



“PERMANENT DEFORMATION BEHAVIOR IN COARSE GRANULAR SOILS  
UNDER REPEATED LOADING IN THE ATLANTIC DEPARTMENT”

“COMPORTAMIENTO DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE EN SUELOS  
GRUESOS GRANULARES BAJO CARGAS REPETIDAS EN EL  
DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO”

JORGE LUIS BROCHERO CORTES

Artículo de Investigación.

Asesor, docente

Julián Vidal Valencia

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MEDELLÍN  
2024

# PERMANENT DEFORMATION BEHAVIOR IN COARSE GRANULAR SOILS UNDER REPEATED LOADING IN THE ATLANTIC DEPARTMENT.

*Jorge Luis Brochero Cortes \**

*\*Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Maestría en Ingeniería, Universidad EAFIT, Carrera 49 N°  
7Sur -50, Medellín, Colombia  
Correo electrónico: jlbrocherc@eafit.edu.co  
<https://orcid.org/0009-0002-5071-3212>.*

*Recibido 06 diciembre 2024; aceptado 26 febrero 2025*

**Resumen** — *Este artículo busca analizar el comportamiento de resultados en suelos gruesos granulares no ligados (SGGNL) tipo subbase de acuerdo con el concepto del Shakedown, los ensayos físicos y dinámicos para determinar la respuesta de este material mediante la prueba triaxial de carga repetida para dos tipos de materiales de igual especificación, pero con características diferentes en sus resultados, estableciéndose las condiciones de ensayo, especialmente en las de volumen para todas las muestras preparadas sean las mismas, los estados de esfuerzos, el efecto de la saturación que va desde un 50 hasta el 100% y someterlas a un número limitado de 5000 ciclos. La influencia de estas en relación con algunas características físicas, tales como relación de vacíos, granulometría. Se analiza este tipo de respuesta bajo los criterios del Shakedown, confirmando que este es válido para evaluar el comportamiento que juega un papel importante en el funcionamiento de la estructura de pavimento y así conocer los parámetros reales de deformación permanente a lo que puede someterse este tipo de materiales y evitar que estos lleguen a su colapso. Los resultados del comportamiento con diferentes grados de saturación causan un impacto sobre las muestras, debido a que las deformaciones permanentes se incrementan directamente proporcional por este efecto al estar sometidos a cargas cíclicas clasificándose sobre el rango de la línea A ó 1 (Plastic Shakedown), por lo que es un material con mayor respuesta sin llegar al colapso.*

**Palabras clave**— *Concepto Shakedown, Deformación permanente, Materiales grueso granulares no ligados, Prueba Triaxial de cargas repetidas.*

**Abstract** — *This article aims to analyze the behavior of results in coarse granular unbound soils (SGGNL) type subbase according to the Shakedown concept, the physical and dynamic tests to determine the response of this material by means of the triaxial test of repeated load for two types of materials of equal specification, but with different characteristics in their results, establishing the test conditions, especially in the volume for all the prepared samples to be the same, the stress states, the effect of saturation ranging from 50 to 100% and subjecting them to a limited number of 5000 cycles. The influence of these in relation to some physical characteristics, such as void ratio, granulometry. This type of response is analyzed under the Shakedown criteria, confirming that it is valid to evaluate the behavior that plays an important role in the operation of the pavement structure and thus know the real parameters of permanent deformation to which this type of materials can be subjected and prevent them from collapsing. The results of the behavior with different degrees of saturation cause an impact on the samples, because the permanent deformations increase directly proportional to this effect when subjected to cyclic loads, being classified on the range of line A or I (Plastic Shakedown), making it a material with a greater response without collapsing.*

**Keywords**— *Shakedown concept, Permanent Deformation, Unbound coarse granular materials, triaxial test of repeated loads.*

## 1. Introducción

Los materiales granulares no ligados, tanto finos como gruesos desempeñan un papel fundamental en la construcción de carreteras, especialmente en el ámbito de la geotecnia vial y la ingeniería de pavimentos. Por lo tanto, resulta esencial conocer sus características físicas y mecánicas especialmente en lo que se refiere a la resistencia al corte y a las deformaciones, dado que se encuentran entre la subrasante y la capa de rodadura. Esta información es crucial para entender su comportamiento bajo las cargas de tráfico, las cuales deben proteger las capas inferiores de deformaciones permanentes excesivas. Así, es vital estudiar cómo estos materiales responden ante dichas cargas, lo que beneficiará a los especialistas en la elaboración de diseños y en el mantenimiento del pavimento, asegurando su seguridad, durabilidad y rentabilidad [1].

Las cargas han evolucionado con el aumento del tráfico, lo que hace necesario comprender más a fondo la deformación permanente en suelos gruesos granulares, con el fin de prevenir la aparición de surcos o huellas que podrían afectar el confort y la vida útil de la carretera. [2],[3], [4]. Los materiales SGGNL son cruciales por su rigidez, ya que soportan los esfuerzos en la capa de rodadura y protegen a la subrasante de la deformación permanente, evitando su colapso, [5], [6], [7], [8].

En Colombia, los materiales granulares en dos (02) canteras del departamento del Atlántico, se utilizan para la construcción de estructuras de pavimento. Aunque cumplen con las especificaciones técnicas vigentes, estos materiales muestran variaciones en propiedades físicas como densidad, granulometría y grado de saturación, lo que impacta en su respuesta a las cargas dinámicas. Diversos factores, como los ciclos de carga, el estado de esfuerzos y la frecuencia, afectan la deformación permanente, aunque algunos de estos aspectos han sido poco investigados [9], [10] y aun menos en nuestro país.

Es bien conocido que la capa de rodadura es la más importante, ya que soporta directamente las cargas de tráfico y ha sido objeto de numerosas pruebas para evaluar su comportamiento. Investigaciones recientes se han centrado en pavimentos permeables [11], [12], sí como en las condiciones dos (02)

canteras ambientales y su capacidad para proteger las capas subyacentes (MGGNL) que son de menor calidad [13], [14].

La geología de los materiales es variable, lo que hace necesario iniciar estudios en cada uno, tal como se ha hecho en otros países, para evaluar el comportamiento de la deformación permanente [15]. También se han analizado otros tipos de comportamiento, como los efectos de la succión matricial en suelos granulares saturados y no saturados [16] [17], así como la implementación de criterios de pruebas de vibración y la definición de nuevos límites de rango [18] para su caracterización [18].

La mayoría de las investigaciones sobre materiales granulares en ingeniería de pavimentos se centran en presiones de confinamiento constantes durante las pruebas triaxiales cíclicas; sin embargo, el uso de presiones variables también es pertinente [19]. Además, la variación en la frecuencia de carga puede influir en el comportamiento de estos materiales durante dichas pruebas [20].

