

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Aplicación del defleómetro de impacto liviano (*light weight deflectometer*)
para el control de calidad de proyectos viales en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Álvaro Josué Guillermo Imeri para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



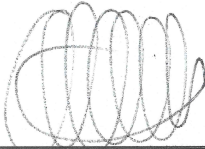
Aplicación del defleómetro de impacto liviano (*light weight deflectometer*)
para el control de calidad de proyectos viales en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Álvaro Josué Guillermo Imeri para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

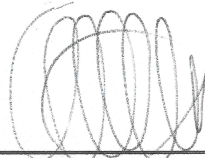
2024

Vo.Bo.:

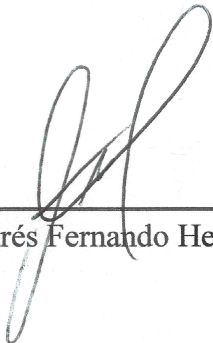
(f) 

Ing. Alvaro Jose Rubio Haasler

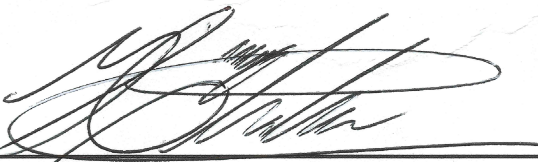
Tribunal examinador:

(f) 

Ing. Alvaro Jose Rubio Haasler

(f) 

Ing. Andrés Fernando Herrera Barrios

(f) 

Ing. Henry Daniel Castañeda Reyes

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de enero de 2025

PREFACIO

Esta investigación surge del interés por mejorar la infraestructura vial en Guatemala y enfrentar los retos técnicos en la construcción de carreteras. Se analiza el uso del Deflectómetro de Impacto Liviano (LWD) como alternativa no destructiva para evaluar el módulo elástico de pavimentos estabilizados con cemento, en comparación con métodos tradicionales como la UCS.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que de una u otra forma, han sido parte fundamental en mi vida y este camino académico.

A Dios, por todos los privilegios y oportunidades que me ha dado, por darme la fuerza, la sabiduría y la perseverancia necesarias.

A mi abuelo Álvaro Guillermo Juárez y a mi papá Álvaro Guillermo Estrada, quienes han sido un pilar fundamental tanto en lo económico como en lo emocional. Su ejemplo y dedicación como ingenieros civiles me han inspirado a seguir este camino.

A mi madre Patricia Imeri, por su amor y apoyo incondicional. Le agradezco por ser siempre mi guía, su fortaleza y cariño han sido un pilar esencial en mi vida.

A mis queridas abuelitas Goly López y Lissette Guzmán, quienes siempre me han apoyado y me han brindado su amor incondicional. Sus palabras de aliento y su cariño constante han sido una fuente de motivación para seguir adelante.

A mi hermana Pamela y mi hermano César, por estar siempre a mi lado, compartiendo conmigo cada momento de alegría y esfuerzo.

A mis Compañeros de Horario, quienes han estado conmigo desde el primer año. Juntos hemos trabajado, aprendido y disfrutado desde el inicio de esta etapa. Su amistad ha sido un motor de energía y alegría.

También a quienes en su momento me brindaron su apoyo y comprensión en el ámbito personal. Su compañía significó mucho para mí en etapas importantes de la carrera.

Finalmente al Ing. Álvaro Rubio, quien no solo me ha brindado su conocimiento y experiencia a través de su asesoría, sino también su amistad.

A todos, gracias por ser parte de este logro.

CONTENIDO

Prefacio	IV
Lista de cuadros	VIII
Lista de figuras	X
Resumen	XI
Abstract	XII
I. Introducción	1
II. Justificación	3
III. Importancia	5
IV. Objetivos	7
A Objetivo general	7
B Objetivos específicos	7
V. Marco teórico	8
A Contexto vial en Guatemala	8
1 Dirección General de Caminos (UE 202)	8
2 Unidad Ejecutora de Conservación Vial (UE 203)	9
3 Fondo Social de Solidaridad (UE 217)	9
4 Descripción del sistema vial en Guatemala	10
5 Estado actual de los pavimentos en Guatemala	12
B Pavimentos	16
1 Tipos de pavimentos	17
2 Capas de un pavimento	18
3 Pavimentos flexibles	19
C Historia y evolución de los deflectómetros de impacto	24
1 Antecedentes y orígenes	24
2 Deflectómetros de impacto	24
3 <i>Falling Weight Deflectometer</i> (FWD)	25
D Compresión sin confinar (UCS)	26

1	Principios de la prueba	26
2	Aplicación en suelos y materiales estabilizados con cemento	27
3	Procedimiento de la prueba	27
4	Normativas aplicables (ASTM D1633)	27
5	Interpretación de los resultados	28
6	UCS en comparación con otros métodos de evaluación de pavimentos	28
7	Limitaciones de la prueba UCS en suelos muy rígidos	28
8	Aplicaciones prácticas y relevancia en el diseño de pavimentos	29
9	Uso de la prueba UCS en proyectos de infraestructura vial en Guatemala	29
E	Deflectómetro de impacto liviano (LWD)	29
1	Origen del LWD	30
2	Principios de funcionamiento	30
3	Regulaciones internacionales	31
4	Comparación entre FWD y LWD	32
5	Aplicabilidad en proyectos viales de Guatemala	33
VI.	Metodología	34
A	Estabilización de suelos con cemento	34
B	Recolección y caracterización de los materiales	35
C	Preparación de muestras	36
D	Ensayos de laboratorio	39
1	Ensayo UCS (<i>Unconfined Compressive Strength</i>)	39
2	Ensayo con el <i>Light Weight Deflectometer</i> (LWD)	41
E	Determinación y comparación de módulos de elasticidad en materiales estabilizados	43
1	Módulo de elasticidad dinámico (Emod) en el LWD	43
2	Módulo de elasticidad secante y módulo de elasticidad verdadero	44
3	Diferencias entre módulo secante y módulo de elasticidad verdadero	44
4	Cálculo del módulo secante para esfuerzos equivalentes del LWD	44
F	Análisis estadístico de resultados	45
1	Estadísticas descriptivas	45
2	Análisis de variación porcentual	45
3	Correlación de Pearson	46
4	Regresión lineal	46
VII.	Resultados	47
A	Resultados de la base triturada La Roca	47

B	Resultados de la base triturada Agreca	52
VIII.	Discusión de resultados	57
A	Comparación entre bases La Roca y Agreca	57
B	Efecto del contenido de cemento en los módulos UCS y LWD	57
C	Limitaciones del LWD en bases estabilizadas	58
D	Análisis estadístico de los resultados	58
E	Conclusión preliminar	59
IX.	Conclusiones	60
X.	Recomendaciones	62
XI.	Referencias	63
XII.	Anexos	67

