones generan cambios en la rigidez; sin olvidar que en dicha rigidez también interviene la composición mineralógica del material, la distribución y el tamaño del grano, la fuerza de atracción entre partículas entre otras. Al observar los suelos parcialmente saturados estos normalmente presentan histéresis hidráulica, lo cual corresponde a bajos ciclos de secado y humedecimiento, en el cual la retención del agua es muy diferente en cuanto al humedecimiento y el secado que son provocados por la precipitación y la evapotranspiración.

Tal como se evidencia en la Figura 26, la curva de retención de agua de un suelo en condiciones parcialmente saturadas contiene información relevante en cuanto a la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento de agua de un suelo, esta curva también sirve para analizar la resistencia al corte, el cambio de volumen, entre otros.

Figura 26

Fenómeno de histéresis hidráulica.



Nota. Tomado de *Influencia de la succión en la compresibilidad de suelos no saturados en trayectorias* por Orjuela, 2021.

Otro estudio importante, fue el realizado por Naranjo (2016), que está enfocado en medir el comportamiento volumétrico de un suelo residual derivado de ceniza volcánica bajo condiciones de saturación parcial. Para ello, se realizaron pruebas experimentales utilizando muestras de suelo compactado. La técnica utilizada para medir la succión del suelo fue el psicrómetro, y se utilizó un consolidómetro convencional para determinar las características de cambio volumétrico. Se influyen en las características de succión del suelo.

Además, el estudio incluyó la compactación de varias muestras de suelo a diferentes densidades secas y contenidos de agua. Estas muestras se sometieron a un esfuerzo vertical constante y luego se inundaron para evaluar el cambio de volumen generado. Este cambio de volumen se utilizó para construir contornos de igual cambio de volumen, lo que permitió establecer zonas de comportamiento volumétrico de colapso.

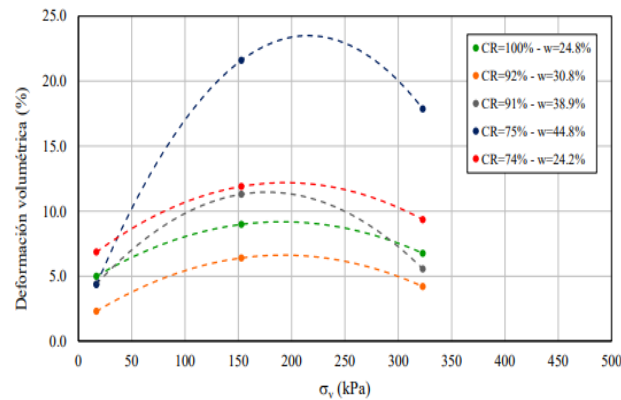
Para medir la succión del suelo, se fabricaron cinco probetas mediante compactación estática a diferentes valores de contenido de agua y densidad seca. Las muestras de suelo utilizadas

para medir la succión tenían un diámetro de 3.8 cm y un espesor de 0.5 cm. Se prepararon dos muestras con diferentes contenidos de agua: una con un contenido de agua más seco que el contenido óptimo de agua de la curva de compactación normal (38%), y otra con un contenido de agua más húmedo. Ambas muestras se compactaron a una densidad seca cercana a la densidad óptima (1.22 g/cm³). Por otro lado, para analizar la influencia de la densidad seca en las características de succión del suelo, se compactaron tres muestras con el mismo contenido inicial de agua, pero a diferentes densidades secas.

En la Figura 27, se observa que, para una densidad seca en particular, el porcentaje de compresión aumenta con el incremento del contenido de agua, y que las muestras compactadas a un contenido de agua similar presentan un mayor porcentaje, si la densidad seca es menor. Cuando se aumenta la densidad seca se reduce el porcentaje de compresión mientras se mantenga un contenido de agua cercano al óptimo obtenido de las condiciones de compactación normal.

Figura 27

Variación de la deformación volumétrica con la densidad seca y el contenido de agua



Nota. Tomado de *Comportamiento Volumétrico de Suelos Compactados Derivados de Ceniza Volcánica* por Naranjo (2016).

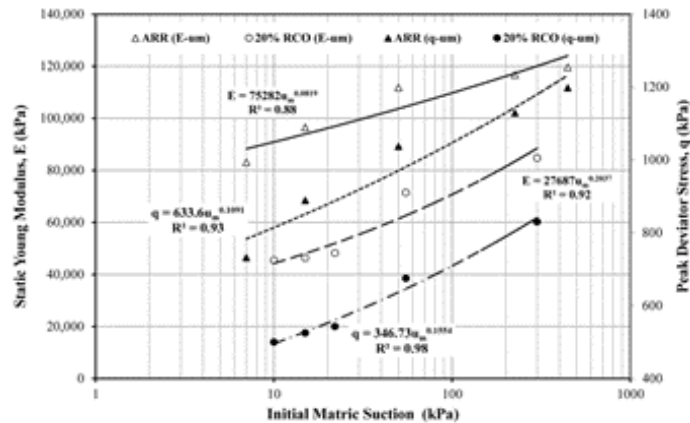
4.4 Influencia de la Succión Sobre el Módulo Elástico

Una de las variables más importantes en suelos no saturados es la succión, por tanto, entender y predecir su comportamiento es importante, debido a que gran cantidad de parámetros tanto hidráulicos y mecánicos dependen de ella.