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la respuesta de estos materiales a cargas repetitivas en relación con su deformación permanente, utilizando la teoría del Shakedown, como han hecho investigadores en otros países [21]. Esto se logrará a través de ensayos triaxiales bajo carga repetida, que son adecuados para obtener datos sobre este tipo de deformación y para analizar los resultados.

La teoría del Shakedown categoriza el comportamiento de los materiales granulares en cuatro tipos: Shakedown elástico, Shakedown plástico, fluencia plástica y colapso incremental [5], [4].

Los resultados obtenidos no solo son relevantes para el diseño y mantenimiento de carreteras, sino que también permiten adaptar parámetros internacionales a condiciones locales. Cabe destacar que existe escasa investigación a nivel local sobre deformación permanente (no recuperable), en contraste con la deformación resiliente (recuperable) bajo cargas cíclicas [6]. La deformación permanente es un parámetro crucial que mejorará la seguridad y sostenibilidad de la infraestructura vial.

La relevancia de esta investigación es amplia, beneficiando tanto a la ingeniería especializada en materiales y pavimentos como a la comunidad universitaria en sus procesos formativos, contribuyendo así a establecer políticas institucionales que fomenten un mayor conocimiento sobre nuestros materiales y su caracterización dinámica (deformación permanente), aplicándolos de forma continua en nuestros diseños.

## **2. Teoría del Shakedown**

Los diseños de pavimentos buscan que los materiales sean resistentes a las deformaciones permanentes provocadas por las cargas de tráfico, evitando así llegar a la falla [5].

Sharp (1983) introdujo esta teoría para analizar el comportamiento de la deformación permanente en los materiales que conforman una estructura de pavimento [4].

Este concepto generalmente se basa en las teorías de límites superior e inferior, que incorporan los estados de tensión límite del Shakedown apropiados, evitando llegar al estado máximo que significaría la falla del material, lo que permite calcular la capacidad de carga de la estructura sin sufrir deformaciones plásticas excesivas [5].

Cada capa de un pavimento experimenta constantemente una combinación de tensiones de magnitudes variables, dependiendo de la capa evaluada y del desplazamiento radial de la carga de la rueda [22].

Paute et al (1993) propusieron un nuevo enfoque para expresar la influencia del número de cargas, asumiendo que la deformación permanente aumenta asintóticamente hacia un valor límite que es

función de las tensiones asociadas a la condición de falla estática del material, expresándose con la siguiente ecuación 1 (Paute *et al*) citado por estos autores [23], [24],[25] :

$$\epsilon_{1,p}^* = A \cdot \left( 1 - \left( \frac{N}{100} \right)^{-B} \right) \quad (1)$$

Donde,

$\epsilon_{1,p}^*$ = Deformación permanente acumulada después de los 100 ciclos de carga (va hacia un valor límite).

A y B= Parámetros de regresión

N = Numero de ciclos, aumentando hacia el infinito.

El parámetro “A” es considerado un valor límite de la deformación permanente total (Paute *et al*) [24].

Existen múltiples modelos para calcular la deformación permanente, así como diversos parámetros que influyen en variables como la diversidad del suelo, geología, vegetación e hidrología de la zona a estudiar [26], [11].

La deformación permanente para suelos gruesos granulares no ligados (SGGNL) comprende dos tipos: la elástica, que caracteriza la deformación resiliente ( $\epsilon_r$ ) y la plástica definida por la deformación permanente ( $\epsilon_p$ ), como se puede ilustrar en la figura 1. En este comportamiento la proporción de la deformación permanente ( $\epsilon_p$ ) tiende a superar la asociada con la deformación resiliente ( $\epsilon_r$ ) en los ciclos de carga iniciales, pero a medida que aumenta el número de ciclos, las deformaciones finalmente alcanzan un equilibrio elástico ( $\epsilon \approx \epsilon_r$ ) [27].

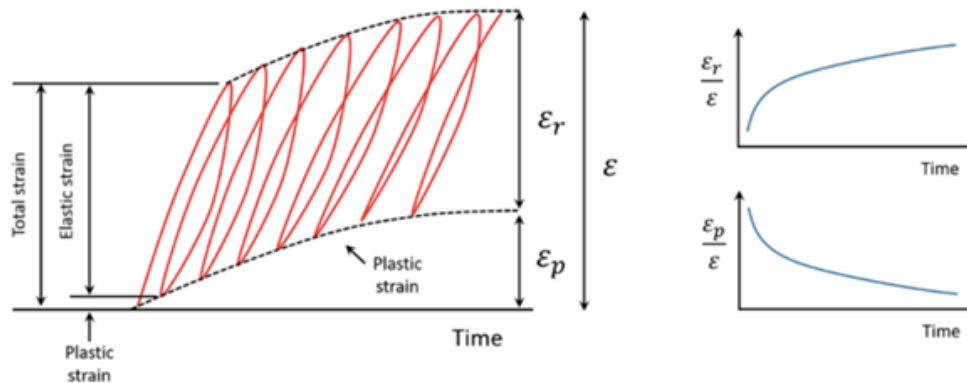


Figura 1. Comportamiento de la deformación resiliente y permanente sometido a cargas cíclicas.

Fuente: Endrick Pérez-González, 2024.

## 2.1. Comportamiento de la deformación permanente de acuerdo con la teoría del Skakedown.

Los materiales granulares, en este caso los SGGNL, no pueden clasificarse únicamente en función de su respuesta estructural bajo cargas cíclicas, por lo que se utiliza el criterio de Werkmeister, que

distingue tres categorías de respuesta del material en relación con la deformación permanente acumulada [5], [23],[28], [29], [30], [31].

### 2.1.1. Plastic Shakedown Range.

Como puede observarse en la figura 5, se grafica el número de ciclos con respecto a la deformación permanente para un material en rango 1. La línea 1 muestra la respuesta plástica, donde la tasa de deformación permanente acumulada disminuye rápidamente hasta alcanzar un estado de equilibrio. La respuesta es completamente resiliente y no genera deformaciones permanentes, lo que indica que el material no llega a fallar [5], [23].

### 2.1.2. Plastic Creep.

Este tipo de deformación, representado por la línea 2, correspondiente al rango 2, se da cuando la tasa de deformación permanente acumulada es decreciente o constante. Aunque la deformación no es totalmente resiliente, la deformación permanente es aceptable. En este caso, el material podría alcanzar la falla tras un gran número de ciclos de carga [23], como se ilustra en la figura 5.