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.	Rangos de calificación del PCI	14
Cuadro 2.	Comparación de esfuerzos a los que las muestras fueron sometidas de la base <i>La Roca</i>	47
Cuadro 3.	Resultados de la prueba UCS de la base <i>La Roca</i>	48
Cuadro 4.	Resultados de la prueba LWD de la base <i>La Roca</i>	48
Cuadro 5.	Cuadro comparativo entre módulos teóricos (UCS) y módulos prácticos (LWD) de la base <i>La Roca</i>	49
Cuadro 6.	Estadística descriptiva de los resultados de la base <i>La Roca</i>	49
Cuadro 7.	Variación porcentual de los resultados de la base <i>La Roca</i>	50
Cuadro 8.	Comparación de esfuerzos a los que las muestras fueron sometidas de la base <i>Agreca</i>	52
Cuadro 9.	Resultados de la prueba UCS de la base <i>Agreca</i>	53
Cuadro 10.	Resultados de la prueba LWD de la base <i>Agreca</i>	53
Cuadro 11.	Cuadro comparativo entre módulos teóricos (UCS) y módulos prácticos (LWD) de la base <i>Agreca</i>	54
Cuadro 12.	Estadística descriptiva de los resultados de la base <i>Agreca</i>	54
Cuadro 13.	Variación porcentual de los resultados de la base <i>Agreca</i>	55
Cuadro 14.	Resultados detallados del ensayo con deflectómetro de impacto liviano (LWD) para base <i>La Roca</i>	67
Cuadro 15.	Resultados detallados del ensayo con deflectómetro de impacto liviano (LWD) para base <i>Agreca</i>	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Red vial de Guatemala en 2017	10
Figura 2.	Distribución de tipos de carreteras en Guatemala (2017)	11
Figura 3.	Rutas registradas en Guatemala (2017)	11
Figura 4.	Formato de exploración de condición para carreteras con superficie asfáltica	14
Figura 5.	Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías	15
Figura 6.	Capas de un pavimento según especificaciones técnicas	16
Figura 7.	Proceso de producción de mezcla asfáltica	20
Figura 8.	Tipos de productos asfálticos líquidos	21
Figura 9.	Deflectómetro de impacto FWD de Dynatest	26
Figura 10.	Deflectómetro de impacto liviano modelo 3032 LWD de Dynatest	31
Figura 11.	Deflectómetro de impacto liviano modelo 9000 LWD de Terratest	32
Figura 12.	Granulometría del agregado de La Roca	35
Figura 13.	Granulometría del agregado de Agreca	36
Figura 14.	Proceso de preparación para curado de las muestras	37
Figura 15.	Ejemplo de muestra empleada para ensayo LWD	38
Figura 16.	Grupo de muestras de La Roca destinadas a ensayo UCS	38
Figura 17.	Ejemplo de reporte de resultados de la prueba UCS	40
Figura 18.	Ensayo UCS en muestras	41
Figura 19.	Ensayo con LWD en muestras	42
Figura 20.	Ejemplo de medición de módulo haciendo uso del <i>Software</i> de Dynatest	43
Figura 21.	Visualización comparativa de los módulos teóricos y prácticos en función del porcentaje de cemento de la base <i>La Roca</i>	50
Figura 22.	Gráfico de dispersión de los resultados de la base <i>La Roca</i>	51
Figura 23.	Visualización comparativa de los módulos teóricos y prácticos en función del porcentaje de cemento de la base <i>Agreca</i>	55
Figura 24.	Gráfico de dispersión de los resultados de la base <i>Agreca</i>	56
Figura 25.	Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base La Roca (sin estabilizar)	68
Figura 26.	Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base La Roca (1.5 % de cemento)	68

Figura 27.	Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base La Roca (3 % de cemento)	69
Figura 28.	Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base La Roca (4.5 % de cemento)	70
Figura 29.	Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base La Roca (6 % de cemento)	70
Figura 30.	Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base La Roca (7.5 % de cemento)	71
Figura 31.	Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base Agreca (sin estabilizar)	73
Figura 32.	Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base Agreca (1.5 % de cemento)	74
Figura 33.	Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base Agreca (3 % de cemento)	75

RESUMEN

En Guatemala, la estabilidad y durabilidad de los pavimentos es crucial para el desarrollo de infraestructura vial, especialmente en un contexto donde las condiciones geológicas y climáticas presentan desafíos significativos. Las bases estabilizadas con cemento son una solución común para mejorar las propiedades mecánicas de estas estructuras, pero evaluar su módulo elástico ha sido un reto, especialmente mediante métodos tradicionales como la prueba de compresión sin confinamiento (UCS), que requiere la extracción de muestras en laboratorio. Este estudio explora el uso del Deflectómetro de Impacto Liviano (LWD) como un método no destructivo para medir el módulo elástico de bases de pavimento estabilizadas con diferentes porcentajes de cemento. Se examinaron dos tipos de bases de pavimento: La Roca y Agreca, comparando los resultados obtenidos por el LWD y la UCS. Los hallazgos revelan una correlación variable en la obtención de módulos, con Agreca mostrando mayor consistencia entre los valores teóricos y prácticos que La Roca. Aunque el LWD ofrece ventajas significativas en términos de rapidez y economía para la evaluación en campo, se identificaron limitaciones en su precisión al evaluar bases altamente rígidas. La investigación concluye que el LWD podría optimizar los procesos de control de calidad en proyectos viales guatemaltecos, reduciendo costos y tiempo en la caracterización de bases estabilizadas, y propone que los resultados podrían servir de base para futuras normativas en el país.

Palabras clave: pavimentos, bases estabilizadas, módulo elástico, LWD, UCS, métodos no destructivos, Guatemala.

ABSTRACT

In Guatemala, the stability and durability of pavements are essential for developing road infrastructure, particularly in the face of significant geological and climatic challenges. Cement-stabilized bases offer a common solution to improve the mechanical properties of pavement structures; however, evaluating their elastic modulus poses a challenge, especially with traditional methods like the unconfined compression test (UCS), which requires sample extraction under laboratory conditions. This study investigates the use of the Light Weight Deflectometer (LWD) as a non-destructive method to measure the elastic modulus of pavement bases stabilized with different cement percentages. Two types of pavement bases, La Roca and Agreca, were evaluated, comparing the LWD results with UCS measurements. The findings reveal a variable correlation between modulus values, with Agreca showing higher consistency between theoretical and practical values than La Roca. Although the LWD presents significant advantages in terms of speed and cost-efficiency for field evaluation, certain limitations were noted in its precision, particularly with highly rigid bases. The study concludes that the LWD could enhance quality control processes in Guatemalan road projects by reducing costs and time for characterizing stabilized bases, and it proposes that the results may support the development of future national standards. .

Keywords: pavements, stabilized bases, elastic modulus, LWD, UCS, non-destructive methods, Guatemala.