Teniendo en cuenta lo anterior, se han realizado diversos estudios para analizar la influencia de la succión en los parámetros mecánicos. Tal es el caso del estudio ya mencionado en este artículo de Azam et al. (2013), en el cual se determinó la influencia del módulo de Young estático (monotónico) a partir del gráfico de tensión-esfuerzo después de hacer cualquier deformación. Como se evidencia en la Figura 28, se grafica las variaciones del desviador y el módulo de Young con succión matricial inicial. Por lo que se determina que, en general, la rigidez y la resistencia de los materiales mezclados aumentaron a medida que aumentaba la succión matricial inicial.

Figura 28

Variaciones del esfuerzo desviador máximo y el módulo de Young estático con succión matricial inicial para mezclas al 20 % a una presión de confinamiento de 75 kPa

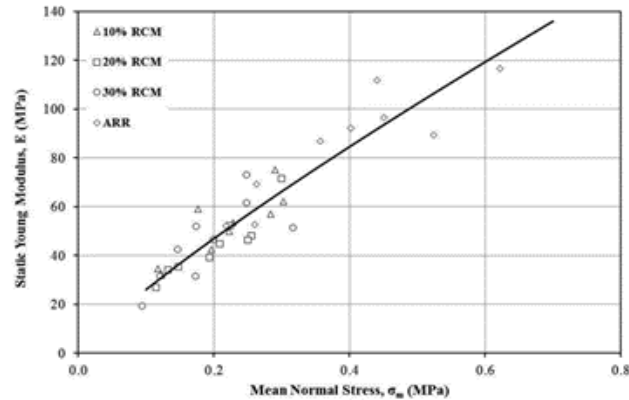


Nota. Tomado de *Model for prediction of resilient modulus incorporating matric suction for recycled unbound granular materials* por Azam et al. (2013).

El impacto de la tensión normal media en el módulo de Young se representa en la Figura 29 para todas las mezclas a diferentes presiones de confinamiento y contenidos de humedad. Como era de esperar, el módulo de Young estático aumentó a medida que aumentaba el esfuerzo normal promedio. Nuevamente, la relación de todos los datos en este gráfico se puede representar mediante una función potencia. El coeficiente de correlación para esta función de potencia fue 0,86. Esta función se puede implementar en elementos finitos.

Figura 29

Módulo de Young frente a la tensión normal media



Nota. Tomado de *Model for prediction of resilient modulus incorporating matric suction for recycled unbound granular materials* por Azam et al. (2013).

Con base a estos resultados, se determinó que la cohesión aparente y el ángulo de fricción de cada mezcla no es consistente con el contenido de humedad. Sin embargo, la fuerza de la tensión normal dada (p. ej., 100 kPa) disminuyó como se esperaba (Azam, et al., 2013). Las razones de esta aparente contradicción pueden ser la inclinación de la envolvente de falla de estos materiales y la pequeña gama de esfuerzos de confinamiento aplicados, lo que podría haber dado lugar a errores en la interpretación de los parámetros de fuerza.

Por otra parte, una investigación en la que se analiza la influencia de la succión en parámetros mecánicos es el adelantado por Pérez (2017), en el que se analizó la influencia de la succión sobre la resistencia al corte de un suelo laterítico, con alto contenido de arcilla. Un material de relleno para diversas estructuras geotécnicas tales como pavimentos de carreteras, terraplenes, vertederos de residuos, obras de construcción y recuperación de tierras en áreas tropicales y semi-tropicales. En este estudio se utilizó un aparato de corte simple, capaz de rotar los ejes de esfuerzos

principales durante la etapa de corte, mientras que la muestra de suelo es mantenida bajo condiciones de deformación plana.

Se concluye en el estudio que, en el perfil de suelo analizado, el cuarzo es el mineral primario, mientras que gibbsita, caolinita, illita, diásporo, anatasa y ferrihidrita son los minerales secundarios predominantes. A medida que aumenta la laterización, disminuyen los elementos sodio, potasio, calcio y magnesio, a diferencia del aumento en aluminio y hierro. La infiltración de agua influye en la meteorización, afectando los silicatos y lixiviando elementos como CaO, MgO, K₂O, Na₂O, mientras que Al₂O₃, Fe₂O₃ y TiO₂ se acumulan con ciclos de humedecimiento y secado.