### 2.1.3. Incremental Collapse.

La línea 3 de la figura 5, correspondiente al rango 3, muestra un tipo de respuesta donde la deformación permanente acumulada aumenta rápidamente, indicando que la falla ocurre tras un número bajo de ciclos de carga [23].

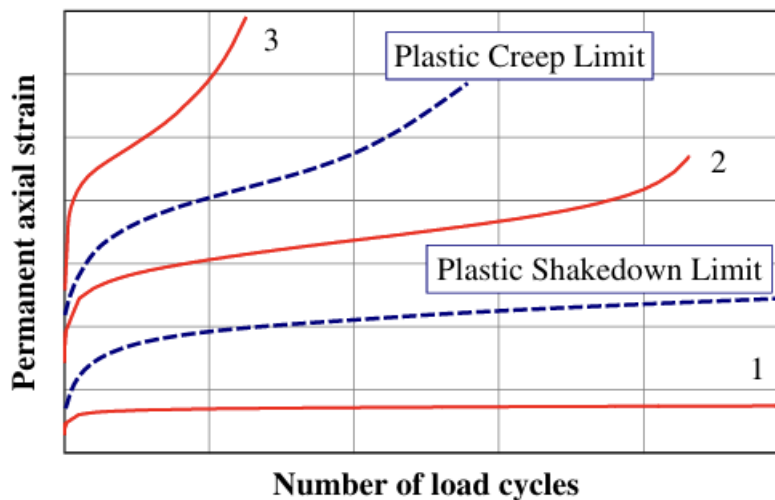


Figura 6. Comportamiento típico de la deformación permanente bajo cargas cíclicas de SGNL.

Fuente: G. Cerni et al, 2012.

Estos comportamientos sugieren la existencia de límites que definen los estados de tensión en los que cambia el tipo de respuesta de deformación permanente [23]. Se propone un método práctico para definir estos límites, que consiste en realizar varios ensayos triaxiales cíclicos a niveles crecientes de esfuerzo desviador ( $\sigma_d - \sigma_3$ ) y luego analizar las deformaciones permanentes acumuladas de 3000 a 5000 ciclos de carga, conforme a la norma europea [23] y los resultados de otras investigaciones [32].

### 3. Metodología.

#### 3.1. Materiales de Estudio.

Se trabajó con dos tipos de suelos granulares gruesos no ligados (SGGNL) a las que vamos a identificar como Material A y B. Aunque pertenecen a la misma región, presentan notables diferencias en granulometría, densidad seca máxima, humedad óptima y CBR, como se evidencia en los resultados de las pruebas fisicomecánicas realizadas de acuerdo con las especificaciones técnicas del INVIAS 2022 para una subbase granular, ambos cumplieron como se puede evidenciar en las siguientes gráficas y tabla resumen:

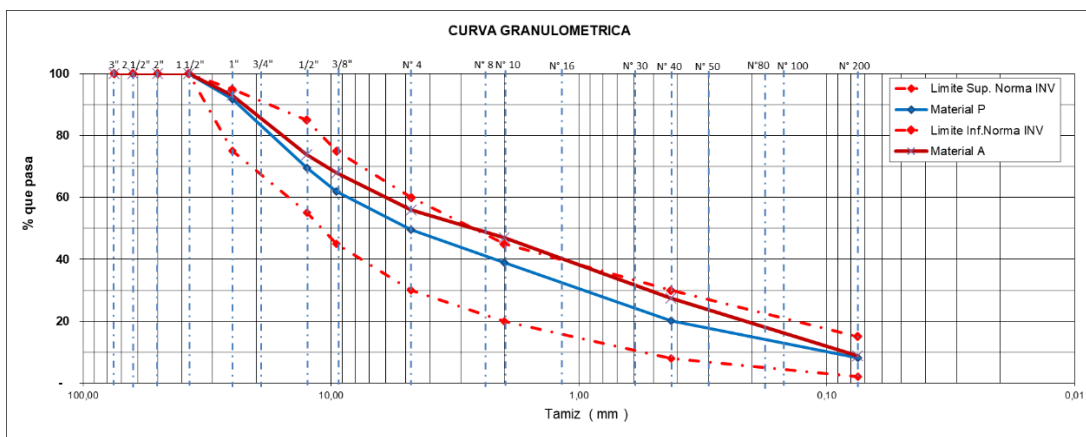


Figura 2. Distribución granulométrica de los MGGNL investigados.

Fuente: Propia

El ensayo de Proctor modificado, ilustrado en la figura 3a y 3b, permite determinar la densidad seca máxima y humedad óptima para ambos materiales, cuyos resultados se presentan en el cuadro 1.

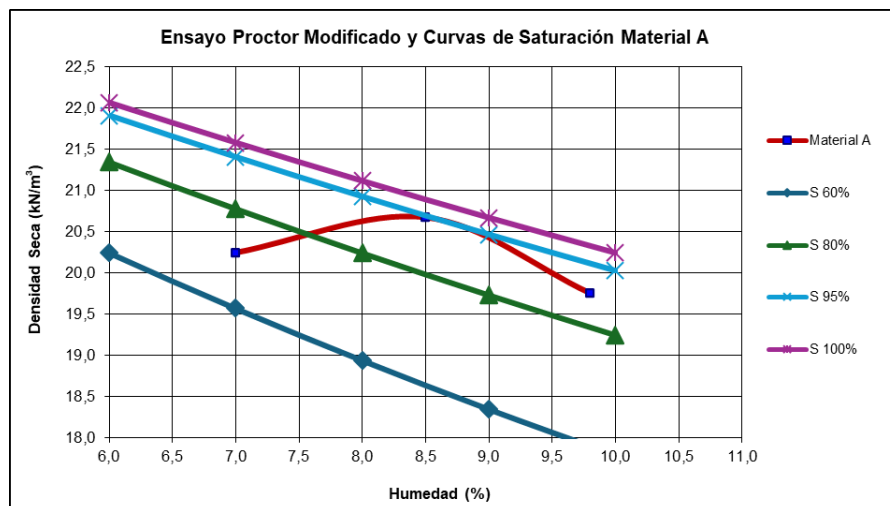


Figura 3a. Resultados ensayo de proctor modificado y curvas de saturación Material A.