I. INTRODUCCIÓN

En la construcción de pavimentos, uno de los aspectos más críticos es garantizar la estabilidad y durabilidad de las capas estructurales, siendo la base uno de los elementos más importantes. En Guatemala, la infraestructura vial es fundamental para el desarrollo socioeconómico, y las condiciones geológicas del país presentan desafíos significativos en la construcción de carreteras de alta calidad. En este contexto, la utilización de bases estabilizadas con cemento ganó popularidad como una solución eficiente para mejorar las propiedades mecánicas del suelo y asegurar una mayor vida útil de las estructuras viales.

Para garantizar la calidad y el desempeño de estas bases estabilizadas, fue esencial medir el módulo de elasticidad del material, lo que permitió evaluar su capacidad para resistir las cargas aplicadas. Tradicionalmente, el módulo elástico de las bases estabilizadas con cemento se ha obtenido a través de ensayos de laboratorio, como la prueba de compresión sin confinar (UCS), que ofreció una curva esfuerzo-deformación a partir de la cual se pudo determinar el módulo del material. Sin embargo, este es un método destructivo que requiere extracción de muestras y condiciones controladas de laboratorio, lo cual puede no reflejar completamente el comportamiento del material en su estado in situ.

Ante esta limitación, surgió el uso del Deflectómetro de Impacto Liviano (*Light Weight Deflectometer*, LWD) como una alternativa no destructiva para medir el módulo elástico de las capas de pavimento directamente en campo. Este método ofreció la ventaja de obtener resultados de forma rápida y directa, permitiendo una evaluación más representativa de las condiciones reales del material bajo cargas de servicio. Sin embargo, la precisión y la correlación entre los resultados obtenidos por el LWD y los ensayos de laboratorio, como el UCS, siguieron siendo objeto de estudio, especialmente en contextos locales como Guatemala, donde los materiales y las técnicas de estabilización pueden variar significativamente.

La presente investigación comparó los resultados obtenidos mediante el LWD y la prueba de compresión sin confinar en bases de pavimento estabilizadas con cemento, con el fin de evaluar la viabilidad de utilizar el LWD como herramienta de control de calidad en proyectos viales en Guatemala. Además, se analizó la relación entre el módulo elástico obtenido por ambos métodos, así como los factores que influyeron en las discrepancias observadas, como la homogeneidad del material, el contenido de cemento y las condiciones de compactación.

La relevancia de este estudio radicó en su potencial para optimizar los procesos de control de calidad de los pavimentos en el país, al proponer una herramienta rápida y no destructiva que podría reducir los costos y tiempos de evaluación sin comprometer la precisión de los resultados. Asimismo, se esperaba que los resultados de esta investigación aportaran información valiosa para la implementación de normativas y guías técnicas que regularan el uso de estos métodos en proyectos viales a nivel nacional.

II. JUSTIFICACIÓN

La infraestructura vial es esencial para el desarrollo económico, social y turístico de Guatemala, ya que garantiza la conectividad y facilita el transporte de bienes y personas. Sin embargo, las condiciones geológicas, climáticas y constructivas del país presentan desafíos particulares en la construcción y mantenimiento de carreteras, especialmente en lo que respecta a la durabilidad y el desempeño estructural de los pavimentos. En este contexto, las bases estabilizadas con cemento han demostrado ser una solución eficaz para mejorar la resistencia y rigidez de las capas estructurales, contribuyendo a extender la vida útil de los pavimentos.

La calidad de las bases estabilizadas con cemento se evalúa a través de la determinación de su módulo elástico, un parámetro clave que permite predecir su comportamiento bajo cargas de servicio. Tradicionalmente, esta evaluación se ha realizado mediante pruebas de laboratorio como la compresión sin confinar (UCS), que proporciona una medida del módulo del material a partir de la curva esfuerzo-deformación. No obstante, estos ensayos son destructivos y requieren la extracción de muestras, lo que puede generar variabilidad en los resultados y no siempre representa fielmente las condiciones in situ.

Ante estas limitaciones, el Deflectómetro de Impacto Liviano (LWD) ha emergido como una herramienta no destructiva de gran potencial para la evaluación de las capas de pavimento. Su capacidad de realizar mediciones rápidas y directas en el campo lo convierte en una opción atractiva para proyectos viales que requieren un control de calidad eficiente. Sin embargo, en Guatemala no se han realizado suficientes estudios que comparen la precisión del LWD frente a métodos convencionales como el UCS, lo que genera incertidumbre sobre su aplicabilidad y confiabilidad en el contexto local.

La justificación de esta investigación radica en la necesidad de establecer una metodología clara y confiable para la medición del módulo elástico en bases estabilizadas con cemento, que permita mejorar los procesos de control de calidad en proyectos viales guatemaltecos. Al comparar los resultados obtenidos mediante el LWD y la prueba de compresión sin confinar, este estudio contribuirá a determinar la viabilidad del uso del LWD como una alternativa eficiente, rápida y económica en la caracterización de materiales estabilizados.

Además, los resultados de esta investigación tienen el potencial de influir en el desarrollo de normativas y guías técnicas nacionales para la evaluación de pavimentos, optimizando tanto los costos como los tiempos de ejecución de obras. En un país como Guatemala, donde la mejora de la infraestructura vial es crucial para el crecimiento económico, el uso de tecnologías más accesibles y prácticas como el LWD podría generar un impacto significativo en la calidad y sostenibilidad de los proyectos de pavimentación.

III. IMPORTANCIA

La presente investigación es de suma relevancia tanto para el sector de la infraestructura vial en Guatemala como para la comunidad científica y técnica que trabaja en el ámbito de los pavimentos. En un contexto donde la calidad de las obras viales impacta directamente en el desarrollo económico, social y turístico del país, la optimización de técnicas de control de calidad se convierte en una necesidad imperante. La investigación se centra en la comparación de los módulos obtenidos mediante el *Light Weight Deflectometer* (LWD) y la prueba de compresión simple sin confinamiento (UCS) en bases estabilizadas con cemento. Este análisis no solo busca evaluar la eficacia del LWD como herramienta de medición, sino también establecer un marco de referencia para mejorar el diseño y la construcción de pavimentos en el país.

El LWD, al ser una herramienta que permite realizar mediciones rápidas y menos invasivas, presenta una solución atractiva para los ingenieros que enfrentan la presión de cumplir con plazos ajustados en proyectos de construcción. En proyectos de construcción vial, los métodos tradicionales de control de calidad, como el UCS, son efectivos, pero pueden resultar costosos y tardados. La posibilidad de utilizar el LWD para obtener resultados inmediatos podría traducirse en un aumento de la eficiencia operativa y en la reducción de costos, lo que beneficiaría no solo a las empresas constructoras, sino también a las entidades que supervisan la ejecución de obras. Esto permite un enfoque más ágil en la gestión de proyectos, lo que es fundamental en un entorno donde los recursos son limitados y las expectativas son altas.

