

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Informe: EIC-Lanamme-INF-0637-2024 Código VI: 321-B9-279

INFORME FINAL

DESARROLLO DE ECUACIONES DE TRANSFERENCIA PARA LA PREDICCIÓN DE DETERIORO EN LAS CAPAS GRANULARES Y SUBRASANTES DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

Preparado por: Unidad de Investigación en Infraestructura de Transporte-PITRA Programa de Ingeniería Geotécnica-PIG

Documento generado con base en el Artículo 6, inciso i) de la ley 8114, Capítulo 7, artículo 66 del Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

> San José, Costa Rica Agosto, 2024



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 2 de 112

1. Informe: EIC-Lanamme-INF-0637-2	2024			2. Copia No.1
 Título y subtítulo: Desarrollo de ecuaciones de transferencia para la predicción de deterioro en las capas granulares de una estructura de pavimento. 			4. Fecha del Informe as Agosto, 2024	
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y M Facio, San Pedro de Montes de Oca, C	lodelos osta Ric	Estructurales. Universidad de Co ca. Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (50	osta Rica 06) 2511-	, Ciudad Universitaria Rodrigo 4440
6. Notas complementarias Ninguna				
7. Resumen Según el Informe de Ejecución del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) la inversión en conservación vial para el año 2020 ascendió a los 118 mil millones de colones; por su parte, la inversión en construcción vial, para este mismo año se estimó en 116 mil millones de colones (CONAVI, 2021). La metodología bajo la cual fueron diseñadas las estructuras de pavimento no consideraba los fundamentos mecánicos para el análisis de la estructura, ni las características más fundamentales de los materiales; por lo tanto, la predicción de la vida útil no es adecuada. En virtud de ello, el LanammeUCR ha venido planteando investigaciones con la finalidad de conocer con mayor detalle las propiedades (físicas, mecánicas, químicas) de los materiales propios de Costa Rica, para su adecuado tratamiento y uso, por medio del diseño empírico mecanicista. Por lo tanto y como parte de dicho proyecto, esta investigación pretende desarrollar modelos matemáticos que permitan predecir el deterioro por deformación permanente en las capas granulares de una estructura de pavimento, dado que una modificación en la metodología de diseño utilizada actualmente, se vería reflejada en una mejora en el uso de recursos y resultados obtenidos, buscando generar carreteras más duraderas y a un menor costo				
8. Palabras clave Ecuaciones de transferencia, MEPDG, granulares, deformación permanent materiales granulares	capas te en	9. Nivel de seguridad: -	1 1). Núm. de páginas 12
13. Preparado por: Ing. Tania Ávila Esquivel, M.Sc. Investigador UIIT	Ing. C	ustavo A. Badilla Vargas, D.Sc. Investigador PIG		
14. Revisado por: Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA Coordinador UIIT	15. Re Ing. A	evisado y aprobado por: na Lorena Monge Sandí, M.Sc. Coordinadora General PIG	Ing. Ar Co	a Luisa Elizondo Salas, M.Sc. ordinadora General PITRA



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 3 de 112

Contenido

1	Introducción	8
1.1	Objetivo general 1	0
1.2	Objetivos específicos1	0
1.3	Antecedentes1	0
1.4	Justificación 1	1
1.5	Marco teórico1	1
1.6	Marco metodológico 2	4
2	Ensayos de deformación permanente 2	6
3	Resultados3	0
3.1	Caracterización de muestras 3	0
3.2	Módulo resiliente	2
3.3	Deformación permanente	5
4	Modelo de deformación permanente 4	9
4.′	Modelos individuales	9
4.2	Propuesta de modelo general6	5
5	Análisis de Resultados	0
5.1	Características físicas y mecánicas de los materiales estudiados	0
5.2	Ensayo de deformación permanente7	1
5.3 su	Modelos de predicción de la deformación permanente en materiales granulares elos 72	у
6	Conclusiones y recomendaciones7	3
7	Referencias bibliográficas7	4
8	Apéndices	7



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 4 de 112

Índice de figuras

FIGURA 1 TIPOS DE PAVIMENTOS
FIGURA 2 DEFORMACIÓN ACUMULADA CON EL NÚMERO DE APLICACIONES DEL ESFUERZO
DESVIADOR
FIGURA 3 MECANISMO DE FORMACIÓN DE RODERAS EN UN PAVIMENTO ASFÁLTICO 16
FIGURA 4 DEFORMACIONES PERMANENTES EN UN TRAMO EXPERIMENTAL DURANTE UN
PERIODO DE CUATRO AÑOS
FIGURA 5 ACUMULACIÓN DE LA DEFORMACIÓN CON EL NÚMERO DE CICLOS EN MATERIALES
GRANULARES
FIGURA 6 ACUMULACIÓN DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA BAJO CARGA REPETIDA 19
FIGURA 7 DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA
FIGURA 8 DATOS DE ENTRADA, INTERFAZ DEL SOFTWARE
FIGURA 9 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA EL
MATERIAL A
FIGURA 10 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA EL
MATERIAL B
FIGURA 11 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA EL
MATERIAL C
FIGURA 12 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA EL
MATERIAL D
FIGURA 13 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA EL
MATERIAL E
FIGURA 14 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA EL
MATERIAL F
FIGURA 15 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA EL
MATERIAL G
FIGURA 16 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA EL
MATERIAL H
FIGURA 17 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA EL
MATERIAL I
FIGURA 18 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA EL
MATERIAL J



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 5 de 112

FIGURA 19 DEFORMACION PERMANENTE EN FUNCION DEL NUMERO DE CICLOS PARA	EL
MATERIAL K	42
FIGURA 20 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA	EL
MATERIAL L	42
FIGURA 21 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA	EL
MATERIAL M	43
FIGURA 22 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA	EL
MATERIAL N	44
FIGURA 23 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA	EL
MATERIAL O	44
FIGURA 24 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA	EL
MATERIAL P	45
FIGURA 25 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA	EL
MATERIAL Q	46
FIGURA 26 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA	EL
MATERIAL R	46
FIGURA 27 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA	EL
MATERIAL S	47
FIGURA 28 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS PARA	EL
MATERIAL T	48
FIGURA 29 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL A	51
FIGURA 30 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL B	52
FIGURA 31 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL C	52
FIGURA 32 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL D	53
FIGURA 33 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL E	54
FIGURA 34 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL F	54
FIGURA 35 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL G	55
FIGURA 36 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL H	56
FIGURA 37 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL I	56
FIGURA 38 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL J	57
FIGURA 39 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL K	58
FIGURA 40 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL L	58
FIGURA 41 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL M	59



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 6 de 112

FIGURA 42 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL N
FIGURA 43 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL O60
FIGURA 44 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL P6
FIGURA 45 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL Q62
FIGURA 46 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL R62
FIGURA 47 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL S6
GURA 48 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL MATERIAL T64
FIGURA 49 MODELOS INDIVIDUALES DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA TODOS LOS
/IATERIALES
FIGURA 50 MODELO UNIVERSAL DP PARA TODOS LOS MATERIALES6
FIGURA 51 MODELO UNIVERSAL DP CON WIP PARA TODOS LOS MATERIALES
- IGURA 52 MODELO UNIVERSAL DP LOGARÍTMICO PARA TODOS LOS MATERIALES

Índice de tablas

TABLA 1 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE EN SUELOS	20
TABLA 2 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MATERIALES GRANULARES	21
TABLA 3 ESFUERZOS APLICADOS PARA EL ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE P	'ARA
MATERIALES DE BASE Y SUBBASE	28
TABLA 4 ESFUERZOS APLICADOS PARA EL ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE P	ARA
MATERIALES DE SUBRASANTE	28
TABLA 5 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO Y BASES GRANULARES	31
TABLA 6 RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE REGRESIÓN LINEAL Y VALORES ESTADÍSTI	cos
PARA LAS BASES Y SUBBASES	33
TABLA 7 RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE REGRESIÓN LINEAL Y VALORES ESTADÍSTI	cos
PARA LAS SUBRASANTES	34
TABLA 8 RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE REGRESIÓN DEL MODELO DE DEFORMAC	CIÓN
PERMANENTE Y VALORES ESTADÍSTICOS	50
TABLA 9 RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE REGRESIÓN DE LOS MODELOS UNIVERSA	\LES
DE DEFORMACIÓN PERMANENTE Y VALORES ESTADÍSTICOS	66
TABLA 1 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE EN SUELOS	20
TABLA 2 MODELOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MATERIALES GRANULARES	21



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 7 de 112

TABLA 3 ESFUERZOS APLICADOS PARA EL ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA
MATERIALES DE BASE Y SUBBASE
TABLA 4 ESFUERZOS APLICADOS PARA EL ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA
MATERIALES DE SUBRASANTE
TABLA 5 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO Y BASES GRANULARES
TABLA 6 RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE REGRESIÓN LINEAL Y VALORES ESTADÍSTICOS
PARA LAS BASES Y SUBBASES
TABLA 7 RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE REGRESIÓN LINEAL Y VALORES ESTADÍSTICOS
PARA LAS SUBRASANTES
TABLA 8 RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE REGRESIÓN DEL MODELO DE DEFORMACIÓN
PERMANENTE Y VALORES ESTADÍSTICOS
TABLA 9 RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE REGRESIÓN DE LOS MODELOS UNIVERSALES
DE DEFORMACIÓN PERMANENTE Y VALORES ESTADÍSTICOS
TABLA 10 CUMPLIMIENTO DE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA CAPAS DE BASE DEL
CR 2020



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 8 de 112

Resumen ejecutivo

En la última década, Costa Rica ha realizado grandes inversiones en la conservación de las carreteras pavimentadas de la red vial nacional. No obstante, las intervenciones asociadas en las estructuras de pavimento se determinaron con una metodología no calibrada para las condiciones de materiales, clima y tráfico de nuestro país. En virtud de ello, el LanammeUCR ha venido planteando investigaciones con la finalidad de conocer con mayor detalle las propiedades (físicas, mecánicas y químicas) de los materiales propios de Costa Rica, para su adecuado tratamiento y uso, por medio del diseño empírico mecanicista.

Por lo tanto, y como parte de dicho proyecto, esta investigación pretende desarrollar modelos matemáticos que permitan predecir el deterioro en las capas granulares. Lo anterior de acuerdo con los factores más representativos como los materiales, el clima, tránsito/cargas y el desempeño de las estructuras. Dado que una modificación de la metodología utilizada actualmente en los modelos de diseño reflejaría una mejora en el uso de recursos y resultados obtenidos, se podrían generar mejores predicciones de la evolución del deterioro y así aumentar la eficiencia en las inversiones.

1 Introducción

Durante muchos años, en muchos países, el diseño de pavimentos ha sido realizado mediante metodologías empíricas, dentro de las cuáles ha sobresalido la impulsada por la Asociación Americana de Oficiales de Autopistas Estatales y de Transportes (AASHTO por sus siglas en inglés), en particular la versión denominada Guía AASHTO 93. Dicha guía se basó en la experiencia adquirida en la pista experimental desarrollada a finales de los años 50 en el condado de Ottawa, Illinois, y generó el desarrollo de varias metodologías de diseño empíricas que se fueron sucediendo cada cierto tiempo, hasta decantar en la guía AASHTO 93 (AASHTO, 1993).

Por muchos años esta técnica empírica generó resultados aceptables en el diseño de pavimentos, sin embargo, a partir de los años noventa, se puso en tela de duda el valor del nomograma de AASHTO 93, debido a que se fue identificando que los diseños no tenían una adecuada relación con el desempeño posterior de los pavimentos en servicio. A esto se sumó que los cambios en tecnologías para diseño de materiales (como Superpave), la incorporación de nuevos materiales (como los asfaltos modificados y mezclas tibias), y el incremento de las cargas vehiculares (así como su tipo y distribución), entre otros, eran muy difíciles de incorporar en la metodología de diseño empírica (Loría, 2013). Con este razonamiento, mediante el proyecto NCHRP 1-37A (Witzack et al., 2002), se inicia el desarrollo de una guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista (MEPDG por sus siglas en inglés), que estuviera basada en las propiedades mecánicas de los materiales componentes, las estructuras de los pavimentos,



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 9 de 112

con una correcta modelación del clima, el tránsito y finalmente, ecuaciones de transferencia calibradas que convirtieran las respuestas del pavimento (esfuerzos, σ ; deformaciones, ϵ ; y deflexiones, δ), en deterioros típicos, tales como agrietamiento por fatiga, deformación permanente y agrietamiento por baja temperatura (NCHRP, 2004).

A través de la creación de la Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte, el LanammeUCR desarrolló una guía de diseño para Costa Rica (versión beta, 2018), siguiendo los conceptos mecanicistas mencionados anteriormente; sin embargo, muchos de los modelos matemáticos utilizados aún conservan los coeficientes de calibración propios de los Estados Unidos (Trejos et al., 2018).

Por lo tanto y como parte de dicho proyecto, esta investigación pretende estudiar el desempeño de los suelos y materiales granulares que componen una estructura de pavimento flexible, ante las cargas de tránsito y las condiciones de clima propias de un país tropical; con el propósito de cuantificar el deterioro presente en dichas capas medido a través de las respuestas del pavimentos (esfuerzos, σ ; deformaciones, ϵ ; y deflexiones, δ), y por lo tanto, mejorar el uso de recursos y resultados obtenidos durante el proceso de diseño, garantizando mejores predicciones para las estructuras en la búsqueda de mejorar la eficiencia de las inversiones en carreteras (criterio de optimización del diseño).