Fuente: Propia

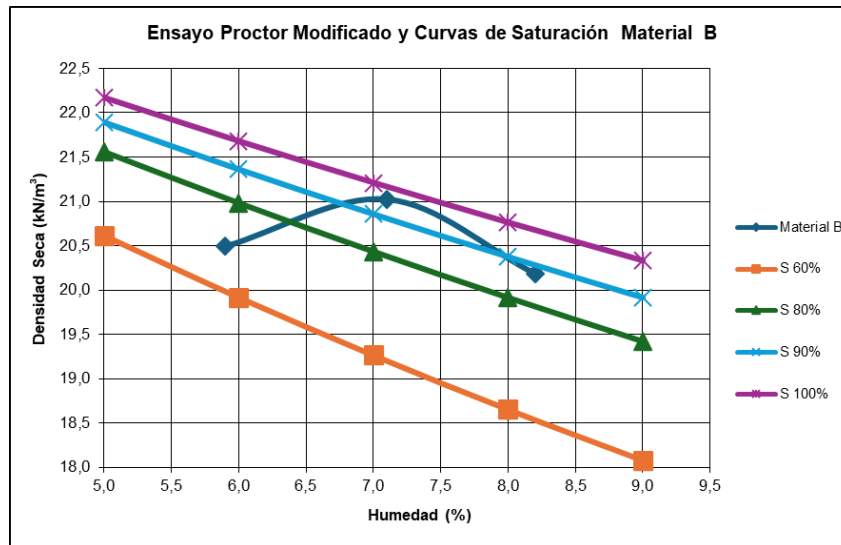


Figura 3b. Resultados ensayo de proctor modificado y curvas de saturación Material B.

Fuente: Propia

Tanto la densidad seca máxima y humedad óptima tienen una variación de 0.3 kN/m<sup>3</sup> y 1.5% respectivamente, a pesar de que ambos son clasificados como SGGNL tipo subbase. El grado de saturación para la humedad óptima en el material A está al orden del 95% y para el material B en un 96.5%.

Identificación Subbase	Clasificación SUCS	Porcentaje de Finos (%)	Índice de Plasticidad (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	% Woptima	Gs	CBR (%)
Material A	GM	14,1	NP	20,7	7	2,60	68,0
Material B	GW-GM	9,1	NP	21	8,5	2,55	57,0

Tabla 1. Resultados caracterización fisicomecánica de SGGNL investigados.

Fuente: Propia

### 3.2. Preparación de las Muestras.

Un factor relevante para la preparación de las muestras en ambos materiales es la conservación de la misma relación de vacíos, de acuerdo con la tipología de los resultados de densidad seca máxima y humedad óptima de cada material, se realizaron las respectivas muestras o probetas para diferentes grados de saturación, buscando establecer el condicionamiento adecuado. Las muestras se compactaron al 95% de su densidad seca máxima, variando el grado de saturación entre el 40% y el 100%. Se moldearon cilindros de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro, garantizando densidad uniforme. Estas muestras fueron sometidas a pruebas triaxiales cíclicas en el laboratorio de la Universidad EAFIT.

En la tabla 2, se puede observar algunos datos estadísticos (promedio, desviación estándar, coeficiente de variación) nos indican en función con la relación de vacíos, la porosidad y la densidad seca máxima condicionadas presentan poca variación entre estas características, que nos da a entender la homogeneidad de los datos en el procesamiento de las muestras.

Tipo de Material	e	$\bar{e}$	Varianza ( $S^2$ )	Desviación Estándar ( $\sigma$ )	Coeficiente de Variación (CV)	Rango R	Porosidad ( $\eta$ )
Material A	0,34	0,33	0,0001	0,0108	0,033	0,025	0,25
Material B	0,26	0,25	0,0002	0,0143	0,057	0,015	0,21

Tabla 2. Resultados estadísticos con respecto a la relación de vacíos y porosidad de SGGNL investigados.  
Fuente: Propia

Se pudo analizar y observar la influencia del grado de saturación en relación con la variabilidad, por mínima que sea, en la altura de las muestras preparadas, la cual tiende a disminuir a medida que la altura aumenta, como se muestra en la figura 4.

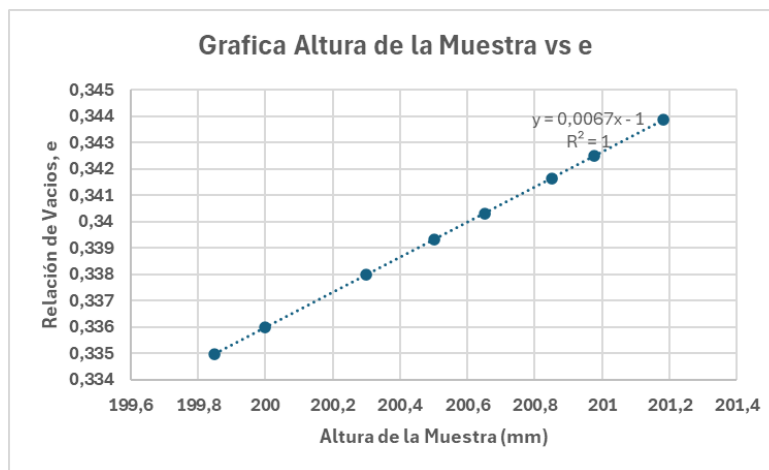


Figura 4. Variación del grado de saturación con respecto a la altura de la SGGNL investigado.  
Fuente: Propia.

Otro análisis revela la relación entre la variación de vacíos y la altura de la muestra en pequeñas proporciones, mostrando una tendencia inversa respecto al grado de saturación. Esta relación de vacíos es proporcional al incremento de la altura, como se ilustra en la figura 5.

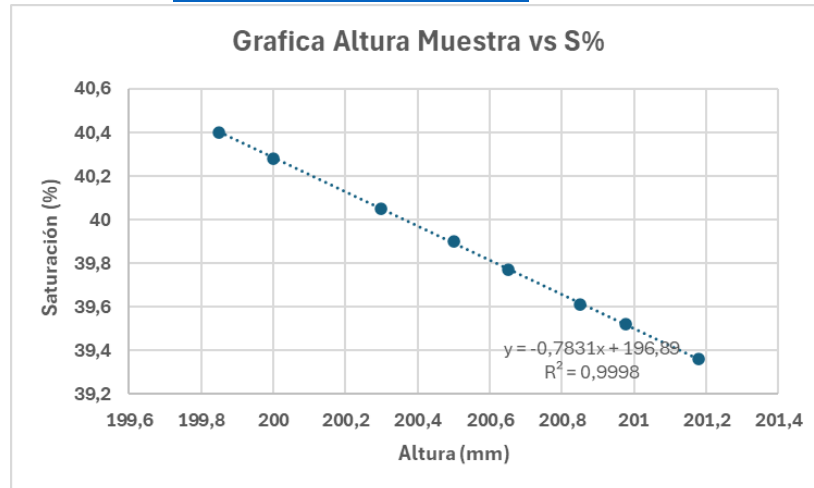


Figura 5. Variación de la relación de vacíos con respecto a la altura de la SGGNL investigado.  
Fuente: Propia.