Asimismo, la estabilización con cemento en bases de pavimentos es una práctica que puede mejorar significativamente la resistencia y durabilidad de los pavimentos, especialmente en climas tropicales como el de Guatemala. En este contexto, la investigación busca evaluar cómo diferentes porcentajes de cemento afectan el comportamiento de los módulos de las bases, lo cual es crucial para optimizar el diseño de estas estructuras. Al proporcionar datos valiosos sobre los criterios de diseño y dosificación de materiales estabilizados, este estudio contribuirá a la creación de pavimentos más eficientes y duraderos, lo que es esencial para la sostenibilidad de la infraestructura vial en el país.

Además, la investigación no solo se limita a evaluar el LWD, sino que también explora las limitaciones del dispositivo en suelos rígidos. Esto abre la puerta a nuevas líneas de investigación que pueden adaptarse o combinar diferentes métodos de evaluación, lo que resulta fundamental en un país donde las condiciones del suelo pueden variar considerablemente de una región a otra.

Por lo tanto, el trabajo realizado en esta tesis podría servir como base para futuras investigaciones en el área de control de calidad y diseño de pavimentos, incentivando la innovación en las metodologías empleadas.

La importancia de este estudio se extiende a diversos grupos interesados. Para los ingenieros civiles y diseñadores de pavimentos, esta investigación ofrece información práctica sobre las ventajas y limitaciones del uso del LWD en bases estabilizadas con cemento. Con datos concretos, los ingenieros pueden tomar decisiones más informadas respecto al tipo de ensayos que deben realizarse en campo, ajustando sus metodologías de trabajo de acuerdo a las características de los materiales y el contexto del proyecto. Esto puede resultar en un aumento significativo de la calidad de las obras, además de promover la adopción de tecnologías más avanzadas y efectivas.

Por otro lado, las empresas constructoras y contratistas se beneficiarán de los resultados de esta investigación al contar con una herramienta como el LWD que les permita medir módulos de manera más rápida y eficiente. Esto no solo se traduce en ahorros de tiempo y costos durante la fase de construcción, sino que también permite un mejor control de calidad a lo largo del proceso, lo que es crucial para garantizar la durabilidad de las infraestructuras. A su vez, el estudio proporciona una visión sobre el tipo de materiales y métodos que pueden mejorar la resistencia y durabilidad de las carreteras, lo cual es especialmente relevante en el contexto guatemalteco, donde las condiciones climáticas y del suelo pueden afectar el desempeño de las obras.

Para las entidades gubernamentales encargadas de gestionar proyectos viales, esta investigación contribuye con datos que pueden ser utilizados para mejorar los estándares y normativas de control de calidad en pavimentos. Si los resultados muestran que el LWD es un método efectivo para ciertos tipos de suelos, se podría promover su adopción en proyectos financiados por el gobierno, lo que llevaría a una mayor eficiencia en la supervisión de obras y un mejor uso de los recursos públicos. Esto es especialmente importante en un país donde la infraestructura vial es fundamental para el desarrollo económico, social y turístico, y donde cada inversión debe estar justificada en términos de retorno y sostenibilidad.

Finalmente, esta investigación es relevante para la comunidad académica al aportar conocimiento sobre suelos estabilizados con cemento y evaluar la viabilidad del LWD frente a métodos tradicionales. Ofrece datos comparativos útiles para mejorar el diseño de pavimentos y optimizar el control de calidad en obras viales. Sus resultados pueden beneficiar a ingenieros, constructores y entidades públicas, impulsando el desarrollo sostenible de la infraestructura vial en Guatemala.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Determinar la viabilidad del uso del deflectómetro LWD para caracterizar las diferentes capas de un pavimento y comparar con los métodos más convencionales.

B. Objetivos específicos

- 1) Analizar métodos tradicionales para caracterizar las diferentes capas de un pavimento.
- 2) Comparar las metodologías tradicionales con el uso del LWD, para el control de calidad en pavimentos, analizando las ventajas y desventajas de cada uno.
- 3) Determinar las oportunidades del uso del LWD como método de ensayo no convencional, para caracterizar suelos utilizados en pavimentos.
- 4) Realizar ensayos con la metodología LWD para determinar su potencial uso en los controles de calidad en las diferentes capas de un pavimento.

V. MARCO TEÓRICO

A. CONTEXTO VIAL EN GUATEMALA

En Guatemala, una Unidad Ejecutora es una entidad administrativa encargada de gestionar y llevar a cabo la ejecución de proyectos y programas específicos, financiados por el gobierno o por organismos internacionales. Entre sus principales funciones están la planificación y programación de actividades, la gestión financiera y de recursos, la supervisión y control del avance físico y financiero, la coordinación con otras entidades y actores involucrados, y la rendición de cuentas a las autoridades y financiadores. Estas unidades deben de asegurar la eficiencia, transparencia y cumplimiento de los objetivos establecidos, contribuyendo así al desarrollo y mejora de la infraestructura y servicios públicos en el país.

Bajo este contexto y de acuerdo con la información pública disponible, presentada por el Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda (CIV, 2025) en su Plan Operativo Anual 2025 y Multianual 2025-2029, se puede aseverar que son tres las Unidades Ejecutoras encargadas de la red vial guatemalteca, cuyos objetivos son:

1. Dirección General de Caminos (UE 202)

La DGC tiene como objetivo aumentar, mejorar y mantener la infraestructura vial del país, promoviendo la integración regional, el desarrollo socioeconómico de las áreas rurales, el acceso a destinos turísticos y nuevos mercados tanto a nivel nacional como internacional, y respondiendo a emergencias causadas por fenómenos naturales (CIV, s.f.). En 2025, se planea incrementar la red vial asfaltada en un 1 % anual y mantener un 84 % de la red registrada a nivel nacional, favoreciendo así la integración regional y el desarrollo socioeconómico de las áreas urbanas y rurales (CIV, 2025).

Además, se prevé la conservación de la infraestructura vial del país según el Plan de Desarrollo Vial 2018-2032, facilitando el acceso a destinos turísticos y asegurando una rápida respuesta ante daños en la red vial causados por eventos naturales. Esto implica que la Unidad Ejecutora llevará a cabo acciones como la construcción, ampliación, reposición y mejoramiento de carreteras y puentes en todas las áreas donde se encuentran las cuatro principales rutas de interconexión vial (CIV, 2018).

2. Unidad Ejecutora de Conservación Vial (UE 203)

COVIAL se encarga de llevar a cabo actividades correctivas y preventivas en la Red Vial Pavimentada y No Pavimentada a nivel nacional, clasificadas en Rutas Centroamericanas, Nacionales y Departamentales. Su objetivo es detener el deterioro de los pavimentos, mejorar las condiciones de las carreteras de terracería, y mantener puentes de concreto y metal, así como bóvedas y alcantarillas.