Según el Informe de Ejecución del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) la inversión en conservación vial, para el año 2020, ascendió a los 118 mil millones de colones; por su parte, la inversión en construcción vial, para este mismo año se estimó en 116 mil millones de colones (CONAVI, 2021). La metodología bajo la cual fueron diseñadas esas estructuras de pavimento no consideraba los fundamentos mecánicos para el análisis de la estructura, ni las características más fundamentales de los materiales; por lo tanto, la predicción de su vida útil no es adecuada. Por esta razón y en vista del estado del arte, el LanammeUCR, a través de su proyecto de ensayos a escala natural, busca generar investigación que permita conocer a profundidad las propiedades (físicas, mecánicas y químicas) de los materiales propios de Costa Rica, utilizados como base para la construcción de carreteras, a través de métodos de diseño empíricos mecanicistas.

Por lo tanto y como parte de dicho proyecto, esta investigación pretende desarrollar modelos matemáticos que permitan predecir el modo de deterioro (deformación permanente) en las capas granulares de una estructura de pavimento, dado que una modificación en la metodología de diseño utilizada actualmente se vería reflejada en una mejora en el uso de recursos y desempeño de las estrucutras, que respondan adecuadamente a las condiciones de clima, tránsito y materiales propios de nuestro país incidiendo positivamente en la relación costo beneficio/vida útil de las inversiones.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 10 de 112

1.1 Objetivo general

Generar ecuaciones de transferencia capaces de predecir deterioro en las capas de subrasante y granulares de una estructura de pavimento.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar materiales típicos utilizados como subrasantes y capas granulares en las estructuras de pavimento en Costa Rica, con el propósito de utilizar materiales representativos.
- Realizar ensayos mecánicos que midan la acumulación de deterioro en los materiales utilizados como capas de subrasante y granulares, con el fin de conocer el modo de falla que afecta dichas capas.
- Generar modelos matemáticos que permitan cuantificar el deterioro acumulado en las capas de subrasante y granulares a través del tiempo, con el fin de predecir y establecer los criterios de falla de dichos materiales.

1.3 Antecedentes

Araya (2015), implementó el ensayo de deformación en materiales granulares, los datos recopilados le permitieron proponer tres modelos para predecir deformación permanente en un suelo y dos bases granulares; mismos datos que permitieron que Ávila et al. (2016), propusiera un modelo matemático general utilizando datos panel para predecir deformación permanente en materiales granulares y suelos. Los materiales utilizados formaban parte de la estructura de pavimento construida en el proyecto de ensayo a escala real con el simulador de vehículos pesados (HVS por sus siglas en inglés) ejecutado durante los años 2013-2017.

De igual forma, Leiva et al. (2016) propuso modelos de deformación permanente para todas las capas de la estructura de pavimento, utilizando datos recopilados del proyecto de ensayo a escala real. Los datos fueron recopilados durante la falla de las primeras dos pistas de ensayo de un total de 8 que componen el proyecto.

En 2017 Ávila propuso un método de ensayo y un primer modelo, utilizando un único material, para predecir el módulo de resiliencia en condiciones de humedad variable; esto con la finalidad de cuantificar el efecto del contenido de agua en las capas más susceptibles a deterioro por deformación permanente dentro de la estructura de pavimento.

Finalmente, para agrupar el esfuerzo realizado en el proyecto de investigación de materiales y pavimentos, Trejos et al. (2018) propusieron la primera versión del software llamado CRME



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 11 de 112

(Costa Rica's Mechanical Empirical Design Guide), para diseñar pavimentos flexibles utilizando los conceptos mecanicistas.

1.4 Justificación

El método de diseño de pavimentos más utilizado en Costa Rica actualmente es la Guía de la AASHTO 93 (Castro, 2007). Esta guía recomienda el uso de un único parámetro de daño relativo producto de la variación estacional del módulo de resiliencia, Mr, debido a los cambios de estación climática. Sin embargo, se ha identificado que los materiales granulares se encuentran a menudo en un estado insaturado y que las mismos presentan un mayor contenido medio de humedad después de la pavimentación alcanzando un equilibrio después de un tiempo (Sauer y Monismith,1968; Elfino y Davidson, 1989; Thadkamalla y George,1995; Uzan, 1998; Quintus y Killingsworth, 1998).

La implementación de la nueva Guía Empírico-Mecanística para el Diseño de Pavimentos (MEPDG) (2004), ha demostrado intensamente el rol fundamental que tienen los factores climáticos en el desempeño del pavimento (Zapata et al., 2007; Zapata et al., 2009; Zapata y Houston, 2009; Zapata y Cary, 2009), y en particular, los efectos del contenido de humedad. Por las razones expuestas anteriormente se vuelve fundamental entender de manera más precisa el comportamiento de los pavimentos flexibles en función de las condiciones climáticas reales a las que es sometida una estructura de pavimento. Actualmente, pocos laboratorios, que no sean de investigación en Costa Rica y en la región Latinoamericana, cuentan con los equipos necesarios para determinar las respuestas mecánicas del pavimento, por lo que se deben proponer metodologías viables para determinar el comportamiento de estos materiales, lo cual se puede lograr a través del desarrollo de modelos matemáticos que relacionen algunas de estas propiedades y sean de fácil obtención, permitiendo así su implementación directa.

La calibración de funciones de transferencia para la deformación permanente de las bases granulares y subrasantes, permitirá predecir, siguiendo una metodología establecida,el comportamiento de los materiales dentro del paquete estructural. Esta calibración posibilita, además, el análisis, selección y diseño de estos materiales, así como obtener conclusiones y recomendaciones relevantes al tema.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Estructura de pavimentos

Una estructura de pavimento es un sistema compuesto por capas de materiales cuyas propiedades mecánicas y espesores han sido especificados y dimensionados de manera que las cargas aplicadas por el tráfico(proyectadas para un determinado periodo de años) sean reducidas y transmitidas a la subrasante.Adicionalmente, la estructura debe ser capaz de



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 12 de 112

soportar las condiciones ambientales circundantes, brindar un buen nivel de servicio, confort y seguridad vial.

En general, existen dos tipos de estructura de pavimento: flexibles y rígidos; y pueden existir combinaciones de ambos, lo que se conoce como pavimento semi-rígido.

Como en cualquier tipo de estructura el suelo subyacente (también conocido como subrasante) es el encargado de resistir la carga que le es aplicada, por lo tanto y como se mencionó anteriormente, la función del pavimento es distribuir adecuadamente los esfuerzos generados por el tránsito, de tal forma que la subrasante sea capaz de resistirlos sin llegar a deformarse o colapsar.

Generalmente la estructura de pavimento está compuesta por la subrasante, subbase y base granular, capa de rodadura (mezcla asfáltica o concreto) como se muestra en la Figura 1.



Nota. Adaptado a partir de Morales et al, (2009).

1.5.2 Subrasante

Puede ser en el terreno natural, en corte o relleno, en la cual se cimenta toda la estructura del pavimento, esdecir que no forma parte de la estructura en sí. Sin embargo, la capacidad soporte de la subrasante es básico que afecta directamente la selección de los espesores totales de las capas del pavimento. Para materiales de subrasante débiles se requerirán espesores de pavimento mayores que aquellos espesores de capas de pavimentos obtenidos con subrasantes con mejor capacidad soporte, excepto que la subrasante reciba un tratamiento para estabilizar o mejorar su capacidad.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 13 de 112

1.5.3 Relleno o material selecto

Es una capa compactada consistente en materiales de procedencia natural o que son sometidos a modificaciones mínimas previo a su utilización en una obra. El material que compone estas capas debe poseer mejores propiedades que la subrasante. El propósito de esta capa es alejar las cargas del tráfico de la subrasante mediante un material con costo menor que las capas de base y subbase.

1.5.4 Subbase

Es una capa compactada compuesta por materiales naturales u obtenidos mediante trituración, a través de un proceso de producción controlado para obtener un material con características estructurales adecuadas a un costo razonable. Se diferencia de la capa de base por poseer especificaciones menos restrictivas en cuanto a su plasticidad, graduación y capacidad estructural. Su principal función es proporcionar aporte estructural al pavimento, pero también reduce la migración de finos de las capas inferiores hacia la capa de base.

1.5.5 Base

Es la capa compactada que se encuentra bajo la superficie de rodamiento. La capa de base es un elemento fundamental del pavimento desde el punto de vista estructural, su propósito consiste en proporcionar un elemento resistente que distribuye los esfuerzos inducidos por el tráfico, en una intensidad apropiada, hacia las capas inferiores. Las especificaciones para los materiales de estas capas requieren una mayor regulación en cuanto a su plasticidad, graduación y resistencia.

La base se construye con materiales granulares procesados en planta o estabilizados, producidos bajo estándares de calidad más estrictos y controlados que la subbase. Cuando la capa de base es estabilizada químicamente se evita que el agua que logra infiltrar a través de la capa de rodamiento llegue hacia la subbase y subrasante, a la vez se aumenta la capacidad estructural de la base.

1.5.6 Capa de rodamiento

En el caso de los pavimentos flexibles, está constituida por un material pétreo, al que se adiciona un producto asfáltico que tiene por objeto servir de aglutinante, y en el caso de los pavimentos rígidos por cemento.

Esta capa transmite las cargas inducidas por el tráfico hacia la capa de base en la que se apoya, además que provee una superficie adecuada para el rodamiento del tráfico. También debe poseer la menor permeabilidad posible, con el fin de que el agua superficial drene en su mayor parte sobre ésta, reduciendo la cantidad de agua que llegue a la base y capas subyacentes.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 14 de 112

1.5.7 Mecanismos de falla en suelos

Según Brown (1996), el comportamiento esfuerzo-deformación de un suelo va a depender del diseño estructural del pavimento, el tipo y la magnitud de las cargas, las repeticiones de carga acumuladas, las características asociadas al clima y la localización de las diferentes capas de material. Las deformaciones que se pueden presentar en los suelos pueden ser de dos tipos: resilientes y plásticas.

Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea, por su parte, suelen denominarse como deformaciones plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora. Bajo carga móvil y repetida, la deformación plástica tiende a hacerse acumulativa y puede llegar a alcanzar valores inadmisibles. Paradójicamente, este proceso suele ir acompañado de una "densificación" de los materiales, de manera que el pavimento fallado puede ser más resiliente que el original.

En la Figura 2 (a) se ilustra el mecanismo por el cual la deformación permanente se va acumulando; debe hacerse notar el hecho de que, en los ciclos intermedios, la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. De este modo, la muestra de suelo llega a un estado tal en que toda la deformación es recuperable, en ese momento se tiene un comportamiento resiliente (en donde el módulo secante¹ es igual al módulo de resiliencia²).

En la Figura 2 (b) se muestra la acumulación de las deformaciones total y plástica durante un cierto número de ciclos. La deformación elástica repetida preocupa sobre todo en materiales con resistencia a la tensión colocados en la parte superior de la estructura, en los que se puede llegar a generar una falla de agrietamiento por fatiga si el número de repeticiones es importante y los materiales son susceptibles a este efecto.

En los métodos de diseño actuales la deformación es un punto básico a considerar y, de hecho, la mayoría de ellos se centran en mantenerla en límites razonables.

¹ Módulo secante: Es el esfuerzo dividido por la deformación en cualquier valor determinado de esfuerzo o deformación. También se conoce como módulo secante de elasticidad.

² Módulo de resiliencia: Es una medida de la capacidad de un material de almacenar o absorber energía sin que este experimente deformación permanente.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 15 de 112

Figura 2

Deformación acumulada con el número de aplicaciones del esfuerzo desviador



Nota. Adaptado a partir de Garnica et al (2002).

Se sabe que el módulo de resiliencia de los suelos no es una propiedad constante, sino que depende de diversos factores. Se han desarrollado extensas investigaciones para analizar la influencia de varios factores que afectan los valores de módulo de resiliencia en suelos cohesivos. A continuación, se muestraun resumen de estos factores:

- Parámetros de compactación como el peso volumétrico seco, el contenido de agua y el grado de saturación
- Método de compactación
- Número de aplicaciones de esfuerzo
- Tixotropía
- Magnitud del esfuerzo desviador
- Succión del suelo



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 16 de 112

1.5.8 Mecanismos de falla en materiales granulares

Uno de los factores más importantes en la caracterización de los materiales granulares es la deformación permanente que experimentan por efecto de la repetición de cargas. Este factor es quizá el más importante a considerar, si se toma en cuenta que, en la mayoría de los casos, los pavimentos llegan a la falla debido al grado de deformación que han sufrido, disminuyendo su calidad de servicio a niveles de rechazo y potenciando otros deterioros como los de fisuramiento por fatiga relacionado también con el daño por humedad. Por lo tanto, en los estudios de materiales debe ponerse especial énfasis en la determinación de las características de deformación permanente.

Una de las formas de deterioro más fuertemente asociada a los mecanismos de falla de los pavimentos flexibles es la formación de roderas, las cuales se generan por la acumulación de deformación permanente en la superficie, que puede, en principio, incluir contribuciones de todas las capas del pavimento. La Figura 3 ilustra la formación de roderas en un pavimento asfáltico, señalando las deformaciones de las diferentes capas, que contribuyen a la deformación permanente total en la superficie del pavimento, indicada como profundidad de rodera.



Figura 3

Infraestructura

Nota. Adaptado a partir de Garnica et al (2002).