Figura 6. Proceso fabricación de probetas a diferentes grados de saturación del SGGNL investigados.  
Fuente: Propia

### 3.3. Procedimiento Experimental.

El equipo triaxial de cargas cíclicas, que simula las cargas de tráfico a las que es sometida la estructura del pavimento, es el más adecuado para llevar a cabo este ensayo, ya que permite observar el comportamiento de la deformación permanente en un material granular [7].

El equipo triaxial de carga repetida incluye un dispositivo de carga neumática principal y una cámara de presión extraíble. La carga axial aplica tensiones a las muestras, generando deformaciones verticales y radiales, y consta de dos LVDT, tanto internos como externos [5]. Este equipo permite una aplicación constante del esfuerzo de confinamiento y una carga axial cíclica durante toda la prueba. Los LVDT miden las deformaciones axiales, y los datos de carga y deformación son almacenados mediante un programa de adquisición de datos configurado en el equipo. Todas las muestras se realizaron en condiciones de drenaje [23], como se muestra en la figura 7.

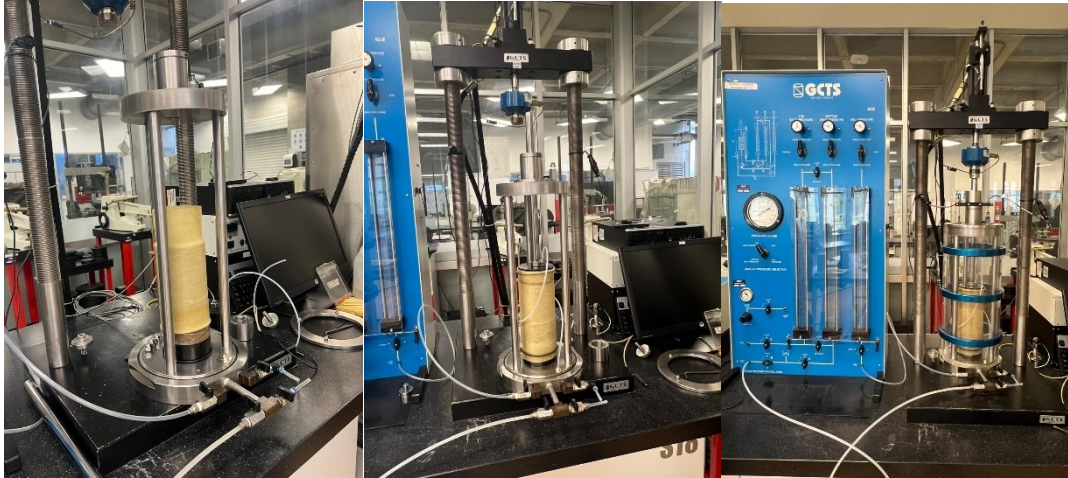


Figura 7. Ensayos de deformación permanente en maquina triaxial de cargas cíclicas a MGGNL investigadas. Fuente: Propia.

Se simularon condiciones con un esfuerzo desviador  $\sigma_d$  de 100 kPa y un esfuerzo de confinamiento  $\sigma_3$  de 50 kPa, cumpliendo con la relación de esfuerzo dentro de los parámetros establecidos ( $\sigma_d/\sigma_3$  entre 0.5 y 11). Se utilizó una frecuencia de 5 Hz, un número máximo de ciclos de 5000 y se aplicó una onda sinusoidal [5], [23]. Durante las pruebas, se registró la deformación permanente y se evaluó el comportamiento en relación con el número de ciclos y el grado de saturación.

#### 4. Resultados.

##### 4.1. Comportamiento según el número de ciclos.

El análisis demostró que la deformación permanente en ambos materiales aumenta de manera proporcional al número de ciclos de carga. Sin embargo, dentro del rango evaluado (5000 ciclos), ambos materiales se clasificaron como Plastic Shakedown, lo que indica que mantienen un estado estable sin llegar al colapso como puede ilustrarse en las figuras 8 y 9.

##### 4.2. Influencia del grado de saturación.

Los resultados mostraron que la saturación impacta significativamente. A medida que el grado de saturación aumenta, también lo hace la deformación permanente. Este comportamiento subraya la importancia de controlar el drenaje y las condiciones de humedad durante la construcción y el mantenimiento de carreteras.

En la figura 8 y 9 se puede observar el comportamiento de la deformación permanente acumulada en función del número de ciclos a diferentes grados de saturación para el material A, lo que es proporcional incremento de los ciclos de carga en las muestras ensayadas.

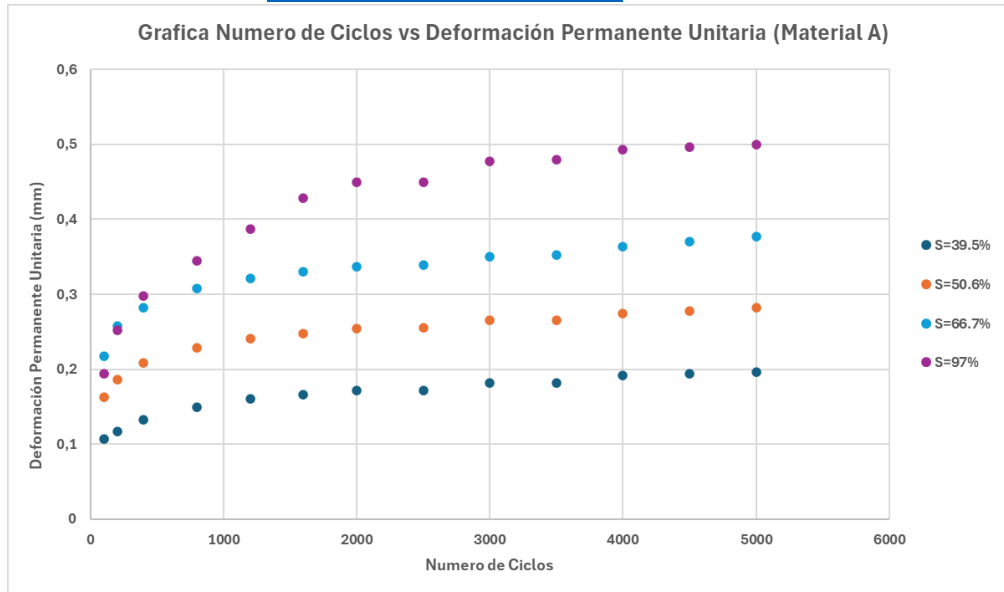


Figura 8. Comportamiento de la deformación permanente en función del número de ciclos de carga del material A con variación del grado de saturación en las SGGNL.