Para el año 2025, COVIAL proyecta atender 6,395 kilómetros de la red vial pavimentada a nivel nacional, incluyendo los kilómetros construidos por la DGC. También planea realizar actividades correctivas en puentes de concreto y metal en estas rutas para mejorar la transitabilidad. Además, se prevé atender 4,760 kilómetros de la red vial no pavimentada a nivel nacional.

Las acciones que COVIAL implementará para alcanzar sus objetivos incluyen el mantenimiento de la red vial pavimentada, que abarcará trabajos de bacheo, recapeo, fresado y reciclado, limpieza de carreteras, sellado de grietas, mantenimiento de puentes, mejora de la señalización horizontal y vertical, y la reparación o sustitución de defensas metálicas. También se realizarán obras civiles en la red primaria, como la estabilización de taludes y la protección de bóvedas y alcantarillas. Además, se llevarán a cabo trabajos de supervisión vial, control de pesos y dimensiones, y mantenimiento de terracerías y obras civiles en la red vial terciaria (CIV, 2025).

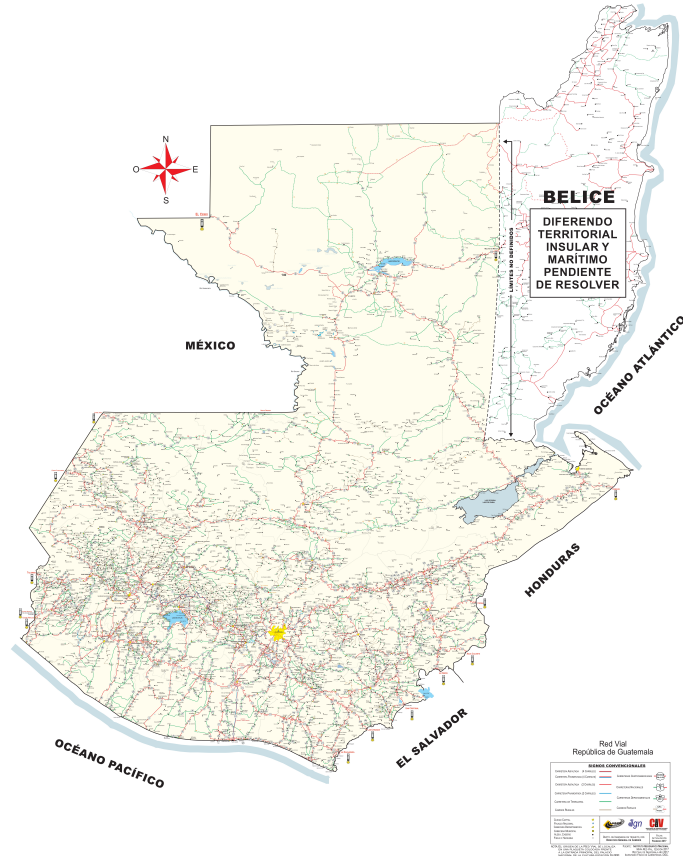
3. Fondo Social de Solidaridad (UE 217)

El Fondo Social de Solidaridad tiene como objetivo contribuir a satisfacer las necesidades de infraestructura básica en áreas urbanas y rurales de Guatemala, de manera continua, mediante la provisión y ejecución de proyectos en los sectores de salud, educación, vivienda, comunicación vial y servicios básicos. Además, realizar trabajos preventivos y de atención a emergencias con maquinaria pesada, de acuerdo con los intereses planteados por las comunidades y en línea con los programas de gobierno (CIV, s.f.).

En 2025, los objetivos específicos son dotar a las comunidades urbanas y rurales de infraestructura vial de calidad para mejorar la calidad de vida de la población. También se planea llevar a cabo proyectos de infraestructura aeroportuaria de alta calidad, ejecutar obras públicas y desarrollar iniciativas que mejoren la calidad de vida y aseguren el bienestar de las comunidades afectadas por desastres naturales y calamidades públicas (CIV, 2025).

La red vial del país puede observarse en la Figura 1, que muestra su distribución en el año 2017, destacando los principales corredores nacionales e internacionales:

Figura 1.
Red vial de Guatemala en 2017



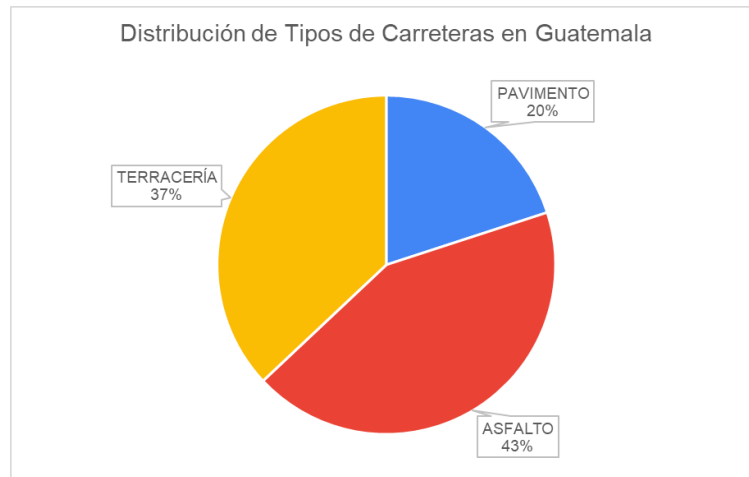
Nota. Adaptado de Dirección General de Caminos (DGC, 2020).

4. Descripción del sistema vial en Guatemala

Por motivos de practicidad y para mantener la coherencia en las descripciones y definiciones del sistema vial de Guatemala, se utilizará la información oficial presentada por la DGC (2020) y el Plan de Desarrollo Vial 2018-2032 del CIV (2018). En 2018, la Red Vial de la República de Guatemala estaba compuesta por 17,211 kilómetros de carreteras, de los cuales 4,442 kilómetros eran caminos rurales y 7,457 kilómetros están asfaltados (CIV, 2018).

La distribución de los tipos de carreteras se observa en la Figura 2, donde predomina la red asfaltada (43 %), seguida por la red de terracería (37 %) y finalmente la pavimentada (20 %).