La Figura 4muestra las mediciones de la deformación permanente desarrollada a lo largo de 4 años, en las diferentes capas de un pavimento asfáltico (Brown, 1996). Puede apreciarse en la figura la deformación total medida en la superficie y la contribución de cada una de las capas a la deformación total de la estructura.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 17 de 112

Figura 4

Deformaciones permanentes en un tramo experimental durante un periodo de cuatro años Año



Nota. Adaptado a partir de Garnica et al (2002).

Brown (1996) señala que, en pavimentos con capas asfálticas gruesas, generalmente las roderas se generan por las deformaciones permanentes en estas capas asfálticas; pero en pavimentos con carpetas delgadas, las capas granulares y la subrasante son las que provocan la mayor parte de la deformación, principalmente si las condiciones de drenaje son inadecuadas.

En algunos tramos de prueba construidos en Bothkennar, Escocia (Brown, 1996), la capa de material granular contribuyó con una tercera parte de la profundidad de la rodera; pero hubo tramos en donde la totalidad de la profundidad de las roderas fue generada por la deformación de la capa subrasante.

La acumulación de deformación plástica o permanente de materiales granulares bajo carga repetida ha recibido relativamente menos atención experimental que las relaciones esfuerzodeformación resilientes. Esto se debe, en parte, a que los experimentos se realizan con pruebas destructivas y que se requiere ensayar muchos más especímenes para obtener información adecuada.

Un material granular sujeto a carga cíclica, experimenta una deformación cuya magnitud es función de varios factores, como el nivel de la carga aplicada, área de contacto, condiciones de confinamiento, características del propio material, etc. La deformación total, tiene dos componentes: una definida como deformación recuperable o elástica, la cual es medible una



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 18 de 112

vez que la carga deja de actuar sobre el material; la otra componente, denominada deformación permanente, se define como "la deformación vertical no recuperable (plástica) que experimenta un material de espesor definido, en cada ciclo de carga aplicado", lo anterior se muestra en la Figura 5. Es bien sabido que la mayoría de los materiales de pavimentación no son elásticos ya que experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña comparada con la resistencia del material y se repite un gran número de veces, la deformación bajo cada repetición de carga llega a ser casi completamente recuperable y proporcional a la magnitud de la carga, pudiendo considerarse elástica (Huang, 1993).

Figura 5



Acumulación de la deformación con el número de ciclos en materiales granulares

Nota. Adaptado a partir de Garnica et al (2002).

En los primeros ciclos de carga, la deformación permanente es considerable, como lo indica la deformación plástica, ε_p , en la Figura 5. Al incrementar el número de repeticiones, la deformación plástica debida a cada aplicación de carga decrece. Después de algunos miles de repeticiones de carga, la deformación es casi totalmente recuperable, como lo indica la deformación recuperable, ε_r , llegando a una condición de equilibrio, siempre que el esfuerzo desviador sea lo suficientemente pequeño para no llevar la muestra a la falla. El máximo esfuerzo desviador asociado a esta condición es denominado "Esfuerzo Umbral" y es un concepto importante para el diseño. La Figura 6 ilustra este concepto (Brown, 1996).



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 19 de 112

Figura 6

Acumulación de deformación plástica bajo carga repetida



Nota. Adaptado a partir de Brown (1994).

En la Figura 6 se aprecia cómo, para un esfuerzo desviador muy alto (σ_{d3}), la velocidad de acumulación de la deformación plástica puede incrementarse conduciendo al espécimen de prueba a la falla.

Brown y Selig (en Brown, 1996) han sugerido que el esfuerzo umbral para materiales granulares puede expresarse como la relación entre el esfuerzo máximo y el de falla. Proponen aplicar un esfuerzo desviador equivalente al 70% del de falla, como la relación máxima de esfuerzos para minimizar el desarrollo de deformación plástica.

Con el fin de entender completamente el comportamiento plástico de los materiales granulares, es esencial descubrir los parámetros que influyen en la respuesta del material, así como el papel que juegan en el mismo. Algunas investigaciones en esta área han revelado la existencia de varios parámetros importantes que determinan la deformación permanente y son los siguientes:

- Nivel de esfuerzos
- Rotación del esfuerzo principal
- Número de aplicaciones de carga
- Contenido de humedad
- Historial de esfuerzos
- Densidad
- Granulometría y tipo de agregado



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 20 de 112

1.5.9 Ecuaciones de transferencia y modelos de deformación permanente

A continuación, en la Tabla 1 y la Tabla 2 se compilan algunas ecuaciones de transferencia desarrolladas por investigadores

nacionales e internacionales que sirven de base para este proyecto, las mismas utilizan distintas soluciones numéricas y son dependientes de los estados de esfuerzos y propiedades de los materiales en estudio.

Tabla 1

Modelos de deformación permanente en suelos

Autor	Modelo	Descripción de parámetros
Monismith et al. (1975)	$\varepsilon_p = a N^b$	ε _p : Deformaciones permanentes en la dirección vertical <i>N</i> : Número de ciclos de aplicación de carga <i>a</i> , <i>b</i> : parámetros de la regresión.
	$\delta_{a}(N) = \beta_{i} * \left(\frac{\varepsilon_{0}}{\varepsilon_{r}}\right) * e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^{\beta}} * \varepsilon_{v} * h$	
	$log\beta = -0,6119 - 0,017638W_c$	δ_a : deformación permanente para la capa (in). N: número de ciclos.
	$\log\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) = \frac{\left(e^{(\rho)^{\beta}} * a_1 E_r^{b_1}\right) + \left(e^{\left(\frac{\rho}{10^9}\right)^{\beta}} * a_9 E_r^{b_9}\right)}{2}$	como parámetros de la regresión. β_{i} : factor de calibración para materiales granulares (β_{GB} =1,673) y subrasante (β_{SG} =1,35)
Tseng y Lytton (1989)	$C_0 = ln \left[\frac{a_1 E_r^{b_1}}{a_9 E_r^{b_9}} \right]$	ε_{r} : deformación resiliente impuesta en el ensayo de laboratorio para obtener ε_{0} , β , $\rho(in/in)$.
	$\rho = 10^9 \left[\frac{C_0}{1 - (10^9)^{\beta}} \right]^{\frac{1}{\beta}}$	 ε_ν: deformación resiliente vertical promedio en la capa, obtenida de la respuesta primaria (solución mediante elemento finito). h: espesor de la capa (in).
	$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{E_r}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0.3586 * GWT^{0,1192}}$	W _c : contenido de agua (%).
	Niveles de esfuerzo pequeños	a: relación entre el esfuerzo desviador
Raad y Zeid (1990)	$q = \frac{\varepsilon_a}{a + b * log N}$ Niveles de esfuerzos altos $q = \frac{\varepsilon_a}{a + (b + c * log N)\varepsilon_a}$	q. Telación entre el esiderzo desviador aplicado y la resistencia bajo carga monotónica en un ensayo. ε_a : deformación axial vertical. <i>a, b, c</i> : parámetros de la regresión.
Zhao et al. (2004)	$\varepsilon_p = aN^b = 10^c \left(\frac{\sigma_d}{q_s}\right)^d N^{10^c (\frac{\sigma_d}{q_s})^f}$	σ_{d} : esfuerzo desviador. q_{s} : resistencia al corte en el estado pico el suelo.



EIC-Lanamme-INF-0637-2024

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Página 21 de 112

Autor	Modelo	Descripción de parámetros
		<i>c, d, f:</i> parámetros del material obtenidos por regresión.
Guimarães (2009)	$\varepsilon_p = \beta_1 * N^{\beta_2} * \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\beta_3} * \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\beta_4}$	ε_{p} : deformación permanente σ_{d} : esfuerzo desviador (kg/cm ²). σ_{3} : esfuerzo de confinamiento (kg/cm ²). ρ_{0} : presión de referencia (atmosférica= 1 kg/cm ²). $\beta_{1}, \beta_{2}, \beta_{3}, \beta_{4}$: parámetros del modelo.
Ávila et al. (2016)	$\varepsilon_i = \beta_1 * N^{\beta_2} * \sigma_{d,i}^{\beta_3} * \sigma_{3,i}^{\beta_4} * \% w_i^{\beta_4} * e_i$	<i>N:</i> número de ciclos de carga σ_d : Esfuerzo desviador (kPa) σ_3 : esfuerzo de confinamiento (kPa) %w: Contenido de humedad $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$: parámetros del modelo. e_i : Factores no capturados por el modelo

Tabla 2

Modelos de deformación permanente en materiales granulares

Autor	Modelo	Descripción de parámetros
Barksdale (1972)	$\varepsilon_{1,p} = a + b * logN$	<i>a,b:</i> parámetros intrínsecos del material obtenidos por regresión. <i>N:</i> número de repeticiones de carga.
Veverka (1979)	$\varepsilon_{1,p} = \mu \varepsilon N^{lpha}$	μ : constante de proporcionalidad entre la deformación permanente y la resiliente. ϵ : deformación permanente para los primeros 200 ciclos de carga. α : parámetro que toma en cuenta la disminución de la tasa de deformación con el número de ciclos. N: número de repeticiones de carga.
Papin (1979) Garnica, P., Gómez, J.A. y Sesma, J.A. (2002).	$\varepsilon_{s,p} = f(N) * lr * n^t$	$\varepsilon_{s,p}$: Deformación plástica acumulada f(N): Factor que depende del número de aplicaciones de la carga lr: Duración de la aplicación de la carga n: Relación máxima del esfuerzo desviador al esfuerzo normal efectivo medio, (n=q/p)



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 22 de 112

Autor	Modelo	Descripción de parámetros
		t: Parámetro que depende del tipo de material
Lentz y Baladi (1981)	$\varepsilon_{1,p} = \varepsilon_{0,95S} * \ln\left(1 - \frac{q}{s}\right)^{-0,15} + \left\{\frac{n * \left(\frac{q}{s}\right)}{\left[1 - m * \left(\frac{q}{s}\right)\right]}\right\} + \ln N$	$\varepsilon_{1,p}$: deformación permanente acumulada después de N ciclos de carga. $\varepsilon_{0,95S}$: deformación estática al 95% de la fuerza estática a la falla. <i>q</i> : esfuerzo desviados. <i>S</i> : fuerza estática. <i>N</i> : número de ciclos de carga. <i>n</i> , <i>m</i> : parámetros de la regresión, varían según la presión de confinamiento.
Paute (1988)	$\varepsilon_{1,p}(N) = \varepsilon_{1,p}(100) + \varepsilon_{1,p}^*(N)$	$\epsilon^{*}_{1,p}(N):A[1-(N/100)^{-B}]$ $\epsilon_{1,p}(N):$ deformación axial permanente total. $\epsilon_{1,p}(100):$ deformación axial permanente acumulada durate los primeros 100 ciclos. $\epsilon^{*}_{1,p}(N):$ deformación axial permanente adicional, para N >100. <i>N</i> : número de ciclos de carga. <i>A</i> , <i>B</i> : parámetros de la regresión, ajuste.
Sweere (1990)	$\log(\varepsilon_{1,p}) = a + b * logN$	<i>a, b:</i> parámetros intrínsecos del material obtenidos por regresión. <i>N:</i> número de repeticiones de carga.
Gidel et al. (2001)	$\varepsilon_{1,p} = \varepsilon_{0,p} \left[1 - \frac{N^{-B}}{100} \right] \left(\frac{\sqrt{p_{max}^2 + q_{max}^2}}{pa} \right)^n \frac{1}{\left(m + \frac{s}{p_{max}} - \frac{q_{max}}{p_{max}} \right)}$	$\varepsilon_{1,p}$: deformación permanente. $\varepsilon_{0,p}$: deformación permanente en los primeros 100 ciclos de carga. $p_{máx}$: presión media máxima. $q_{máx}$: esfuerzo desviador máximo que experimenta el material durante el ensayo. <i>B</i> , <i>m</i> , <i>n</i> , <i>s</i> : parámetros del material. <i>N</i> : ciclos de carga.
Uzan (2004)	$log\left(\frac{\varepsilon_{1,p}}{\varepsilon_{1,r}}\right) = \left[a_0 + a_1\left(\frac{\theta + k_1}{pa}\right) + a_2\left(\frac{\tau_{oct}}{pa}\right)\right] \\ + \left[b_0 + b_1\left(\frac{\theta + k_1}{pa}\right) + b_2\left(\frac{\tau_{oct}}{pa}\right)\right]logN$	$\varepsilon_{1,p}$: deformación permanente. θ : suma de los esfuerzos principales. τ_{oct} : cortante octaédrico.

Código Postal 11501-2060, Universidad de Costa Rica | Tel: (506) 2511-2500 direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 23 de 112

Autor	Modelo	Descripción de parámetros
		<i>p_a</i> : 100 kPa
		ai, bi,k1: parámetros obtenidos por regresión.
		N: número de ciclos.
		N: número de ciclos de carga σ_d : Esfuerzo desviador (kPa) σ_3 : esfuerzo de confinamiento (kPa)
Avila et al. (2016)	$\varepsilon_{i} = \beta_{1} * N^{\beta_{2}} * \sigma_{d,i}^{\beta_{3}} * \sigma_{3,i}^{\beta_{4}} * W_{i}^{\beta_{4}} * e_{i}$	%w: Contenido de humedad β_1 , β_2 , β_3 , β_4 : parámetros del modelo.
		<i>e_i:</i> Factores no capturados por el modelo





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

1.6 Marco metodológico

Para llevar a cabo esta investigación en la Figura 7 se muestra la metodología utilizada. Como se puede observar el proyecto cuenta con 3 fases y dos ejes de investigación. A continuación, se describe brevemente cada fase.