5. Conclusiones

En conclusión, los mecanismos de succión son diversos y pueden ser utilizados para mejorar la resistencia, la estabilidad y la durabilidad de pavimentos. Los estudios realizados por diversos investigadores han permitido avanzar en el conocimiento de este fenómeno y en su aplicación en la práctica de ingeniería.

Según la propuesta de Meza (2012), la succión total en materiales granulares se puede descomponer en dos componentes principales: succión matricial (Ψ_m) y succión osmótica (π). La succión matricial está relacionada con la capilaridad y depende del tamaño de partículas, distribución de poros y grado de saturación. La succión osmótica se relaciona con la presencia de sales disueltas en el agua y requiere energía adicional para separar las moléculas de agua debido a la reducción de la presión de vapor.

El concepto de "curva característica de succión" se refiere a la relación entre el contenido de humedad y la succión en suelos, siendo fundamental en la mecánica de suelos y la geotécnica. La succión matricial, influenciada por la composición granulométrica y la estructura del suelo, es esencial en los problemas ingenieriles debido a los cambios ambientales. La curva de retención de agua (SWCC) se genera a partir del grado de saturación y la succión total, representando diferentes zonas: efecto de borde, entrada de aire, zona de transición y desaturación residual. La forma de la SWCC varía según la distribución de tamaños de partículas y poros. Para medir la SWCC se emplean métodos directos e indirectos, y se relaciona con la compactación y el módulo resiliente del suelo. La succión influye en la resistencia del suelo, siendo más prominente en materiales arcillo-limosos con baja saturación. En resumen, la curva de succión es crucial para comprender el comportamiento de los suelos en ingeniería civil.

El estudio realizado por Cao et al. (2020) se centra en la evaluación de la deformación permanente en la base granular de carreteras bajo cargas de tráfico cíclicas y condiciones de succión matricial. Se llevaron a cabo pruebas de carga cíclica en agregados de base contaminados con finos y se observó una relación no lineal entre la tensión axial permanente y la corriente de succión. Se encontró que la deformación axial permanente disminuye con la succión y que esta influencia es más pronunciada a mayores amplitudes de tensiones cíclicas. Además, se investigaron los efectos de la historia de succión y se determinó que la tensión permanente final disminuye con el aumento de la succión máxima histórica.

En el estudio de Arab et al. (2020), se examinó el impacto del nivel de compactación y las succiones matriciales iniciales en el rendimiento del pavimento utilizando materiales de desecho de construcción y demolición como capa base. Se encontró que el módulo resiliente aumenta con

el esfuerzo de compactación y el nivel de succión, y que el contenido de humedad también influye en el módulo resiliente. Se sugiere que el control estricto sobre la compactación y el contenido de humedad es importante al usar estos materiales como capa base.

Azam et al. (2013) propusieron un modelo para predecir el módulo resiliente incorporando la succión matricial en materiales granulares reciclados no ligados. Se desarrolló un modelo basado en cuatro términos y seis constantes que sigue la ley de potencias, y se encontró que funcionaba bien en una amplia gama de tensiones y estados de humedad.

Ba et al. (2013) estudiaron el efecto de la succión matricial en el módulo resiliente de capas base de áridos no consolidados. Se caracterizaron las curvas de retención de agua y succión matricial, y se estableció la relación entre el módulo resiliente y la succión matricial para diferentes materiales granulares reciclados. Se observó que los modelos empíricos no podían predecir completamente el comportamiento y que la succión matricial tenía un impacto significativo en el módulo resiliente.

En general, estos estudios destacan la importancia de considerar la succión matricial y la historia de succión en la evaluación del módulo resiliente y el comportamiento de la base granular en pavimentos. Los resultados sugieren que la succión matricial puede afectar significativamente la deformación permanente y el rendimiento del pavimento, y se proponen modelos para predecir estas influencias en diferentes condiciones de carga y humedad.