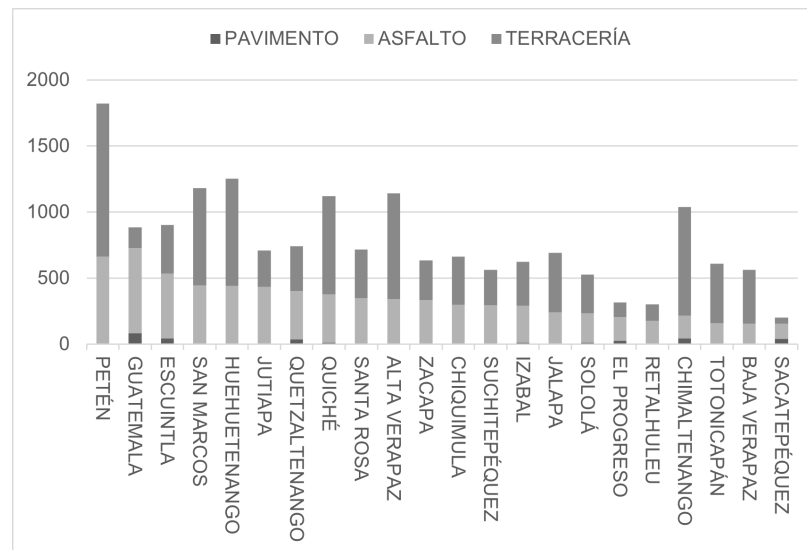
Figura 2.
Distribución de tipos de carreteras en Guatemala (2017)



Nota. Adaptado de CIV (2018).

Asimismo, la cantidad de rutas registradas por departamento según el tipo de superficie se ilustra en la Figura 3. El departamento de Petén presenta la mayor extensión vial registrada en condiciones de terracería, mientras que Guatemala lidera en rutas pavimentadas.

Figura 3.
Rutas registradas en Guatemala (2017)



Nota. Adaptado de DGC (2020).

La red vial se puede clasificar de dos maneras: por competencia y por función. Cuando a clasificación por competencia se refiere, las vías se dividen en cuatro tipos de rutas: centroamericanas,

nacionales, departamentales y caminos rurales. Las rutas centroamericanas son vías de primer orden que ofrecen un mejor nivel de servicio, conectan a los países vecinos de la región y los puertos marítimos, y se interconectan con la red vial nacional. Su derecho de vía es de 25 metros (12.5 metros de cada lado de la línea central), con un área de reserva de 80 metros (40 metros de cada lado de la línea central).

Las rutas nacionales atraviesan más de dos departamentos, conectan una región del país con la red principal y secundaria, y funcionan como rutas alternas en caso de emergencias. Su derecho de vía, al igual que el de las rutas centroamericanas, es de 25 metros (12.5 metros de cada lado de la línea central), con un área de reserva de 80 metros (40 metros de cada lado de la línea central).

Las rutas departamentales enlazan las cabeceras departamentales con las cabeceras municipales o con rutas Centroamericanas y nacionales. Su derecho de vía es de 20 metros (10 metros de cada lado de la línea central).

Los caminos rurales son tramos carreteros que comunican a aldeas, caseríos de las comunidades e interconectan con rutas de primer y segundo orden.

Cuando a clasificación por función se refiere, la Red Vial de Guatemala está integrada por la Red Vial Primaria, Red Vial Secundaria y Red Vial Terciaria. La Red Vial Primaria tiene como propósito el facilitar y fortalecer la comunicación directa a nivel macro regional, entre las regiones políticas continuas establecidas según el Decreto 70-86 (Ley Preliminar de Regionalización) e internacional al comunicar de y hacia los principales puertos marítimos y puertos fronterizos con los países vecinos, constituyendo la red básica de carreteras troncales o colaterales.

La Red Vial Secundaria tiene como objetivo principal el complementar la Red Vial Primaria facilitando la comunicación regional, así como el proveer de comunicación directa, en lo posible, entre las cabeceras de departamentos contiguos, orientada a comunicar hacia y desde los mayores centros de población y/o producción conformando una red complementaria y/o alterna a la Red Vial Primaria.

Finalmente, la Red Terciaria tiene como propósito fundamental el complementar al conjunto formado por las redes Primaria y Secundaria, proporcionando comunicación en la medida de lo posible entre las cabeceras departamentales y sus respectivos municipios y aldeas. La misma está orientada a permitir el ingreso y egreso de los insumos y servicios desde y hacia los centros de consumo y producción.

5. Estado actual de los pavimentos en Guatemala

a. Métodos de evaluación de los pavimentos

Existen dos tipos principales de evaluaciones de pavimentos: la evaluación estructural, que se centra

en la capacidad del pavimento para soportar las cargas vehiculares, y la evaluación funcional, que está directamente relacionada con la experiencia del usuario al transitar por una vía.

En la evaluación funcional, la regularidad de la superficie de rodadura es crucial para proporcionar condiciones de seguridad y comodidad a los usuarios de las carreteras. Las irregularidades en la superficie pueden afectar los costos operativos de los vehículos, ya que una superficie irregular puede reducir la velocidad de circulación, aumentando el desgaste de los neumáticos y el consumo de combustible. Además, los efectos dinámicos causados por estas irregularidades no solo impactan a los vehículos, sino que también pueden alterar los esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento, incrementando así los costos de mantenimiento y rehabilitación (Vargas, 2010).

Para realizar estas evaluaciones, se emplean diversos métodos y herramientas. La evaluación estructural a menudo implica el uso de vehículos equipados con sensores para medir la deflexión del pavimento bajo cargas conocidas, mientras que la evaluación funcional puede involucrar la utilización de perfiles de superficie y análisis de la regularidad del pavimento mediante tecnologías como el perfilómetro láser.

Mantener una buena regularidad en la superficie del pavimento no solo mejora la experiencia del usuario y reduce los costos operativos de los vehículos, sino que también extiende la vida útil del pavimento. Un pavimento bien mantenido minimiza la necesidad de reparaciones frecuentes y costosas, lo que resulta en un uso más eficiente de los recursos públicos.

Estas evaluaciones son fundamentales para la planificación a largo plazo de la infraestructura vial. Proporcionan datos críticos que permiten a los ingenieros y planificadores priorizar las intervenciones de mantenimiento y rehabilitación, asegurando que las inversiones se realicen de manera estratégica y eficiente. De esta forma, se contribuye a la sostenibilidad y durabilidad de la red vial, garantizando vías seguras y cómodas para todos los usuarios.

a.1. Índice de condición del pavimento (PCI) El índice de condición del pavimento (PCI) es un método de evaluación funcional, que consiste en un valor numérico que evalúa la superficie de una vía. Este índice se obtiene mediante la observación y medición del área dañada, identificando el tipo de deterioro según su densidad y severidad en niveles: bajo (L), medio (M) y alto (H). Se utilizan formularios de inspección y un catálogo de fallas como referencia, y se lleva a cabo mediante inspección visual, sin el uso de equipos de auscultación (Oblitas-Gastelo et al., 2021). Los datos recolectados se analizan en gabinete para determinar el PCI de cada muestra. La inspección promedio de PCI tiene un rendimiento de 50 minutos por unidad de muestra de 40 metros, preferiblemente con tres personas involucradas: dos evaluadores y un fotógrafo. Este método se emplea para calificar el estado del pavimento, identificando los tipos de fallas según su severidad, con la ayuda de un catálogo. Es un método fácil de aplicar, efectivo y económico.