Figura 7



Nota. El número mostrado dentro de paréntesis corresponde a la cantidad de ensayos realizados por material.

1.6.1 Ensayos de laboratorio

En esta fase se propone seleccionar materiales representativos de los utilizados en el país para construcción de carreteras. Para eso se utilizarán bases granulares provenientes de los tajos más utilizados y subrasantes típicas de los márgenes de las vías nacionales (UMP, 2014), mismos que fueron donados o adquiridos como insumos para la investigación. Se caracterizó físicamente cada material, para esto se realizaron ensayos de granulometría, gravedad específica y límites de Atterberg. A los materiales de subrasante también se les realizó un ensayo de curva de retención de agua en el suelo (SWCC, por sus siglas en inglés). Con el fin



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 25 de 112

de conocer la capacidad mecánica de cada material, ensayos de próctor, índice de soporte de california (CBR, por sus siglas en inglés) y módulo resiliente.

Finalmente se realizarán ensayos de deformación permanente utilizando el protocolo establecido por Araya (2015), a los materiales granulares y suelos. La cantidad de ensayos realizados por material se muestran dentro de paréntesis en la Figura 7.

1.6.2 Modelación matemática

Con base en los resultados obtenidos de la fase anterior, se propondrán modelos matemáticos para predecir la deformación permanente en las capas de base y subrasante. Las formas estructurales de los modelos serán definidas contemplando la eficiencia de las predicciones, así como los tipos de información y datos que se tendrán disponibles. Se partirá de formas estructurales definidas en la literatura que se adaptarán o modificarán según sean las condiciones de los materiales locales.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 26 de 112

2 Ensayos de deformación permanente

Para el estudio de la deformación permanente no se cuenta con un protocolo de ensayo oficial, por lo que se ha recurrido a publicaciones y estudios realizados por reconocidas entidades alrededor del mundo para establecer el protocolo que se utiliza en la presente investigación.

En el protocolo utilizado para la presente investigación, se puede distinguir como herramienta principal la utilización de la máquina universal de ensayo UTM-25 para la realización de ensayos triaxiales de cargas repetidas de larga duración, donde se alcanzan ciclos de hasta 15 000 repeticiones.

Para el desarrollo del protocolo de ensayo de este proyecto se toma como base, principalmente, los estudios realizados por Guimarães en su tesis de doctorado de la Universidad Federal de Río de Janeiro (Guimarães, 2009) y la publicación realizada por Gidel y Chauvin del Laboratorio Regional de Carreteras de Bordeaux, Hornych del Laboratorio Central de Carreteras Breysse y Denis, de la Universidad de Bordeux (Gidel *et al., 2001*); así como las especificaciones de la AASHTO utilizadas para el ensayo de módulo resiliente en materiales granulares.

En el caso de los materiales granulares de base y subbase, se realizaron ensayos de próctor modificado. En el caso de los materiales de subrasante, se realizaron ensayos de próctor estándar. Los ensayos próctor estándar y modificados fueron utilizados para conocer la humedad óptima y la densidad seca máxima de cada uno de los materiales. De este modo, se pueden formar los especímenes a ser utilizados en el ensayo de deformación permanente, al mantener dichos parámetros constantes y manteniendo una compactación del 100%. Lo anterior, se logra por medio de cinco capas de 25 golpes cada una con el mazo próctor estándar para los suelos y 40 golpes por cada capa con el mazo de próctor modificado para los materiales granulares.

El molde utilizado en la compactación de los materiales consiste en un molde metálico de 101 mm de diámetro y 202 mm de altura, el cual a su vez posee una base metálica, un collar metálico y un anillo metálico que, por medio de dos gazas metálicas, permite mantener unido el sistema. En el caso de los materiales granulares, se debe colocar una membrana de látex en el molde antes de compactar para que el espécimen conserve su forma cilíndrica, además se realiza la sustitución del material por encima de 19 mm por sobretamaños.

Las cinco capas se compactan según la cantidad de golpes necesaria para cada material, teniendo cuidado con la última capa de que está no sobrepase un centímetro de espesor dentro del collar.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 27 de 112

Una vez compactada la última capa, el collar es retirado y se enrasa hasta obtener la altura del molde. En el caso de los materiales granulares, se debe tener cuidado de dejar la superficie lo más lisa posible, por lo que si es necesario, se debe pasar material por el tamiz N°4 (4,76 mm) para evitar que partículas de mayor tamaño queden en la parte superior, ya que se necesita de una base lisa para que la máquina pueda operar de manera adecuada y evitar cualquier tipo de desalineación o concentración de esfuerzos por materiales que sobresalen, que a su vez afecte la toma de datos posterior o quiebre la piedra porosa superior.

Una vez enrasado el espécimen, se pesa el conjunto del molde más el espécimen para llevar un control de la densidad. Por otro lado, se toma una muestra de humedad con el material sobrante y así se controla la humedad alcanzada en la compactación y el porcentaje de compactación alcanzado.

Finalmente, se extrae el espécimen del molde, en el caso de los suelos se realiza con ayuda de una prensa hidráulica, en el caso de los materiales granulares el espécimen puede ser desencofrado del molde. Seguidamente, se toman tres dimensiones de altura y tres de diámetro para cada uno de los especímenes con el fin de obtener valores promedio de altura y diámetro. Posteriormente, los especímenes de suelo se colocan en bolsas plásticas para evitar pérdida de humedad hasta ser compactadas, en el caso de los materiales granulares, es preferible que estos se sometan al ensayo conforme van siendo fabricados, ya que, al ser materiales menos cohesivos, la pérdida de humedad es más significativa y sus partículas no tienden a permanecer unidas durante mucho tiempo.

A cada uno de los especímenes, se le suministraron tres combinaciones de esfuerzos distintas, conformadas por un esfuerzo confinante y tres esfuerzos desviadores, los cuales van aumentando de intensidad, posteriormente se modifica el esfuerzo confinante y se aplica una secuencia de distintos esfuerzos desviadores. La intensidad de los esfuerzos de dichas combinaciones varía dependiendo de si el material bajo ensayo es suelo o es material granular. Para el primero serían de menor magnitud, teniendo el cuidado de que los esfuerzos no sean demasiado bajos de modo que el equipo genere valores no significativos o "ruido", lo que puede afectar las pruebas y arrojar datos poco confiables.

A continuación, en la Tabla 3 se muestra el protocolo de carga del ensayo, que consiste en combinaciones de esfuerzos utilizados en el ensayo de deformación permanente para los materiales granulares de base y subbase utilizados en esta investigación. Por su parte, en la Tabla 4 se muestran las combinaciones de esfuerzos utilizados en el ensayo de deformación permanente para los materiales de suelo o subrasante.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 28 de 112

Tabla 3

Esfuerzos aplicados para el ensayo de deformación permanente para materiales de base y subbase

Especímen	$\sigma_{\sf d}$	σ3	Relación σ _d /σ ₃	Ν
	60		1,5	
1	80	40	2	15 000
	120		3	
	80		1,2	
2	138	69	2	15 000
	205		3	
	154,5		1,5	
3	206	103	2	15 000
	309		3	

Tabla 4

	Especímen	σ_{d}	σ ₃ R	elación σd/σ₃	N
	30	27,	5 1,1		
1	60	55	1,1	15 000	
	90	83	1,1		
	60	40	1,5		
2	90	60	1,5	15 000	
	120	80	1,5		
	90	20	3,0		
3	120	40	3,0	15 000	
	140	47	3,0		
4	90	60	1,5	15 000	

Además, se debe tener en cuenta que la carga aplicada es de tipo haversiana, donde cada ciclo de carga se distribuye en 0,1 s de carga y 0,9 s de relajación. El software UTS014 1.10 "Prueba de Deformación permanente" es el que se utiliza para suministrar las indicaciones a la UTM-25 y de recopilar la información, dentro de la cual se incluyen los esfuerzos tanto desviador como de confinamiento y las deformaciones permanentes acumuladas por número de ciclo; datos que serán utilizados para calibrar el modelo de deformación permanente que mejor se adapte a cada material.

Seguidamente, se muestra en la Figura 8 el interfaz del programa utilizado, donde los datos de entrada para cada uno de los ensayos son: las dimensiones del espécimen (diámetro y altura en milímetros), el patrón de carga (haversiana), el esfuerzo desviador en kilopascales (kPa), el esfuerzo de contacto en kPa, el tiempo del ciclo de carga en milisegundos, el tiempo de repetición del ciclo de carga en milisegundos (ms) y el esfuerzo de confinamiento en kPa.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 29 de 112

Figura 8

Datos de entrada, interfaz del software

🥰 UTS014 1.10 Asphalt Permanent Deformation Test										
File Run Options View Help										
😂 🗸 😰 📓 😤 🎦 New 🗽 Levels 🕅 K Start 🖉 Stap										
General Set up parameters Performance tuning Chart options Test results data										
Specimen information Identification Dimensions Point 1 Point 2 Point 3 Point 4 Point 5 Point 6 Average Std De Length (mm) 64.0 64.0 100.0 100.0 sea (mm²) Std De Plameter (mm) 100.0 Section 7854.0	Axial loading Cyclic loading stress (kPa) 200 Confinement Function Cyclic loading stress (kPa) 200 Confinement C Static Seating stress (kPa) 5 C Rectangular Loading cycle width (ms) 100 Loading cycle repeat time (ms) 1000 Test termination Maximum cycle count 40000 Axial stress (kPa) 20 Enable Axial stress (kPa) 20 T Enable Time duration (s) 600									

En adición, se realiza una precarga de acondicionamiento del espécimen, por lo que se debe establecer un tiempo de duración en segundos para una carga axial en kPa. En el caso de los ensayos de deformación permanente, se realiza el acondicionamiento por un periodo corto de tiempo, donde no se exceden los 45 segundos con una carga de 20 kPa. Esto con la finalidad de reducir la variabilidad de todos los cambios de deformación que pueda sufrir el espécimen por el reacomodo de partículas y vacíos, lo que puede afectar de forma negativa en la adquisición de información importante para el modelo, sobre todo en los primeros ciclos de carga, que es cuando la muestra tiende a deformarse a una tasa más rápida.

Otro dato importante para considerar es la condición de falla en la cual el ensayo se detendrá, en este caso específico, el sistema toma en cuenta dos posibles opciones: la primera depende del porcentaje de deformación axial acumulada y, la segunda, del número máximo de ciclos, que en este caso es la de interés y por medio de la cual se va a regir el final del ensayo.

Los datos de salida que se necesitan para calibrar el modelo de deformación permanente deseado corresponden según la bibliografía, principalmente al número de ciclos de carga y la deformación permanente acumulada para dicho número de ciclos. Sumado a esos dos parámetros, se encuentran el esfuerzo desviador y el esfuerzo de confinamiento para obtener resultados más cercanos a la realidad, puesto que ambos influyen directamente en el comportamiento del material y, por lo tanto, también son considerados en este proyecto.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 30 de 112

3 Resultados

3.1 Caracterización de muestras

La caracterización de las bases, subbases y subrasantes se realizó mediante la realización de diversos ensayos para determinar propiedades como la gravedad específica, humedad óptima, densidad máxima seca, límites de Atterberg, índice de durabilidad, abrasión, CBR, entre otros. Los resultados de dicha caracterización de observan en el Apéndice 1: Caracterización física de las muestras de estudio, un resumen de los resultados se presenta en la Tabla 5.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Tabla 5

Caracterización de las muestras de suelo y bases granulares

	Proced	lencia	Función	Grave espec	edad sífica	Próctor Límites de Atterberg		Clasificación		% Fino	Abrasión	% Caras fracturadas	CBR			
ld	Lugar	Тајо		Parte gruesa	Parte fina	Humedad óptima	Densidad máxima seca (kg/m³)	LL	LP	IP	SUCS	AASHTO	-			
А	Guachipelín	El Común	Base	2,56	2,65	6,7	1765	NP			SW	A-1-a (0)	10,0	33	100	110
В	Zent	Chirripó	Base	2,77	2,75	6,4	2255	19	15	4	GW	A-1-a (0)	6,3	21	80	140
С	Taras – La Li	ma	Base	2,46	2,61	14,3	1801	25	24	4	GM	A-1-b (0)	20,1	46	100	182,3
D	Santa Eulalia	La Pista	Base	2,75	2,88	10,8	2124	NP			GM	A-3 (0)	7,1	36	100	223,7
Е	Zarcero	Montañita	Base	2,57	2,6	8,4	2028	NP			GW	A-1-a (0)	10,1	28	100	103,3
F	Rancho Redondo	Rancho Redondo	Base	2,62	2,67	7,7	2098	NP			GW	A-1-a (0)	12	52	100	201,2
G	Sarapiquí	Horquetas	Base	2,7	NP	6,2	2231	24	19	5	GP	A-1-a (0)	4,1	16	50	137
Н	Zent	Chirripó	Subbase	2,74	2,75	6,9	2245	NP			GW	A-1-a (0)	7,2	17	94	115
I	Rancho Redondo	Rancho Redondo	Subbase	2,62	2,66	6,9	2125	NP			GW	A-1-a (0)	10,7	56	100	113,2
J	Santa Eulalia	La Pista	Subbase	2,67	2,77	16,3	1791	39	25	14	GC	A-2-6 (0)	13,9	46	100	22,0
Κ	Hone Creek		Subrasante	2,70		18,6	1660	51	27	24	SC	A-7-6(3)	33,4	-	-	15,7
L	Lorena		Subrasante	2,66		25,4	1510	60	37	23	MH	A-7-5(14)	49,9	-	-	6,7
Μ	El Guapote		Subrasante	2,71		22,2	1570	41	30	11	ML	A-7-5(8)	78,7	-	-	7,2
Ν	Villa Colón		Subrasante	2,68		40,3	1085	98	65	33	MH	A-7-5(26)	88,9	-	-	9,5
0	Barrigones		Subrasante	2,68		25,2	1510	65	35	30	SM	A-7-5(11)	14,4	-	-	4,8
Ρ	Río Claro		Subrasante	2,67		32,0	1346	36	25	11	SM	A-2-6(0)	14,4	-	-	19,9
Q	San Cayetan	D	Subrasante	2,77		44,6	1190	85	52	33	SC	A-7-5(13)	89,9	-	-	16
R	Bijagual		Subrasante	2,74		39,4	1245	79	51	28	MH	A-7-5(40)	98,4	-	-	10,3
S	San Rafael		Subrasante	2,76		40,9	1232	85	53	32	MH	A-7-5(17)	89,5	-	-	12,3
Т	Cinchona		Subrasante	2,56		65,0	850	72	61	11	SM	A-2-7(0)	38	-	-	14,8



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

3.2 Módulo resiliente

Para el ensayo de módulo resiliente se prepara el material al estado de humedad óptima. Además, el valor del módulo resiliente para las bases y subbases se estimará con el modelo que se obtiene a partir de la ecuación [1].

$$M_r = K_1 \cdot \theta^{K_2} \tag{1}$$

Donde:

 M_r = Módulo resiliente, kPa

 K_1, K_2 = Coeficientes de modelo de regresión lineal múltiple θ = Invariante de esfuerzos (ecuación [2]), kPa.