Referencias Bibliográficas

- Alfaro Soto, M. A. (2008). GEOTECNIA EN SUELOS NO SATURADOS. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas*, XXXII(125). Obtenido de https://www.accefyn.com/revista/Vol_32/125/471-482.pdf
- Arab, M. G., Arab, M. G., Alzara, M., Zeiada, W., Omar, M., & Azam, A. (2020). Combined effect of compaction level and matric suction conditions on flexible pavement performance using construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 261. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119792>
- Azam, A. M., Cameron, D. A., & Rahman, M. M. (2013). Model for prediction of resilient modulus incorporating matric suction for recycled unbound granular materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 50, 1143-1158. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/260061662>
- Azam, A. M., Cameron, D. A., Gabr, A., & Rahman, M. M. (2014). Matric Suction in Recycled Unbound Granular Materials. *Geotechnical Special Publication*. doi:10.1061/9780784413272.133
- Ba, M., Nokkaew, K., Fall, M., & Tinjum, J. M. (2013). Effect of Matric Suction on Resilient Modulus of Compacted Aggregate Base Courses. *Geotech Geol Eng*, 31, 1497–1510. doi:<https://doi.org/10.1007/s10706-013-9674-y>
- Bañón Blazquez, L., & Beviá García, J. F. (2000). *Manual de carreteras* (Vol. 1). Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A.
- Buckingham, E. (1907). Studies on the movement of soil moisture. *US Department of Agriculture, Bureau of Soils*, 38.

- Cao, Z., Zhang, Q., Cai, Y., Chen, J., Gu, C., & Wang, J. (2020). The effects of suction history on the cyclic behavior of unsaturated road base filling materials. *Engineering Geology*, 276. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105775>
- Colmenares Porras, C. A. (2021). Comportamiento dinámico y análisis de durabilidad de materiales granulares mejorados con emulsión asfáltica y materiales asfálticos reciclados. Universidad de los Andes.
- Fredlund, D. D. (2000). The Implementation of Unsaturated Soil Mechanics into Geotechnical Engineering Practice. *Canadian Geotechnical Journal*. doi:<http://dx.doi.org/10.1139/cgj-37-5-963>
- Fredlund, M. D., Wilson, G. W., & Fredlund, D. D. (2002). Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1103-1117. doi:<http://dx.doi.org/10.1139/t02-049>
- Fuentes, J., Ortega, P., & González, F. (2020). Estudio de succion en materiales granulares. *Revista de la construcción*, 1(19), 25-35.
- Houston, W. N., Dye, H. B., Zapata, C. E., Perera, Y. Y., & Harraz, A. (2006). Determination of SWCC Using One Point Suction Measurement and Standard Curves. *Unsaturated Soils* , 1482-1493. doi:[https://doi.org/10.1061/40802\(189\)123](https://doi.org/10.1061/40802(189)123)
- Lade, P., & Yamamuro, J. (1997). Succión y su medición en suelos no saturados: una revisión. *Revista de ingeniería geotécnica y geoambiental*, 4(123), 335-345.
- Likos, W., & Lu, N. (2004). Hysteresis of Capillary Stress in Unsaturated Granular Soil. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(6), 646-655. doi:[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2004\)130:6\(646\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:6(646))

- Meza Ochoa, V. E. (2012). SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS, DE LA INVESTIGACIÓN A LA CÁTEDRA UNIVERSITARIA. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 31, 23-38. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169524098003>
- Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos*. Universidad Católica de Colombia.
- Naranjo Henao, C. E. (2016). *Comportamiento Volumétrico de Suelos Compactados Derivados de Ceniza Volcánica*. Trabajo Final de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/56206/1053797784.2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- O'Loughlin, E., Kemner, K., & Burris, D. (2003). Effects of AgI, AuIII, and CuII on the reductive dechlorination of carbon tetrachloride by green rust. *Environmental science & technology*, 37(13), 2905-2912. doi:<https://doi.org/10.1021/es030304w>
- Orjuela Garzón, A. M. (2021). *Influencia de la succión en la compresibilidad de suelos no saturados en trayectorias*. Tesis de maestría en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80974>
- Perera, A., & Fredlund, D. (2005). A model for the soil-water characteristic curve of unsaturated soils 42(2), 628-640." *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 628-640.
- Pérez, G. (2017). *Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos*. Tesis en Magister en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogota D.C. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/62168/9434478.20>
- Rahimi, A., Rahardjo, H., & Leong, E.-C. (2015). Effects of soil-water characteristic curve and relative permeability equations on estimation of unsaturated permeability function. *Soils and Foundations*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2015.10.006>

- Rosetti, R., & Begliardo, H. (2005). *Generalidades sobre compactacion de suelos*. Universidad Tecnológica Nacional. Obtenido de <https://es.slideshare.net/yodimircaceressolier/generalidades-sobre-compactaciondesuelos>
- Umbarila Moreno, J. A., & Rodríguez Ramirez, J. C. (2019). Obtención de la curva de retención de agua en suelos caoliníticos con mixturas de óxido de hierro usando los métodos del papel filtro y placa de succión. Obtenido de <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/4914>
- Yaghoubi, E., Disfani, M., Arulrajah, A., & Kodikara, J. (2016). Impact of Compaction Methods on Resilient Response of Unsaturated Granular Pavement Material. *Procedia Engineering*, 143, 323–330. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.041>