En la Figura 4 se presenta el formato utilizado para la recolección de datos del PCI, donde se con-

signan aspectos como tipo de falla, severidad, densidad y observaciones adicionales. Este formato sirve como guía estandarizada para las inspecciones de campo.

Figura 4.

Formato de exploración de condición para carreteras con superficie asfáltica

PCI-01. CARRETERAS CON SUPERFICIE ASFÁLTICA.					
EXPLORACIÓN DE LA CONDICIÓN POR UNIDAD DE MUESTREO					ESQUEMA
ZONA	ABSCISA INICIAL	UNIDAD DE MUESTREO			
CÓDIGO VÍA	ABSCISA FINAL	ÁREA MUESTREO (m ²)			
INSPECCIONADA POR		FECHA			
No.	Daño	No.	Daño		
1	Piel de cocodrilo.	11	Parcheo.		
2	Exudación.	12	Pulimento de agregados.		
3	Agrietamiento en bloque.	13	Huecos.		
4	Abultamientos y hundimientos.	14	Cruce de vía férrea.		
5	Corrugación.	15	Ahuellamiento.		
6	Depresión.	16	Desplazamiento.		
7	Grieta de borde.	17	Grieta parabólica (slippage)		
8	Grieta de reflexión de junta.	18	Hinchamiento.		
9	Desnivel carril / bamba.	19	Desprendimiento de agregados.		
10	Grietas long y transversal.				
Daño	Severidad	Cantidades parciales		Total	Valor deducido

Nota. Adaptado de Vásquez Varela (2002).

Además, introduce un factor clave, el valor deducido, que determina el grado numérico del estado del pavimento. El PCI se expresa típicamente en una escala de 0 a 100, donde 0 representa un pavimento en condiciones extremadamente deficientes y 100 indica un pavimento en condiciones excelentes sin defectos, como lo indica el Cuadro 1. La información obtenida a través del PCI es esencial para planificar programas de mantenimiento y rehabilitación de carreteras, permitiendo priorizar las áreas que necesitan reparación o reconstrucción y optimizar la inversión de recursos en la infraestructura vial.

Cuadro 1

Rangos de calificación del PCI

Rango	Clasificación
0 - 10	Fallado
10 - 25	Muy Malo
25 - 40	Malo
40 - 55	Regular
55 - 70	Bueno
70 - 85	Muy Bueno
85 - 100	Excelente

Nota. Elaboración propia.

El PCI es crucial para la gestión de infraestructuras, ya que permite a las autoridades y administradores de carreteras tomar decisiones informadas sobre dónde y cuándo invertir en reparaciones. Por ejemplo, un pavimento con un PCI bajo puede necesitar una reconstrucción completa, mientras que uno con un PCI moderado podría beneficiarse de reparaciones menos costosas y más rápidas. Esto no solo mejora la seguridad y la comodidad de los usuarios de la carretera, sino que también

extiende la vida útil del pavimento y reduce los costos a largo plazo.

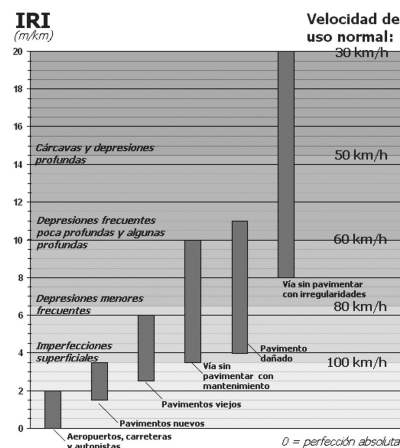
Con los avances tecnológicos, las metodologías de evaluación del pavimento están evolucionando. Aunque el PCI tradicionalmente se ha basado en inspecciones visuales manuales, se están desarrollando técnicas más avanzadas que utilizan sensores, vehículos equipados con cámaras y software de análisis de imágenes para realizar evaluaciones más rápidas y precisas. Estas innovaciones prometen mejorar aún más la eficiencia y la exactitud del proceso de evaluación, proporcionando datos más detallados para la toma de decisiones estratégicas en el mantenimiento de carreteras.

a.2. Índice de regularidad internacional (IRI) El índice de regularidad internacional (IRI) es un señalizador estadístico de la irregularidad superficial, resume el perfil longitudinal, evaluando el movimiento acumulado en la suspensión de un modelo del cuarto de carro que pasa por el perfil a una celeridad de 80 km/h. Este modelo cuenta con masa suspendida conectada a una masa no amortiguada por medio de un resorte y una suspensión, además el neumático se representa por otro resorte. Los parámetros empleados son Ks: variable del resorte de la suspensión, kr: la constante del resorte de la llanta, Ms: la masa suspendida, Mr: masa no suspendida y cs: amortiguador. El IRI es el valor del movimiento vertical acumulado del asiento del que conduce el vehículo en una distancia determinada. Además, este será óptimo cuando más se aproxime al terreno plano, aunque debe existir cierta rugosidad para asegurar la adherencia de la rueda con el pavimento.

La Figura 5 muestra la escala estándar que el Banco Mundial emplea para clasificar el IRI en distintos tipos de vías, asociando rangos de valores con condiciones de superficie y velocidades de uso recomendadas.

Figura 5.

Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías



Nota. Adaptado de Vargas (2010).

b. **Estado de los pavimentos en Guatemala** De acuerdo con información presentada por la DGC (2020), se reportaron 7,454.89 kilómetros de carreteras pavimentadas. Basados en el estudio 8 de evaluación técnica realizada a través de la Unidad Ejecutora de Conservación Vial (COVIAL), sobre el estado de condición de la red vial del país (a través de la determinación del PCI), se evaluó un total de 5,690.15 kilómetros de carretera. De los resultados se concluyó que: únicamente 16.5 % de la red se encuentra en muy buen estado; el 39.7 % en estado regular; el 17.6 % en mala condición y el 1.7 % en pésimo estado o destruida. El gobierno recomienda brindar atención a las carreteras con PCI de entre 30 y 50, es decir, las que se encuentran en las categorías “mala” y “regular”. Esto quiere decir que 57.3 % de la red vial requiere de atención.

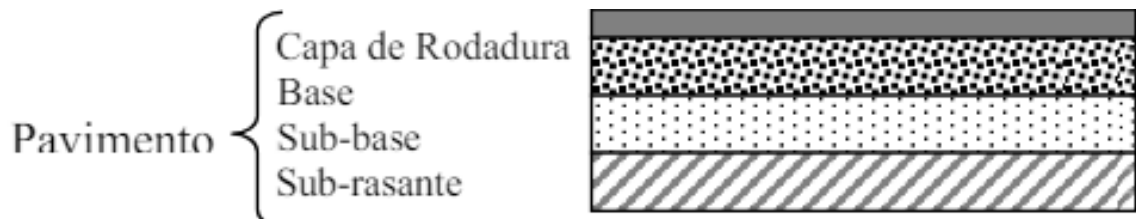
B. PAVIMENTOS

El origen de los pavimentos se remonta a la necesidad del humano de crear vías de conectividad. Con la evolución de los vehículos en términos de peso, velocidad, comodidad y autonomía, surgió la necesidad de diseñar vías de circulación con condiciones adecuadas de curvatura, pendiente, visibilidad, sección transversal, uniformidad, textura, entre otros aspectos, para satisfacer una demanda cada vez más exigente.