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{2}$$

Donde:

 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = Esfuerzos principales, kPa

Paro los suelos, se estimará el modelo Universal, mostrado en la [3].

$$M_{r} = k_{1} P a \left(\frac{\theta}{P a}\right)^{k_{2}} \left(\frac{\tau_{oct}}{P a}\right)^{k_{3}}$$

$$\pi_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{3} - \sigma_{1})^{2}}$$
[3]

Donde:

 M_r = Módulo resiliente, kPa K_1, K_2, K_3 = Coeficientes de modelo de regresión lineal múltiple θ = Invariante de esfuerzos (ecuación [2]), kPa.

 τ_{oct} = Cortante octaédrico, kPa



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 33 de 112

3.2.1 Material granular

Los resultados del ensayo de módulo resiliente de las bases y en las subbases granulares estudiadas se muestran a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6

Resumen de los coeficientes de regresión lineal y valores estadísticos para las bases y subbases

اط	Proce	dencia	Módulo Resiliente					
IU	Lugar	Tajo Coeficiente		Valor	t	R ²		
А	Guachinolín	El Común	K1	8055,488	100,592	0.07		
	Guachipein	LICOIIIUII	K ₂	0,510	32,002	0,97		
D	Zont	Chirrinó	K₁	8015,825	64,343	0.05		
В	Zent	Chimpo	K ₂	0,594	23,851	0,95		
C	Taras La Lim		K 1	13856,851	46,585	0.80		
C		ia	K ₂	0,487	13,339	0,00		
Р	Santa Eulalia	La Diata	K1	7263,306	41,308	0 02		
D		La Fisia	K ₂	0,566	14,762	0,03		
F	Zarcoro	Montoñito	K₁	2239,176	16,805	0.57		
E	Zarcero	WORldina	K ₂	0,626	7,652	0,37		
F	Rancho	Rancho	K₁	3314,034	30,495	0.78		
1	Redondo	Redondo	K ₂	0,596	12,572	0,70		
C	Saraniquí	Horquotas	K₁	4142,765	50,721	0.01		
9	Sarapiqui	Tiorquetas	K ₂	0,639	21,816	0,91		
Ц	Zent	Chirrinó	K1	8015,825	64,343	0.05		
11	Zent	Спітро	K ₂	0,594	23,851	0,95		
1	Rancho	Rancho	K1	1949,106	38,532	0.00		
I	Redondo	Redondo	K ₂	0,640	20,410	0,90		
1	Santa Eulalia	La Dicta	K 1	2803,677	39,800	0.97		
J		La FISIA	K ₂	0,604	16,990	0,07		



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 34 de 112

3.2.2 Suelos

Para el caso de los suelos estudiados, los resultados del ensayo de módulo resiliente se muestran a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7

Resumen de los coeficientes de regresión lineal y valores estadísticos para las subrasantes

Id	Procedencia		Módu		
10	Lugar	Coeficiente	Valor	t	R ²
		K ₁	608,620	261,459	
K	Hone Creek	K ₂	0,530	17,766	0,70
		K ₃	-0,577	-22,924	
		K ₁	764,830	217,034	
L	Lorena	K ₂	0,197	5,393	0,80
		K ₃	-0,729	-23,461	
		K1	731,442	251,519	
Μ	El Guapote	K ₂	0,235	7,474	0,71
		K ₃	-0,610	-22,894	
		K1	408,144	506,306	
Ν	Villa Colón	K ₂	0,062	4,128	0,94
		K ₃	-0,675	-54,028	
		K1	483,368	208,587	
0	Barrigones	K ₂	0,362	9,926	0,44
		K ₃	-0,050	-1,604	
		K1	246,199	148,545	
Р	Río Claro	K ₂	0,552	11,510	0,75
		K ₃	-0,915	-22,096	
		K1	398,298	281,143	
Q	San Cayetano	K ₂	0,452	17,035	0,65
		Kз	-0,161	-7,046	
		K1	754,051	243,671	
R	Bijagual	K ₂	0,194	5,953	0,82
		Kз	-0,677	-24,543	
		K1	1355,997	219,044	
S	San Rafael	K ₂	0,062	1,627	0,62
		Kз	-0,450	-13,841	
		K ₁	239,456	175,080	
Т	Cinchona	K ₂	0,744	18,155	0,67
		K₃	-0,393	-11,454	



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 35 de 112

3.3 Deformación permanente

3.3.1 Bases granulares

Los resultados del ensayo de deformación permanente de las bases granulares estudiadas se encuentran a continuación, los esfuerzos utilizados se muestran en la Tabla 3.

Material A (Tajo El Común)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para la base del Tajo El Común se pueden observar en la Figura 9.



Deformación permanente en función del número de ciclos para el material A



Material B (Tajo Chirripó)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para la base del Tajo Chirripó se pueden observar en la Figura 10.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 36 de 112

Figura 10

Deformación permanente en función del número de ciclos para el material B



Material C (Taras - La Lima)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para la base del proyecto Taras – La Lima se pueden observar en la Figura 11.

Figura 11






Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 37 de 112

Material D (Tajo La Pista)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para la base del Tajo La Pista se pueden observar en la Figura 12.

Figura 12



Deformación permanente en función del número de ciclos para el material D

Material E (Tajo La Montañita)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para la base del Tajo La Montañita se pueden observar en la Figura 13.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 38 de 112

Figura 13

Deformación permanente en función del número de ciclos para el material E



Material F (Tajo Rancho Redondo)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para la base del Tajo Rancho Redondo se pueden observar en la Figura 14.







Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 39 de 112

Material G (Quebrador Horquetas)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para la base del Quebrador Horquetas se pueden observar en la Figura 15.

Figura 15



Deformación permanente en función del número de ciclos para el material G

3.3.2 Subbases granulares

Los resultados del ensayo de deformación permanente de las subbases granulares estudiadas se encuentran a continuación, los esfuerzos utilizados se muestran en la Tabla 3.

Material H (Tajo Chirripó)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para la subbase del Tajo Chirripó se pueden observar en la Figura 16.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 40 de 112

Figura 16

Deformación permanente en función del número de ciclos para el material H



Material I (Tajo Rancho Redondo)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para la subbase del Tajo Rancho Redondo se pueden observar en la Figura 17.







Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 41 de 112

Material J (Tajo La Pista)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para la subbase del Tajo La Pista se pueden observar en la Figura 18.

Figura 18



Deformación permanente en función del número de ciclos para el material J

3.3.3 Subrasante

Los resultados del ensayo de deformación permanente de las subrasantes estudiadas se encuentran a continuación, los esfuerzos utilizados se muestran en la Tabla 4.

Material K (Hone Creek)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para el suelo de Hone Creek se pueden observar en la Figura 19.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 42 de 112

Figura 19

Deformación permanente en función del número de ciclos para el material K



Material L (Lorena)

Los resultados del ensayo de deformación permanente sobre el suelo de Lorena se pueden observar en la Figura 20.

Figura 20

Deformación permanente en función del número de ciclos para el material L





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 43 de 112

Material M (El Guapote)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para el suelo de El Guapote se pueden observar en la Figura 21.

Figura 21



Deformación permanente en función del número de ciclos para el material M

Material N (Villa Colón)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para el suelo de Villa Colón se pueden observar en la Figura 22.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 44 de 112

Figura 22

Deformación permanente en función del número de ciclos para el material N



Material O (Barrigones)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para el suelo de Barrigones se pueden observar en la Figura 23.







Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 45 de 112

Material P (Río Claro)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para el suelo de Río Claro se pueden observar en la Figura 24.

Figura 24



Deformación permanente en función del número de ciclos para el material P

Material Q (San Cayetano)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para el suelo de San Cayetano se pueden observar en la Figura 25.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 46 de 112

Figura 25

Deformación permanente en función del número de ciclos para el material Q



Material R (Bijagual)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para el suelo de Bijagual se pueden observar en la Figura 26.







Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 47 de 112

Material S (San Rafael)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para el suelo de San Rafael se pueden observar en la Figura 27.

Figura 27



Deformación permanente en función del número de ciclos para el material S

Material T (Cinchona)

Los resultados del ensayo de deformación permanente para el suelo de Cinchona se pueden observar en la Figura 28.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 48 de 112

Figura 28

Deformación permanente en función del número de ciclos para el material T





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

4 Modelo de deformación permanente

4.1 Modelos individuales

La forma del modelo de predicción utilizado para todos los casos se muestra en la ecuación [4].

$$DP = 10^{\beta_1'} N^{\beta_2'} \sigma_{desv}^{\beta_3'} \sigma_{conf}^{\beta_4'} W^{\beta_5}$$
[4]

Donde:

N =Número de ciclos $\sigma_{desv} =$ esfuerzo desviador σ_{conf} = esfuerzo de confinamiento %w = porcentaje de humedad de la muestra a la hora de la falla

Para todos los materiales estudiados, los coeficientes de regresión para la ecuación [4] se presentan en la Tabla 8 y las gráficas de ajuste se muestran en las secciones 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3.



LanammeUCR

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Tabla 8

Resumen de los coeficientes de regresión del modelo de deformación permanente y valores estadísticos

Procedencia			Coeficientes de regresión / Variable asociada											
ld	Lugar	Тајо	Función	β1 / Intercepto	t	β2 / N	t	$\beta 3/\sigma_{desv}$	t	$\beta 4/\sigma_{conf}$	t	β5/%w	t	R ²
Α	Guachipelín	El Común	Base	15,61	126	0,09	58	1,11	240	-0,26	-24	-23,12	-133	0,83
В	Zent	Chirripó	Base	3,66	59	0,10	35	1,10	122	0,81	61	-11,09	-117	0,74
С	Taras - La Lima	l	Base	1,33	27	0,02	31	0,47	158	0,16	48	-2,59	-60	0,75
D	Santa Eulalia	La Pista	Base	0,74	25	0,03	44	0,44	281	0,15	72	-2,70	-85	0,85
Е	Zarcero	Montañita	Base	-3,16	-117	0,03	41	0,67	388	-0,03	-12	1,44	50	0,89
F	Rancho Redondo	Rancho Redondo	Base	0,64	32	0,02	34	0,69	333	-0,09	-35	-2,57	-117	0,84
G	Sarapiquí	Horquetas	Base	-1,80	-174	0,02	33	0,51	264	0,13	54	-0,10	-9	0,77
Н	Zent	Chirripó	Subbase	-2,91	-177	0,11	66	1,37	265	-0,74	-108	0,15	7	0,84
I	Rancho Redondo	Rancho Redondo	Subbase	-2,33	-111	0,03	32	0,68	266	0,02	5	0,55	24	0,77
J	Santa Eulalia	La Pista	Subbase	-8,86	-63	0,02	17	0,14	27	0,53	92	5,92	50	0,55
Κ	Hone Creek		Subrasante	-0,84	-15	0,05	90	0,63	376	0,62	325	-1,77	-40	0,93
L	Lorena		Subrasante	-3,08	-124	0,07	115	0,79	405	0,75	336	-0,33	-19	0,87
Μ	El Guapote		Subrasante	-5,35	-254	0,07	331	0,82	1426	0,66	904	1,40	90	0,98
Ν	Villa Colón		Subrasante	16,81	16	-0,01	-1	0,96	55	1,49	81	-13,77	-21	0,60
0	Barrigones		Subrasante	-2,59	-144	0,05	128	0,69	614	0,78	552	-0,68	-48	0,98
Ρ	Río Claro		Subrasante	5,64	99	0,03	115	0,82	1060	0,32	315	-6,29	-150	0,95
Q	San Cayetano		Subrasante	-27,20	-129	0,04	12	1,98	199	-0,52	-43	14,66	113	0,84
R	Bijagual		Subrasante	-32,44	-295	0,04	21	0,80	123	0,88	120	17,72	267	0,80
S	San Rafael		Subrasante	-3,09	-31	0,05	65	1,01	486	0,24	96	0,15	2	0,92
Т	Cinchona		Subrasante	-13,47	-128	0,04	38	0,42	134	0,20	48	6,79	115	0,73





4.1.1 Bases granulares

Los resultados del modelado de deformación permanente de las bases granulares estudiadas se encuentran a continuación:

Material A (Tajo El Común)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la base del Tajo El Común se pueden observar en la Figura 29. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Figura 29

Modelos de deformación permanente para el Material A

Material B (Tajo Chirripó)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la base del Tajo Chirripó, se pueden observar en la Figura 30. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 52 de 112

Figura 30

Modelos de deformación permanente para el Material B



<u>Material C (Taras – La Lima)</u>

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la base del proyecto Taras – La Lima, se pueden observar en la Figura 31. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.







Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 53 de 112

Material D (Tajo La Pista)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la base del Tajo La Pista, se pueden observar en la Figura 32. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Figura 32

Modelos de deformación permanente para el Material D

Material E (Tajo La Montañita)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la base del Tajo La Montañita, se pueden observar en la Figura 33. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 54 de 112

Figura 33





Material F (Tajo Rancho Redondo)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la base del Tajo Rancho Redondo, se pueden observar en la Figura 34. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.







Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 55 de 112

Material G (Quebrador Horquetas)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la base del Quebrador Horquetas, se pueden observar en la Figura 35. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Figura 35

Modelos de deformación permanente para el Material G

4.1.2 Subbases granulares

Los resultados del modelado de deformación permanente de las subbases granulares estudiadas se encuentran a continuación:

Material H (Tajo Chirripó)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subbase del Tajo Chirripó, se pueden observar en la Figura 36. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

1,00

y = 0,9398x

 $R^2 = 0,8149$

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 56 de 112

Figura 36



Material I (Tajo Rancho Redondo)

y = 0,9256x

 $R^2 = 0,7317$

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subbase del Tajo Rancho Redondo, se pueden observar en la Figura 37. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.







Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 57 de 112

Material J (Tajo La Pista)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subbase del Tajo La Pista, se pueden observar en la Figura 38. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Figura 38

Modelos de deformación permanente para el Material J

4.1.3 Subrasantes

Los resultados del modelado de deformación permanente de las bases granulares estudiadas se encuentran a continuación:

Material K (Hone Creek)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subrasante de Hone Creek, se pueden observar en la Figura 39. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 58 de 112

Figura 39



Material L (Lorena)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subrasante de Lorena, se pueden observar en la Figura 40. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.







Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 59 de 112

Material M (El Guapote)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subrasante de El Guapote, se pueden observar en la Figura 41. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Figura 41

Modelos de deformación permanente para el Material M

Material N (Villa Colón)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subrasante de Villa Colón, se pueden observar en la Figura 42. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 60 de 112

Figura 42





Material O (Barrigones)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subrasante de Barrigones, se pueden observar en la Figura 43. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.







Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 61 de 112

Material P (Río Claro)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subrasante de Río Claro, se pueden observar en la Figura 44. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Figura 44

Modelos de deformación permanente para el Material P

Material Q (San Cayetano)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subrasante de San Cayetano, se pueden observar en la Figura 45. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 62 de 112

Figura 45

Modelos de deformación permanente para el Material Q



Material R (Bijagual)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subrasante de Bijagual, se pueden observar en la Figura 46. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.







Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 63 de 112

Material S (San Rafael)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subrasante de San Rafael, se pueden observar en la Figura 47. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Figura 47

Modelos de deformación permanente para el Material S

Material T (Cinchona)

El gráfico con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales para la subrasante de Cinchona, se pueden observar en la Figura 48. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja) y las ecuaciones de las líneas de tendencia de la comparación de los modelos.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 64 de 112



El gráfico con todos los modelos individuales para cada material se presenta en la Figura 49.



Figura 49

Modelos individuales de deformación permanente para todos los materiales



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 65 de 112

4.2 Propuesta de modelo general

Se utilizan un total de tres modelos universales de predicción para todos los casos; los cuales se muestran en las ecuaciones [5], [6] y [7].

$$DP = 10^{\beta_1'} N^{\beta_2'} \sigma_{desv}^{\beta_3'} \sigma_{conf}^{\beta_4'} W^{\beta_5}$$
[5]

$$DP = 10^{\beta_1'} N^{\beta_2'} \sigma_{desv}^{\beta_3'} \sigma_{conf}^{\beta_4'} W^{\beta_5'} W IP^{\beta_6}$$
[6]

$$LogDP = \beta_1 + \beta_2 \times log(N) + \beta_3 \times log(\sigma_{desv}) + \beta_4 \times log(\sigma_{conf}) + \beta_5 \times log(\%w) + \beta_6 \times log(wIP)$$
[7]

Donde:

N = Número de ciclos $\sigma_{conf} =$ esfuerzo de confinamiento $\sigma_{desv} =$ esfuerzo desviador%w = porcentaje de humedad de la muestrawIP = Coeficiente de plasticidada la hora de la falla(material pasando la malla #200 multiplicadopor el IP)

Para todos los materiales estudiados, los coeficientes de regresión se presentan en la Tabla 9.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Tabla 9

Resumen de los coeficientes de regresión de los modelos universales de deformación permanente y valores estadísticos

Modelo		Coeficientes de regresión / Variable asociada										_		
Modelo	Material	β1 / Intercepto	t	β2 / N	t	$\beta 3/\sigma_{desv}$	t	$\beta 4/\sigma_{conf}$	t	β5/%w	t	β6/wIP	t	R ²
חח	Grueso	-2,50	-376	0,04	47	0,47	197	0,16	52	0,69	265	-	-	0,34
DF	Fino	-4,16	-819	0,05	79	0,87	491	0,55	246	0,61	297	-	-	0,53
	Grueso	-2,63	-357	0,04	37	0,43	162	0,37	105	0,40	57	0,07	21	0,53
DP CON WIP	Fino	-4,12	-845	0,05	83	0,88	517	0,56	262	0,93	383	-0,18	-226	0,57
DP	Grueso	-1,96	-471	0,04	64	0,52	346	0,40	211	0,41	407	-	-	0,31
Logarítmico	Fino	-2,33	-514	0,04	63	0,53	330	0,42	212	1,03	463	-0,21	-260	0,41





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

A continuación, se presentan los gráficos con la comparación entre el modelo de previsión de deformación permanente con respecto a los resultados experimentales, empezando por el modelo DP que se presenta en la Figura 50. En el gráfico también se muestra la línea de igualdad (línea roja).

Figura 50



Modelo universal DP para todos los materiales

Al incluir el coeficiente de plasticidad en el modelado, se obtiene el modelo DP con wIP como se muestra en la Figura 51.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 68 de 112

Figura 51

Modelo universal DP con wIP para todos los materiales



Finalmente, los resultados del modelo logarítmico se muestran en la Figura 52.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 69 de 112

Figura 52

Modelo universal DP logarítmico para todos los materiales





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 70 de 112

5 Análisis de Resultados

5.1 Características físicas y mecánicas de los materiales estudiados

Los resultados de las características físicas y mecánicas de los suelos y bases granulares estudiados se muestran en la Tabla 5, presentada anteriormente. Con base en estos resultados, para los materiales granulares (bases y subbases) se puede establecer que el 70% de los materiales granulares estudiados, cumplen con lo establecido en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, conocido como CR 2020 (MOPT, 2022) para poder ser utilizadas como material de base o subbase en estructuras de pavimento para carreteras (ver Tabla 10).

Tabla 10

Cumplimiento de las especificaciones técnicas para capas de Base del CR 2020

ld	Procedencia	Función	Cumplimiento Límites LL<25, IP<6	Cumplimiento Abrasión <50	Cumplimiento CBR >80
А	Guachipelín	Base	Si	Si	Si
В	Zent	Base	Si	Si	Si
С	Taras – La Lima	Base	Si	Si	Si
D	Santa Eulalia	Base	Si	Si	Si
Е	Zarcero	Base	Si	Si	Si
F	Rancho Redondo	Base	Si	No	Si
G	Sarapiquí	Base	Si	Si	Si
Н	Zent	Subbase	Si	Si	Si
I	Rancho Redondo	Subbase	Si	No	Si
J	Santa Eulalia	Subbase	No	Si	No

Es importante señalar que todos los materiales estudiados fueron adquiridos de tajos que suplen proyectos carreteros, tanto para la red vial nacional como para la red vial municipal y que, de acuerdo con la normativa, deberían de cumplir con dichas especificaciones técnicas; por lo que, se puede señalar que aún con su incumplimiento, estos materiales son los que efectivamente se encuentran colocados en sitio dentro de distintos proyectos viales. Particularmente, en el caso del material proveniente de Santa Eulalia, Tajo La Pista, el material de subbase no cumple con los límites de plasticidad, ni el CBR para poder ser considerado viable como tal. En términos de resistencia el 90% de los materiales granulares poseen CBR's por encima de 103, lo que implica una buena capacidad mecánica.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 71 de 112

En cuanto a las subrasantes, fueron seleccionadas de distintos puntos de Costa Rica al margen de la Red Vial Nacional de alta capacidad, esto significa que son materiales que componen dichas estructuras de pavimento. El 60 % de los materiales cuenta con CBR's por encima de 10, lo que implica que son suelos con una capacidad de soporte de media a baja. Además, el 70 % de estos son limos que poseen índices de plasticidad de más de 20 y límites líquidos de más de 50, lo que significa que son materiales altamente susceptibles a la deformación plástica.

Con respecto al ensayo de módulo resiliente, el 80 % de los materiales granulares poseen un modelo de ajuste con un coeficiente de determinación (R^2) por encima de 0,8 para un 95% de confianza en sus variables de predicción (Tabla 6). En el caso del material proveniente de Zarcero, Tajo La Montañita, el coeficiente de correlación tiene un valor de 0,6 para un 95% de confianza, por lo que se puede interpretar que el uso del invariante de esfuerzos (θ) como única variable de predicción presenta mayor dispersión alrededor de la línea de mejor ajuste.

Por su parte, en el caso de los módulos resilientes de las subrasantes (Tabla 7), el 90 % de los materiales presenta un R² por encima de 0,6 para un 95 % de confianza, en el caso de los suelos, su origen geológico presenta un reto importante para generar modelos con mayor capacidad de predicción y menos dispersión.

5.2 Ensayo de deformación permanente

Fue posible poner en práctica el protocolo de ensayo establecido para obtener la deformación permanente de los materiales estudiados. De acuerdo con los resultados mostrados en las Figuras Figura 9 a la Figura 18, se puede observar que el 90 % de los materiales granulares poseen deformaciones por debajo del 1% e inclusive el 50 % tienen deformaciones por debajo del 0,5%. Únicamente el material procedente de Santa Eulalia (Tajo la Pista), posee deformaciones por debajo del 1,75 %, lo que concuerda con que dicho material posee finos más plásticos y un CBR de 22, lo que implica que no posee la resistencia ni características físicas para cumplir como Subbase o Base Granular de acuerdo con el CR 2020.

Con respecto a las subrasantes, las deformaciones reportadas abarcan un rango de 0,5% a 2,5%. Los tres materiales que presentan deformaciones por encima del 2% son San Cayetano, Bijagual y Cinchona. En el caso de San Cayetano y Bijagual poseen un porcentaje de material pasando la #200 por encima del 90 %, además de tener límites líquidos por encima de 80 e índices plásticos cercanos a 30. En el caso de Cinchona, también posee un límite líquido alto, pero además su humedad de compactación es del 65% lo que implica que es un material muy poroso (absorbente) y por lo tanto su capacidad de deformación es alta debido a la susceptibilidad asociada al cambio de humedad.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 72 de 112

5.3 Modelos de predicción de la deformación permanente en materiales granulares y suelos

Los modelos de deformación permanente generados para cada material (Tabla 8) muestran R² por encima de 0,7 para un 95 % de confianza. Solamente se excluyen el material de subbase del Tajo la Pista que posee un coeficiente de determinación de 0,5 y el suelo de Villa Colón con un R² de 0,6 pero para un 80 % de confianza. En general, las variables seleccionadas para generar el modelo de predicción muestran un ajuste adecuado de los datos y poca dispersión a lo largo de la línea de mejor ajuste como se muestra en las Figuras Figura 39 a la Figura 48.

Analizando las variables incorporadas dentro del modelo, se puede decir que conforme aumenta el número de ciclos (N), aumenta la deformación permanente para todos los casos; mismo que ocurre con el esfuerzo desviador (σ_{desv}) quien aporta la carga. Con respecto al esfuerzo de confinamiento y la humedad, depende del material, si esta variable aporta a la deformación conforme aumenta o si más bien la disminuye. En el caso de los suelos finos, para el 90 % de los casos, conforme aumenta el esfuerzo de confinamiento, aumenta la deformación. La variable humedad se decidió incorporarla en el modelo con la finalidad de contemplarla en un futuro, dado el impacto que tiene esta variable en la magnitud de la deformación permanente que se puede alcanzar en estos materiales, sin embargo, en este estudio no se hicieron ensayos con variaciones de humedad, lo que explica porque en algunos casos la variable podría no aumentar la deformación.

Se proponen tres modelos de predicción generales que buscan crear una única ecuación capaz de predecir la deformación permanente para materiales de grano fino o grueso (ecuaciones [5], [6] y [7]). Se realizó una primera modelación incluyendo todos los datos, sin embargo, no se encontró un ajuste adecuado ni coeficientes de determinación por encima del 0,5. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9. Ninguno de los modelos propuestos muestra un R² por encima de 0,6. La forma que permite un mejor ajuste de los datos, es la que incluye el coeficiente de plasticidad (wIP), arrojando coeficientes de determinación por encima de 0,5 para el 95% de confianza.


Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 73 de 112

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Se logró obtener características físicas y mecánicas de 20 materiales granulares y suelos que se utilizan en proyectos de carretera, dichas características permiten una mejor comprensión de los materiales y su comportamiento antes cargas repetidas.

Con respecto al ensayo de deformación permanente, los resultados obtenidos permiten concluir que la deformación, es el modo de falla que afecta a los materiales granulares y suelos, y además; se ve afectada principalmente por el número de ciclos, densidad, características físicas de las partículas y el nivel de esfuerzos. Además, para una misma subrasante, a pesar de pretender preparar los especímenes de ensayo con la humedad óptima de compactación, existieron variaciones entre el 1% y 2 % de humedad entre las mismas, lo que permitió observar grandes cambios en la deformación con bajas variaciones en la humedad.

Se logró generar modelos matemáticos que permitan cuantificar el deterioro acumulado en las capas de subrasante y granulares a través del tiempo. Los modelos individuales cuentan con coeficientes de determinación adecuados (0,7 para un 95% de confianza). Además, fue posible obtener tres modelos generales separando los materiales finos de los gruesos, sin embargo, solo uno de los modelos logró superar el R^2 de 0,5.

De acuerdo con lo anterior, es posible observar que los materiales poseen comportamientos distintos, inclusive entre los mismos materiales granulares, por lo que, si se desea un correcto diseño de pavimentos donde se reduzca el daño por deformación permanente aplicando un modelo general, se recomienda ensayar más materiales e incluir otras características físicas que permitan un mejor ajuste de los datos, así como; apegarse al cumplimiento de las especificaciones técnicas nacionales vigentes, dado que los resultados con peor desempeño incumplían alguna de estas.

Finalmente, a pesar de que los resultados se limitan a una aplicación enmarcada a los materiales ensayados, constituye una primera aproximación de un modelo general que, eventualmente, puede ser incorporado dentro de la guía de diseño mecanística-empírica para pavimentos de Costa Rica. Su uso e interpretación queda circunscrito a criterios técnicos pertinentes.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda continuar investigando otros tipos de suelos y materiales granulares, así como el efecto de la humedad, con el fin de robustecer los modelos y generar mejores predicciones.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 74 de 112

7 Referencias bibliográficas

- Araya, C. Y. 2015. *Desarrollo de modelos de deformación permanente para materiales granulares y suelos*. Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Arias, E., Camacho, E., Aguiar, J.P., Loría, L.G. 2018. Calibration of a mechanistic-empirical fatigue model under different moisture conditions [Calibración de un modelo mecánicoempírico de fatiga bajo diferentes condiciones de humedad]. Transportation Research Board 97th Annual Meeting Washington D.C, United States.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. 1993. *Guía de Diseño AASHTO* 93. Estados Unidos.
- Ávila. T. 2017. *Efecto del contenido de agua en el módulo resiliente de las subrasantes.* Proyecto de Graduación para optar por el grado de Maestría Académica en Ingeniería de Transporte y Vías. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Ávila, T., Araya, C.Y., Aguiar, J.P., Loría, L.G. 2016. Development of Permanent Deformation Models for Granular Materials and Soils [Desarrollo de modelos de deformación permanente para materiales granulares y suelos]. Transportation Research Board 95th Annual Meeting Washington D.C, United States.
- Brown, S. F. 1996. *Soil Mechanics in pavement engineering* [Mecánica del suelo en ingeniería de pavimentos]. 01-05A. Alabama, USA.
- Castro, P. 2007. *Oficio DVOP-5170-07.* Despacho Viceministro Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Concejo Nacional de Vialidad (CONAVI). 2021. *Informe de ejecución 2020. Febrero 2021.* Dirección Financiera, Departamento de Presupuesto. San José, Costa Rica.
- Elfino, M. K. y Davidson, J. L. 1989. Modeling field moisture in resilient modulus testing [Modelación de la humedad de campo en la prueba del módulo resiliente]. *Geotech Special Publication* (24), 31–51.
- Garnica, P., Gómez, J. A., Sesma, J. A. 2002. *Mecánica de materiales para pavimentos*. Publicación técnica No. 197, Instituto Mexicano del Transporte ISSN 0188-7297. Sanfandila, Querétaro, México.
- Gidel, G., Hornych, P., Chauvin, J. J., Breysse, D., & Denis, A. 2001. *Nouvelle approche pour l'étude des déformations permanentes des graves non traitées à l'appareil triaxial à chargements répétés.* Bulletin de Liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 233, 5-21.
- Guimarães, A. C. R. 2009. *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanenteem solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tesis de Doctorado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil
- Harvey, J., Wu, R. 2010. Calibration of asphalt concrete cracking models for California Mechanistic-Empirical Design (CalME) [Calibración de modelos de agrietamiento de



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 75 de 112

concreto asfáltico para el Diseño Mecánico-Empírico de California (CalME)]. Department of Transportation of California. California, United States.

- Huang, Y. 1993. *Pavement analysis and design* [Diseño y análisis de pavimento]. Prentice Hall, USA.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). 2017. *Informe Anual*. MOPT-01-13-01-01-2017. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). 2022. Especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes de Costa Rica CR 2020. San José, Costa Rica.
- Morales, P. J., Chávez, O., López, L. 2009. *Efectos de la alta compactación de la capa de base en pavimentos flexibles.* Universidad Nacional de Ingeniería. Managua, Nicaragua.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). 2004. *Guía de Diseño Empírico-Mecanistica (MEPDG)*. Proyecto NCHRP 1-37, Estados Unidos.
- Leiva Villacorta, F., Vargas Nordcbeck, A., Aguiar Moya, J. P., Loria-Salazar, L. G. 2016. Development and calibration of permanent deformation models [Desarrollo y calibración de modelos de deformación permanente]. *The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainabilit*.: 573-587.
- Leiva Villacorta, F., Vargas Nordcbeck, A., Aguiar Moya, J. P., Loria Salazar, L. G. 2016. Calibration of a Mechanistic-Empirical Fatigue Model Using the PaveLab Heavy Vehicle Simulator [Calibración de un modelo mecánico-empírico de fatiga usando el simulador de vehículos pesados PavLab]. Transportation Research Board 95th Annual Meeting (No. 16-3509). Washington D.C, United States.
- Loría, L. G. 2013. *Desarrollo de la guía de diseño de pavimentos de Costa Rica: CR ME*. Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto XVII, Artículo 118-2-13. Antigua, Guatemala.
- Quintus, H. V., y Killingsworth, B. 1998. Analyses relating to pavement material characterizations and their effects on pavement performance [Análisis relacionado a caracterizaciones de material para pavimento y sus efectos en el rendimiento del mismo]. Publication No. FHWA-RD-97-085, FHWA, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
- Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP). 2014. *Caracterización físico-química de los suelos de Costa Rica*. Informe de Avance: LM-PI-UMP-046-R1. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR. San José, Costa Rica.
- Sauer, E. K., y Monismith, C. L. 1968. *Influence of soil suction on behavior of a glacial till subjected to repeated loading* [Influencia de la succión del suelo en el comportamiento de un aluvión glaciar sujeto a carga continua]. Highw. Res.Rec., 215, 8–23.
- Thadkamalla, G. B., y George, K. P. 1995. Characterization of subgrade soils at simulated field moisture [Caracterización de suelos para sub rasante en un campo de simulación de humedad]. Transportation Research Record. 1481, Transportation Research Board, Washington, D.C., 21–27.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 76 de 112

- Trejos, C., Ávila, T., Aguiar, J. P., Loria, L. G. 2018. Costa Rica's Mechanical Empirical Design Software for Flexible Pavements, CRME [Software de diseño mecánico empírico para pavimentos flexibles de Costa Rica, CRME]. Transportation Research Board 97th Annual Meeting Washington D.C, United States.
- Uzan, J. 1998. Characterization of clayey subgrade materials for mechanistic design of flexible pavements [Caracterización de material arcilloso para sub rasante para el diseño mecánico de pavimentos flexibles]. Transportation Research Record. 1629, Transportation Research Board, Washington, D.C., 188–196
- Vargas, A., Aguiar, J.P., Leiva, F., Loría, L.G. 2015. *Evaluation of fatigue life of asphalt mixtures through the dissipated energy approach* [Evaluación del ciclo de vida de la fatiga en mezclas asfálticas a través del método de energía disipada]. Transportation Research Board 94th Annual Meeting. Washington D.C, United States.
- Witzack, M. et al. 2002. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, NCHRP 1-37A [Guía de diseño mecánico-empírico de pavimento, NCHRP 1-37A]. AASHTO, Washington, DC. Zapata, C.E., Andrei, D., Witczak, M.W. y Houston, W.N. 2007. Incorporation of environmental effects in pavement design [Incorporación de los efectos ambientales en el diseño de pavimentos]. International Journal of Road Materials and Pavement Design, 8(4). 667-693.
- Zapata, C.E. y Cary, C.E. 2009. A new generation of resilient modulus characterization of unbound materials [Una nueva generación de caracterización del módulo resiliente en materiales no consolidados]. Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support, Geotechnical Special Publication, (187). Selected papers from the 2009 International Foundations Congress and Equipment Expo, ASCE, Orlando, Florida. 377-384
- Zapata, C.E. y Houston, W.N. 2009. *Calibration and Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model for Pavement Design* [Calibración y validación del Modelo Mejorado de Integración Climática para el diseño de pavimento]. NCHRP Report 602, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies.
- Zapata, C.E., Perera, Y.Y. y Houston, W.N. 2009. Matric suction prediction model in new AASHTO Mechanistic- Empirical Pavement Design Guide [Modelo de predicción de la succión matricial de la nueva Guía de Diseño Mecánico-Empírico de Pavimentos de AASHTO]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2101). Geology and Properties of Earth Materials. 53-62.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 77 de 112

8 Apéndices

8.1 Apéndice 1: Caracterización física de las muestras de estudio

8.1.1 Material A (Base de Tajo El Común)

El agregado presenta una cantidad significativa de caras fracturadas, de color gris con partículas amarillentas flotantes, medianamente compactado y, aparentemente bien graduado. No presenta evidencia de contaminación orgánica. El tamaño máximo presente es de 19,5 mm, y se clasifica como SW "arena con grava y limo" según SUCS y A-1-a (0) según AASHTO. El material es proveniente del río Tajo El Común en Guachipelín de Escazú. Cabe destacar que este es el mismo agregado utilizado para la construcción de los tramos de prueba en el LPEN (Laboratorio de pavimentos a escala natural) para el experimento 2 (2019-2023). Las gravedades específicas del agregado se pueden apreciar en la Tabla A 1 y la Tabla A 2. Además, la granulometría se encuentra en la Figura A 1; la prueba próctor modificada en la Figura A 2.

Tabla A 1

Gravedad específica de la fracción fina del material A

Gravedad específica fracción fina Absorción			
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,65	2,03	2,26	11,5

Tabla A 2

Gravedad específica de la fracción fina del material A

Gravedad es	Absorción		
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,56	2,06	2,26	9,4

Figura A 1

Curva granulométrica del material A





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 78 de 112

Figura A 2

Prueba próctor modificado para el material A



8.1.2 Material B (Base de Tajo Chirripó)

El material es un agregado de río triturado con pocas caras fracturadas y muy redondeadas, de color gris con partículas amarillentas, medianamente compactado, aparentemente bien graduado. No presenta evidencia de contaminación de material orgánico. Tamaño máximo nominal de 37,5 mm, y se clasifica como GW "grava bien graduada con arena y arcilla" según SUCS y A-1-a (0) según AASHTO. Las gravedades específicas del agregado se pueden apreciar en la Tabla A 3 y la Tabla A 4. Además, la granulometría se encuentra en la Figura A 3; la prueba próctor modificada en la Figura A 4.

Tabla A 3

Gravedad específica de la fracción fina del material B

Gravedad específica fracción fina Absorción			
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,75	2,39	2,52	5,5

Tabla A 4

Gravedad específica de la fracción fina del material B

Gravedad específica fracción gruesa Absorción			
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,77	2,56	2,64	2,9



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 79 de 112

Figura A 3



Figura A 4



8.1.3 Material C (Base del proyecto Taras-La Lima)

El material es una base granular utilizada en la construcción del proyecto Taras-La Lima. Tamaño máximo nominal de 37,5 mm, y se clasifica como GM "grava limosa con arena" según SUCS y A-1-b (0) según AASHTO. Las gravedades específicas del agregado se pueden apreciar en la Tabla A 5 y la Tabla A 6. Además, la granulometría se encuentra en la Figura A 5; la prueba próctor modificada en la Figura A 6, y el gráfico de la prueba CBR en la Figura A 7.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 80 de 112

Tabla A 5

Gravedad específica de la fracción fina del material C

Gravedad específica fracción fina			Absorción	
Gs	Gbs	Gbss	(%)	
2,61	2,06	2,27	10,1	

Tabla A 6

Gravedad espe	Gravedad específica de la fracción gruesa del material C					
Gravedad específica fracción gruesa Absorción						
Gs	Gbs	Gbss	(%)			
2,46	1,82	2,08	14,3			

Figura A 5

Curva granulométrica del material C





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Página 81 de 112

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Figura A 6

Próctor modificado para el material C







8.1.4 Material D (Base del Tajo La Pista)

El material es una base granular proveniente del Tajo La Pista en Santa Eulalia, del cantón de Atenas en Alajuela. Tamaño máximo nominal de 25 mm, y se clasifica como GM "grava mal graduada con arena y limo" según SUCS y A-3 (0) según AASHTO. Las gravedades específicas



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 82 de 112

del agregado se pueden apreciar en la Tabla A 7 y la Tabla A 8. Además, la granulometría se encuentra en la Figura A 9; la prueba próctor modificada en la Figura A 10, y el gráfico de la prueba CBR en la El material es una base granular proveniente del Tajo Rancho Redondo en Rancho Redondo, del cantón de Goicoechea de San José. Tamaño máximo nominal de 62,5 mm, y se clasifica como GW "grava bien graduada con arena y limo" según SUCS y A-1-a (0) según AASHTO. Las gravedades específicas del agregado se pueden apreciar en la Tabla A 11 y la Tabla A 12. Además, la granulometría se encuentra en la Figura A 14; la prueba próctor modificada en la Figura A 15, y el gráfico de la prueba CBR en la Figura A 16.