Fuente: Propia

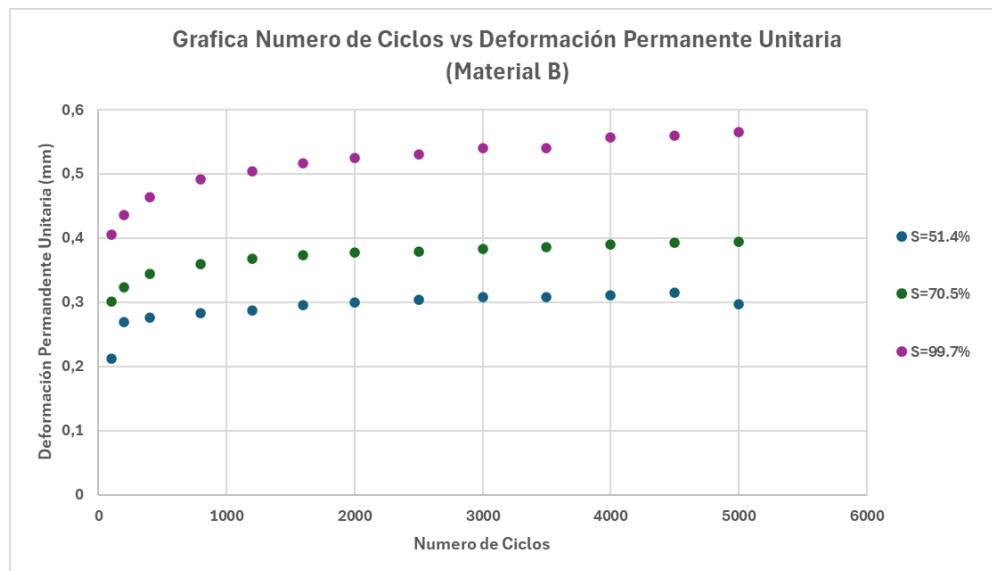


Figura 9. Comportamiento de la deformación permanente en función del número de ciclos de carga del material B con variación del grado de saturación en las SGGNL.

Fuente: Propia

La figura 10, muestra que para el material A, al graficar la deformación permanente acumulada en función del grado de saturación, esta tiende a ser mayor conforme se incrementa el grado de saturación.

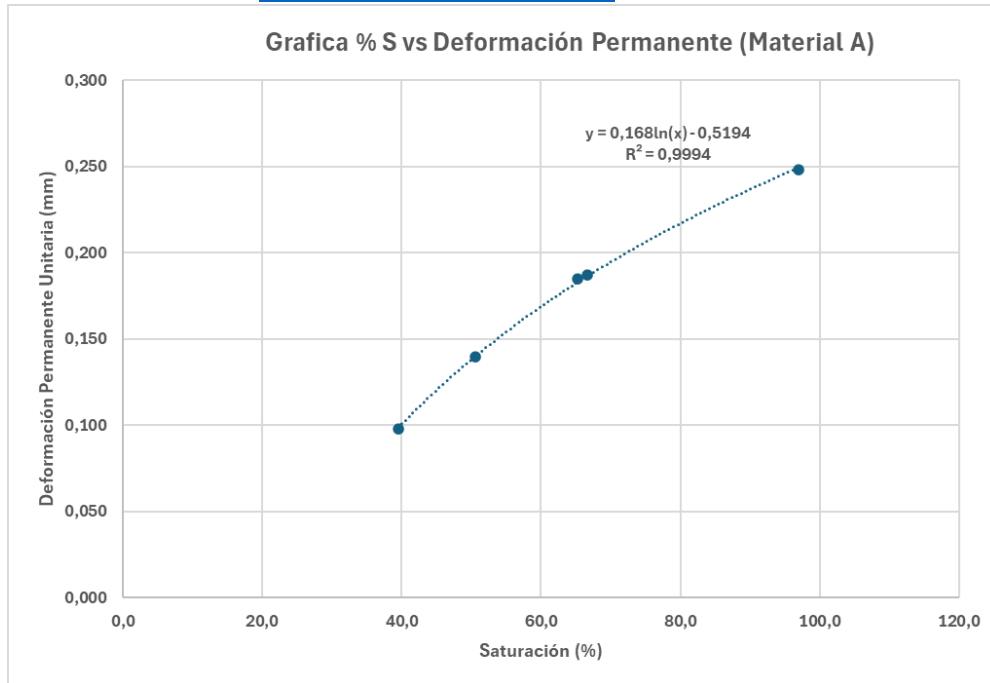


Figura 10. Comportamiento de la deformación permanente en función del número del grado de saturación para el material A con variación del grado de saturación en las SGGNL.

Fuente: Propia

En la figura 11, el material B presenta un comportamiento similar, con una leve diferencia en la deformación al 100% de saturación.

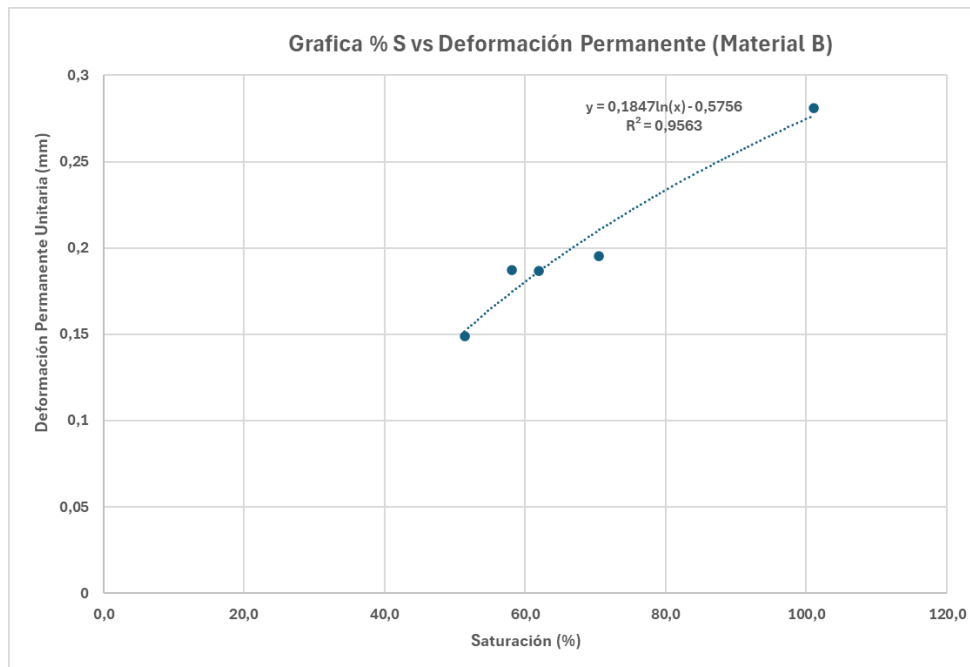


Figura 11. Comportamiento de la deformación permanente en función del número del grado de saturación para el material B con variación del grado de saturación en las SGGNL.