Tabla A 11

Gravedad específica de la fracción fina del material F

Gravedad específica fracción fina Absorción			
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,67	2,28	2,42	6,40

Tabla A 12

Gravedad específica de la fracción gruesa del material F

Gravedad específica fracción gruesa Absorción				
Gs	Gbs	Gbss	(%)	
2,62	2,36	2,46	4,20	

Figura A 14

Curva granulométrica del material F



Figura A 15.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 83 de 112

Tabla A 7

Gravedad específica de la fracción fina del material D

Gravedad específica fracción fina Absorción			
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,88	2,46	2,6	6

Tabla A 8

Gravedad específica de la fracción gruesa del material D

Gravedad específica fracción gruesa Absorción			
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,75	2,43	2,55	4,8

Figura A 8

Curva granulométrica del material D





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Página 84 de 112

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Figura A 9

Próctor modificado para el material D



Figura A 10 Porcentaje de compactación contra CBR para el material D



8.1.5 Material E (Base del Tajo La Montañita)

El material es una base granular proveniente del Tajo La Montañita en Zarcero, Alajuela. Tamaño máximo nominal de 50 mm, y se clasifica como GW "grava bien graduada con arena y limo" según SUCS y A-1-a (0) según AASHTO. Las gravedades específicas del agregado se



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 85 de 112

pueden apreciar en la Tabla A 9 y la Tabla A 10. Además, la granulometría se encuentra en la Figura A 11; la prueba próctor modificada en la Figura A 12, y el gráfico de la prueba CBR en la Figura A 13.

Tabla A 9

Gravedad específica de la fracción fina del material E						
Gravedad específica fracción fina Absorción						
Gs	Gbs	Gbss	(%)			
2,6	2,06	2,27	10,2			

Tabla A 10

Gravedad específica de la fracción gruesa del material E

Gravedad específica fracción gruesa Absorción			
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,57	2,37	2,45	3,4

Figura A 11

Curva granulométrica del material E





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 86 de 112

Figura A 12

Próctor modificado para el material E



Figura A 13

Porcentaje de compactación contra CBR para el material E



8.1.6 Material F (Base de Tajo Rancho Redondo)

El material es una base granular proveniente del Tajo Rancho Redondo en Rancho Redondo, del cantón de Goicoechea de San José. Tamaño máximo nominal de 62,5 mm, y se clasifica como GW "grava bien graduada con arena y limo" según SUCS y A-1-a (0) según AASHTO.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 87 de 112

Las gravedades específicas del agregado se pueden apreciar en la Tabla A 11 y la Tabla A 12. Además, la granulometría se encuentra en la Figura A 14; la prueba próctor modificada en la Figura A 15, y el gráfico de la prueba CBR en la Figura A 16.

Tabla A 11

Gravedad específica de la fracción fina del material F				
Gravedad específica fracción fina Absorción				
Gs	Gbs	Gbss	(%)	
2,67	2,28	2,42	6,40	

Tabla A 12

Gravedad específica de la fracción gruesa del material F

Gravedad específica fracción gruesa			Absorción
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,62	2,36	2,46	4,20

Figura A 14

Curva granulométrica del material F





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Página 88 de 112

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Figura A 15

Próctor modificado para el material F



Figura A 16

Porcentaje de compactación contra CBR para el material F



8.1.7 Material G (Base de Quebrador Horquetas)

El material es una base granular proveniente del Quebrador Horquetas perteneciente a la municipalidad de Sarapiquí, Heredia. Tamaño máximo nominal de 75 mm, y se clasifica como GP "grava mal graduada con arena" según SUCS y A-1-a (0) según AASHTO. La gravedad específica del agregado se puede apreciar en la Tabla A 13. Además, la granulometría se



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 89 de 112

encuentra en la Figura A 17; la prueba próctor modificada en la Figura A 18, y el gráfico de la prueba CBR en la Figura A 19.

Tabla A 13

Gravedad específica de la fracción gruesa del material G

Gravedad específica fracción fina			Absorción
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,67	2,28	2,42	6,40

Figura A 17

Curva granulométrica del material G





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Página 90 de 112

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Figura A 18

Próctor modificado para el material G



Figura A 19 Porcentaje de compactación contra CBR para el material G



8.1.8 Material H (Subbase de Tajo Chirripó)

El material es un agregado de río triturado con pocas caras fracturadas y muy redondeadas, de color gris con partículas amarillentas, medianamente compactado, aparentemente bien graduado. No presenta evidencia de contaminación de material orgánico. Tamaño máximo nominal de 19,5 mm, y se clasifica como GW "grava bien graduada con arena y limo" según



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 91 de 112

SUCS y A-1-a (0) según AASHTO. Las gravedades específicas del agregado se pueden apreciar en la Tabla A 14 y la Tabla A 15. Además, la granulometría se encuentra en la Figura A 20; la prueba próctor modificada en la Figura A 21.

Tabla A 14

Gravedad específica de la fracción fina del material H					
Gravedad específica fracción fina Absorción					
Gs	Gbs	Gbss	(%)		
2,75 2,40 2,52 5,4					

Tabla A 15

Gravedad específica de la fracción gruesa del material H

Gravedad específica fracción gruesa			Absorción
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,74	2,54	2,62	2,8

Figura A 20

Curva granulométrica del material H





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 92 de 112

Figura A 21

Próctor modificado para el material H



8.1.9 Material I (Subbase de Tajo Rancho Redondo)

El material es una subbase granular proveniente del Tajo Rancho Redondo en Rancho Redondo, del cantón de Goicoechea de San José. Tamaño máximo nominal de 75 mm, y se clasifica como GW "grava bien graduada con arena y limo" según SUCS y A-1-a (0) según AASHTO. Las gravedades específicas del agregado se pueden apreciar en la Tabla A 16 y la Tabla A 17. Además, la granulometría se encuentra en la Figura A 22; la prueba próctor modificada en la

Figura A 23, y el gráfico de la prueba CBR en la Figura A 24.

Tabla A 16

Gravedad especi	fica de la fracción fina (del material I	
Gravedad espe	ecífica fracción fina		Absorción
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,66	2,42	2,51	3,8
Tabla A 17			
Gravedad especí	fica de la fracción grue	sa del material I	
Gravedad espe	ecífica fracción grues	а	Absorción
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,62	2,35	2,45	4,4



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 93 de 112

Figura A 22

Curva granulométrica del material I



Figura A 23

Próctor modificado para el material I





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 94 de 112

Figura A 24

Porcentaje de compactación contra CBR para el material I



8.1.10 Material J (Subbase de Tajo La Pista)

El material es una subbase granular proveniente del Tajo La Pista en Santa Eulalia, del cantón de Atenas de Alajuela. Tamaño máximo nominal de 50 mm, y se clasifica como GC "grava arcillosa con arena" según SUCS y A-2-6 (0) según AASHTO. Las gravedades específicas del agregado se pueden apreciar en la Tabla A 18 y la Tabla A 19. Además, la granulometría se encuentra en la Figura A 25; la prueba próctor modificada en la Figura A 26, y el gráfico de la prueba CBR en la Figura A 27.

Tabla A 18

Gravedad especifica de la fracción fina del material J					
Gravedad específica fracción fina Absorción					
Gs	Gbs	Gbss	(%)		
2,77	2,57	2,65	2,8		

Tabla A 19

Gravedad específica de la fracción gruesa del material J

Gravedad específica fracción gruesa			Absorción
Gs	Gbs	Gbss	(%)
2,67	1,92	2,2	14,5



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 95 de 112

Figura A 25

Curva granulométrica del material J



Figura A 26 *Próctor modificado para el material J*





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 96 de 112

Figura A 27

Porcentaje de compactación contra CBR para el material J



8.1.11 Material K (Subrasante Hone Creek)

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 28. La muestra proveniente de Hone Creek, corresponde a un suelo tipo SC "arena arcillosa" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-2-7(6). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la

Figura A 29. Además, este suelo presenta un CBR de 15,7 % como se puede apreciar en la Figura A 30.

Figura A 28







Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 97 de 112

Figura A 29

Prueba próctor estándar para el material K



Figura A 30





8.1.12 Material L (Subrasante Lorena)

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 31. La muestra proveniente de Lorena, corresponde a uno tipo SM "arena limosa" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(12). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la

Figura A 32. Además, este suelo presenta un CBR de 6,7 % como se puede apreciar en la



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Página 98 de 112

Figura A 33.

Figura A 31

Curva granulométrica del material L



Figura A 32 *Prueba próctor estándar para el material L*





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024

Figura A 33

Página 99 de 112



Porcentaje de compactación contra CBR en el material L

8.1.13 Material M (Subrasante El Guapote)

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 34. La muestra proveniente de El Guapote, corresponde a un suelo tipo ML "limo con arena" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(9). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 35. Además, este suelo presenta un CBR de 7,7 % como se puede apreciar en la Figura A 36.



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112

Figura A 34

Curva granulométrica del material M



Figura A 35 *Próctor modificado para el material M*



Página 100 de



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112

Página 101 de

Figura A 36

Porcentaje de compactación contra CBR del material M



8.1.14 Material N (Subrasante Villa Colón)

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 37. La muestra proveniente de Villa Colón, corresponde a un suelo tipo MH "limo elástico" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(43). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 38. Además, este suelo presenta un CBR de 9,5 % como se puede apreciar en la Figura A 39.

Figura A 37







Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112 Página 102 de

Figura A 38

Prueba próctor estándar del material N



Figura A 39 Porcentaje de compactación contra CBR del material N





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112

Página 103 de

8.1.15 Material O (Subrasante Barrigones)

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 40. La muestra proveniente de Barrigones, corresponde a uno tipo MH "limo elástico" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(34). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 41. Además, este suelo presenta un CBR de 4,8 % como se puede apreciar en la

Figura A 42.

Figura A 40

Curva granulométrica para el material O





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112

Prueba próctor estándar del material O

Figura A 41

1190,0 1180,0 Densidad (kg/m³) 1170,0 1160,0 1150,0 1140,0 1130,0 1120,0 1110,0 29,00 19.00 24,00 34,00 39.00 44,00 49,00 % Humedad

Figura A 42 Porcentaje de compactación contra CBR del material O



8.1.16 Material P (Subrasante Río Claro)

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 43. La muestra proveniente de Río Claro, corresponde a uno tipo SM "arena limosa" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-6(0). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede

Página 104 de



.anammeUCR

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112

Página 105 de

apreciar en la Figura A 44. Además, este suelo presenta un CBR de 19,9 % como se puede apreciar en la Figura A 45.

Figura A 43

Curva granulométrica para el material P



Figura A 44





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112

Página 106 de

Figura A 45

Porcentaje de compactación contra CBR del material P



8.1.17 Material Q (Subrasante San Cayetano)

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 46. La muestra proveniente de San Cayetano, corresponde a un suelo tipo MH "limo elástico" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo tipo A-7-5(0). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 47. Además, este suelo presenta un CBR de 16 % como se puede apreciar en la Figura A 48.

Figura A 46





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112

Figura A 47



Figura A 48

Porcentaje de compactación contra CBR para el material Q



8.1.18 Material R (Subrasante Bijagual)

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 49. La muestra proveniente de Bijagual, corresponde a uno tipo MH "limo elástico con arena" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(32). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 50. Además, este suelo presenta un CBR de 10,3 % como se puede apreciar en la Figura A 51.

Página 107 de



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112

Página 108 de

Figura A 49

Curva granulométrica para el material R



Figura A 50 *Prueba próctor estándar del material R*




Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112

Figura A 51

Porcentaje de compactación contra CBR para el material R



8.1.19 Material S (Subrasante San Rafael)

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 52. La muestra proveniente de San Rafael, corresponde a un suelo tipo MH "limo elástico" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(39). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 53. Además, este suelo presenta un CBR de 12,3 % como se puede apreciar en la

Figura A 54.

Figura A 52



Página 109 de



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112

Figura A 53

Prueba próctor estándar del material S



Figura A 54

Porcentaje de compactación contra CBR del material S



8.1.20 Material T (Subrasante Cinchona)

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 55. La muestra proveniente de Cinchona, corresponde a uno tipo MH "limo elástico arenosos" según SUCS. Por el sistema de

Página 110 de



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112 Página 111 de

clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(6). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 56. Además, este suelo presenta un CBR de 14,8 % como se puede apreciar en la Figura A 57.

Figura A 55



Figura A 56

Prueba próctor estándar del material T





Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

EIC-Lanamme-INF-0637-2024 112

Página 112 de

Figura A 57

Porcentaje de compactación contra CBR del material T