Fuente: Propia

### 4.3. Comparación entre materiales.

Aunque ambos materiales cumplen con las especificaciones técnicas INVIAS 2022 para una subbase, el Material B presentó deformaciones ligeramente mayores, a pesar de tener una densidad seca superior y relación de vacíos menor en comparación con el Material A, por lo que debe analizarse otras características como es la granulometría donde la del material A es mucho más fino que el material B y como se agrupan estas partículas en su estructura, pero también el agua que llena estos vacíos antes de ser drenada en su totalidad aporta en la respuesta del material. Esto enfatiza la necesidad de realizar caracterizaciones detalladas de cada material antes de su uso en pavimentos.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones.

Con base en el análisis del comportamiento de la deformación permanente en suelos gruesos granulares tipo subbase bajo cargas cíclicas, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- I. **Validación del enfoque del Shakedown:** La teoría del Shakedown presentó resultados coherentes para su clasificación y se demostró ser adecuada para evaluar el comportamiento de los SGGNL bajo cargas repetitivas. Este enfoque es útil para garantizar que los materiales seleccionados sean capaces de resistir las deformaciones permanentes sin llegar al colapso.
- II. **Relación del grado de saturación con la humedad óptima:** Ambos materiales (A y B) de acuerdo con la humedad óptima, están al orden del 95%, 96.5% de saturación respectivamente, siendo la del material A coherente con respecto al resultado de humedad final de saturación al 100%, debido a que por ser mas fina y su relación de vacíos mucho mayor pudo retener mayor cantidad de agua y su humedad fue mucho mayor que la del material B.
- III. **Comportamiento de la deformación permanente con respecto al CBR:** los resultados de CBR para cada material al ser sometidas a ciclos de carga nos indicaron que a mayor porcentaje de este la deformación tiende a ser menor como respuesta, por lo que este es un parámetro que nos puede indicar como puede ser el comportamiento para este tipo de SGGNL.
- IV. **Resultados de deformación permanente:** Al someter los materiales a 5000 ciclos de carga, la deformación permanente para la relación de la saturación con la humedad óptima se estima al orden de 0.24 mm para el material A y para el material B de 0.265 mm. Este valor es muy importante para tener un conocimiento mas claro de la deformación máxima sin llegar al a la falla y de esta manera garantizar un buen comportamiento de la estructura al diseñarse.
- V. **Impacto del grado de saturación:** La saturación desempeña un papel crítico en la deformación permanente. Se recomienda implementar medidas para controlar la humedad y el drenaje durante el diseño y construcción de carreteras, especialmente en zonas húmedas.
- VI. **Diferencia entre materiales locales:** A pesar de que los materiales estudiados provienen de la misma región, presentan variaciones significativas en sus características fisicomecánicas y la deformación permanente es mucho mayor en el material B. Esto subraya la necesidad de realizar ensayos específicos para cada material y sobre estos analizar la influencia de estos en el comportamiento de la deformación permanente.
- VII. **Influencia de la relación de vacíos:** La relación de vacíos es fundamental al alcanzar el 100% de saturación. Aunque el material A presenta inicialmente una mayor deformación permanente, al final su resultado es menor en comparación con el material B.

- VIII. **Comportamiento de la saturación con respecto a la altura:** El grado de saturación, la relación de vacíos y la porosidad son muy sensibles a la variabilidad en la altura de las muestras, mostrando una tendencia que afecta de manera directa estas características, por lo que se requiere precaución en este proceso, siendo este un factor muy importante.
- IX. **Análisis estadístico y graficas:** La tendencia reflejada en las gráficas, como los resultados estadísticos nos llevan a concluir la homogeneidad de las muestras realizadas, especialmente en la condición que se proyecta en la densidad y relación de vacíos.
- X. **Futuras investigaciones:** Se sugiere que investigaciones posteriores amplíen el estudio a otros tipos de materiales y condiciones climáticas, así como realizar más pruebas que involucren diferentes niveles de esfuerzo y ciclos de carga. Esto permitirá generar datos locales más robustos para mejorar los diseños de pavimentos.

## 6. Referencias Bibliográficas

- [1] K. Siripun, P. Jitsangiam, and H. Nikraz, "Permanent deformation behaviour and model of crushed rock base," *Australian Journal of Civil Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 41–52, Jan. 2010, doi: 10.1080/14488353.2010.11463955.
- [2] Z. Cao, J. Chen, Y. Cai, C. Gu, and J. Wang, "Effects of moisture content on the cyclic behavior of crushed tuff aggregates by large-scale tri-axial test," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 95, pp. 1–8, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.01.027>.
- [3] C. Yuanqiang, C. Jingyu, C. Zhigang, G. Chuan, and W. Jun, "Influence of Grain Gradation on Permanent Strain of Unbound Granular Materials under Low Confining Pressure and High-Cycle Loading," *International Journal of Geomechanics*, vol. 18, no. 3, p. 04017156, Mar. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001054.
- [4] G. ; Z. M. ; L. Q. ; Z. J. Liu, "A New Approach for Classifying the Permanent Deformation Properties of Granular Materials under Cyclic Loading," *Materiales*, p. 21, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16062141>.
- [5] S. Werkmeister, A. R. Dawson, and F. Wellner, "Permanent Deformation Behavior of Granular Materials and the Shakedown Concept," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1757, no. 1, pp. 75–81, Jan. 2001, doi: 10.3141/1757-09.
- [6] F. Gu, Y. Zhang, X. Luo, H. Sahin, and R. L. Lytton, "Characterization and prediction of permanent deformation properties of unbound granular materials for Pavement ME Design," *Constr Build Mater*, vol. 155, pp. 584–592, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.116.

- [7] A. Alnedawi, B. Kafle, S. Ullah, and W. Kerr, "Investigation of non-standard unbound granular materials under cyclic loads: experimental and regression analyses," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 23, no. 9, pp. 2998–3010, Jul. 2022, doi: 10.1080/10298436.2021.1877291.
- [8] J. Uzan, "Permanent Deformation of a Granular Base Material," *Transp Res Rec*, vol. 1673, no. 1, pp. 89–94, Jan. 1999, doi: 10.3141/1673-12.
- [9] A. Alnedawi, K. P. Nepal, and R. Al-Ameri, "Effect of loading frequencies on permanent deformation of unbound granular materials.," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 22, no. 8, pp. 1008–1016, Jul. 2021, doi: 10.1080/10298436.2019.1656807.
- [10] Y. Cai, Q. Sun, L. Guo, C. H. Juang, and J. Wang, "Permanent deformation characteristics of saturated sand under cyclic loading," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 52, no. 6, pp. 795–807, Feb. 2015, doi: 10.1139/cgj-2014-0341.
- [11] F. Zhou and T. Scullion, "Discussion: Three Stages of Permanent Deformation Curve and Rutting Model," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 251–260, Dec. 2002, doi: 10.1080/1029843021000083676.
- [12] G. Ma, H. Li, B. Yang, H. Zhang, and W. Li, "Investigation on the deformation behavior of open-graded unbound granular materials for permeable pavement," *Constr Build Mater*, vol. 260, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119800.
- [13] A. S. El-Ashwah, E. Mousa, S. M. El-Badawy, and M. A. Abo-Hashema, "Advanced characterization of unbound granular materials for pavement structural design in Egypt.," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 476–488, Feb. 2022, doi: 10.1080/10298436.2020.1754416.
- [14] A. C. R. Guimarães, L. M. G. da Motta, and C. D. Castro, "Permanent deformation parameters of fine – grained tropical soils," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, no. 7, pp. 1664–1681, Oct. 2019, doi: 10.1080/14680629.2018.1473283.
- [15] A. V Sagrilo *et al.*, "Contribution to resilient and permanent deformation investigation of unbound granular materials with different geological origins from Rio Grande do Sul, Brazil," *Soils and Rocks*, vol. 46, no. 3, 2023, doi: 10.28927/SR.2023.009822.
- [16] C. Gu, Y. Zhan, J. Wang, Y. Cai, Z. Cao, and Q. Zhang, "Resilient and permanent deformation of unsaturated unbound granular materials under cyclic loading by the large-scale triaxial tests," *Acta Geotech*, vol. 15, no. 12, pp. 3343–3356, 2020, doi: 10.1007/s11440-020-00966-0.

- [17] W.-B. Chen, W.-Q. Feng, and J.-H. Yin, "Effects of water content on resilient modulus of a granular material with high fines content," *Constr Build Mater*, vol. 236, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117542.
- [18] M. J. Ribeiro Araújo, S. H. de Araújo Barroso, F. de Assis Franco Vieira, and A. J. Alves Ribeiro, "Definition of new stopping criteria for the characterization of permanent deformation of granular materials," *Transportation Geotechnics*, vol. 44, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.trgeo.2023.101159.
- [19] T. W. T. T. A. L. H. Rondon, "Comportamiento de un material granular no tratado en ensayos triaxiales cíclicos con presión de confinamiento constante y variable," *Materiales*, p. 12, 2008.
- [20] N. Li, B. Ma, H. Wang, J. Tang, X. Wang, and Z. Shao, "Influence of loading frequency on mechanical properties of unbound granular materials via repeated load tests," *Constr Build Mater*, vol. 301, p. 124098, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124098>.
- [21] J. Sun, E. Oh, and D. E.-L. Ong, "Influence of degree of saturation (Dos) on dynamic behavior of unbound granular materials," *Geosciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 2, pp. 1–16, 2021, doi: 10.3390/geosciences11020089.
- [22] Y. Xiao, K. Zheng, L. Chen, and J. Mao, "Shakedown analysis of cyclic plastic deformation characteristics of unbound granular materials under moving wheel loads," *Constr Build Mater*, vol. 167, pp. 457–472, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.064>.
- [23] G. Cerni, F. Cardone, A. Virgili, and S. Camilli, "Characterisation of permanent deformation behaviour of unbound granular materials under repeated triaxial loading," *Constr Build Mater*, vol. 28, no. 1, pp. 79–87, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.066.
- [24] A. D. F. Lekarp, "Analysis of permanent deformation behaviour of unbound granular materials," *Const. Bulid. Mat.*, p. 10, 1997, doi: S0950-06189700078-0.
- [25] P. Jing and C. Chazallon, "Hydro-Mechanical Behaviour of an Unbound Granular Base Course Material Used in Low Traffic Pavements.," *Materials (1996-1944)*, vol. 13, no. 4, p. 852, Feb. 2020, doi: 10.3390/ma13040852.
- [26] W. S. Cabral, S. H. de A. Barroso, and S. de A. T. e Silva, "Consideração da deformação permanente de solos ocorridos na região nordeste na análise mecânica-empírica de pavimentos," *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 26, no. 4, p. e13096, Jan. 2021, doi: 10.1590/s1517-707620210004.1396.
- [27] E. Pérez-González and J.-P. Bilodeau, "An Optimized Approach to Multistage Permanent Deformation Testing of Granular Materials.," *Materials (1996-1944)*, vol. 17, no. 14, p. 3384, Jul. 2024, doi: 10.3390/ma17143384.

- [28] M. S. Rahman, S. Erlingsson, and A. Ahmed, “Modelling the permanent deformation of unbound granular materials in pavements,” *Road Materials & Pavement Design*, vol. 24, no. 8, pp. 1917–1938, Aug. 2023, doi: 10.1080/14680629.2022.2108883.
- [29] F. Salour and S. Erlingsson, “Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests,” *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 236–246, Mar. 2017, doi: 10.1080/10298436.2015.1065991.
- [30] B. Cavalcante Mota, M. de Oliveira Ubaldo, C. Dias Amancio de Lima, L. Alberto Herrmann do Nascimento, and F. Thiago Sacramento Aragão, “Optimized characterization of the permanent deformation of unbound soils and granular materials considering the master curve concept,” *Transportation Geotechnics*, vol. 47, p. 101291, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.TRGEO.2024.101291.
- [31] G. Liu, M. Zhao, Q. Luo, and R. Lu, “Characterization of permanent deformation properties of densely-compacted unbound granular materials subjected to cyclic loading,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, pp. 1–18, Mar. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-30635-7.
- [32] H. Soliman and A. Shalaby, “Permanent deformation behavior of unbound granular base materials with varying moisture and fines content,” *Transportation Geotechnics*, vol. 4, pp. 1–12, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.trgeo.2015.06.001.