Un pavimento está compuesto por un conjunto de capas de materiales seleccionados que distribuyen de manera directa y uniforme todas las cargas del tránsito a través de ellas. Estas capas deben estar formadas por materiales de calidad suficiente para soportar las cargas que recibirán. Esto permite que las capas más profundas puedan utilizar materiales de menor calidad, según los esfuerzos que deben resistir, cada una con un espesor específico. La Figura 6 ilustra de forma esquemática la estructura típica de un pavimento, mostrando la disposición de sus capas: capa de rodadura, base, sub-base y sub-rasante.

Figura 6.

Capas de un pavimento según especificaciones técnicas



Nota. Adaptado de Unidad Ejecutora de Conservación Vial (COVIAL, 2024).

El pavimento proporciona una superficie de rodadura donde transitan los vehículos. Uno de sus objetivos es permitir que el tráfico fluya con rapidez y comodidad adecuadas para el tipo de camino. Los materiales que conforman la terracería debajo del pavimento también deben cumplir ciertos

estándares, aunque generalmente no tan estrictos.

Un camino sin pavimentar se refiere a la aplicación de grava y a pasar de terracería a caminos pavimentados mediante la aplicación de conglomerados asfálticos e hidráulicos. En caminos ya pavimentados se significa agregar una o varias de las capas previamente mencionadas, sobre el pavimento, sin alterar la estructura subyacente (renovación de la superficie). Esto incluye el reciclado del pavimento (DGC, 2001).

1. Tipos de pavimentos

Los pavimentos se distinguen y caracterizan por los materiales utilizados en su construcción y la manera en que están estructurados, no por cómo distribuyen los esfuerzos y deformaciones. Tomando en cuenta esto, existen distintos tipos de pavimentos, por ejemplo, los pavimentos rígidos, articulados, unicapa, y el enfoque de esta investigación, los flexibles, entre otros. Para entender en qué consiste cada tipo, una breve descripción de cada uno:

a. Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos tienen una capa de rodadura formada por losas de concreto hidráulico, las cuales distribuyen las cargas del tránsito hacia las capas inferiores a lo largo de toda la superficie de la losa. La baja resistencia a la flexión del concreto impide que la losa ceda a las deformaciones de las capas inferiores sin que se presenten fallas estructurales. La sección transversal típica de un pavimento rígido incluye la losa de concreto, la sub-base y la subrasante.

b. Pavimentos articulados

En los pavimentos articulados, la capa de rodadura está compuesta por bloques de concreto prefabricado (adoquines), que tienen un espesor uniforme. Normalmente, esta capa de bloques se coloca sobre una delgada capa de arena, la cual puede ir sobre la base o directamente sobre la subrasante, dependiendo de la calidad y la carga que soporte el pavimento (Escobar et al., 2012).

c. Pavimentos unicapa

El pavimento unicapa, según El Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, consiste en una estructura formada por el suelo existente en el camino, mezclado con un porcentaje de cemento según el diseño. Esta mezcla compactada forma una única capa que proporciona una superficie de rodadura adecuada para caminos rurales y vías secundarias.

d. Pavimentos flexibles

Un pavimento flexible o pavimento de asfalto, está formado por una carpeta bituminosa apoyada

sobre la base y la sub-base. Esta carpeta tiene la particularidad que, en conjunto a las capas subyacentes, absorbe las cargas y deformaciones y puede flexionarse ligeramente sin fracturarse. Esta estructura utiliza materiales como mezclas asfálticas y agregados granulares o estabilizados con cemento para garantizar su durabilidad y resistencia.

2. Capas de un pavimento

Generalmente, como se puede observar en la Figura No. 1, un pavimento típico está conformado por cuatro capas. En base a las definiciones brindadas por las Especificaciones Técnicas de COVIAL (2024), un pavimento está conformado por las siguientes capas:

a. Sub-rasante

La sub-rasante es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura del pavimento, esta debe de extenderse a una profundidad que no afecte la carga de diseño correspondiente al tránsito previsto. Entre las principales funciones de esta capa están:

- Recibir, resistir, transmitir y distribuir adecuadamente las cargas del tránsito que le transmite el pavimento.
- Prevenir que los materiales finos plásticos del terraplén contaminen el pavimento.
- Impedir que la terracería, especialmente cuando está hecha de fragmentos de roca (pedraplones), absorba el pavimento.
- Evitar que las irregularidades de la base de los cortes se reflejen en la superficie de rodamiento.
- Uniformar los espesores de pavimento.
- Reducir el grosor necesario del pavimento para economizar materiales.

Esta capa suele estar compuesta por dos subcapas de 15 cm de espesor mínimo cada una, sumando un espesor total mínimo de 30 cm. Los materiales utilizados en esta capa son de baja calidad, ya que la presión que recibe es transmitida por las capas superiores. Para esta capa, se suele utilizar material de los cortes, evitando así el acarreo de material de préstamos de banco y permitiendo economizar en el proceso de construcción. A pesar de esto, es la capa encargada de proporcionar el soporte estructural a todo el sistema de pavimentación.

b. Base y sub-base

La base y la sub-base, son capas que se encuentran por encima de la sub-rasante y proporcionan una plataforma fuerte y estable para la capa de rodadura. Estas capas deben de ofrecer un buen

drenaje y mejorar la resistencia del pavimento a la humedad. La sub-base, se puede definir como un revestimiento provisional que protege la base de la terracería, proporcionando aislamiento para que el material de la terracería no se introduzca en la base y esto no disminuya su resistencia estructural. Por otro lado, la base es la encargada de soportar las presiones transmitidas por los vehículos estacionados o en movimiento. Asimismo, necesita tener un espesor adecuado para poder retransmitir las presiones a la sub-base o subrasante sin exceder la capacidad estructural de estas. Por ende, las principales funciones de las bases y las sub-bases son:

- Recibir, resistir, transmitir y distribuir adecuadamente las cargas de tránsito provenientes de la capa de rodadura.
- Evitar que la humedad de las terracerías ascienda a capas superiores por capilaridad.
- En caso de infiltración de agua, permitir su descenso hasta la sub-rasante y su evacuación mediante bombeo o elevación.

Durante el proceso de construcción, la sub-base suele utilizarse como superficie de rodadura para facilitar el paso del equipo de construcción e incluso permitir un tránsito provisional. El espesor de la sub-base ayuda a reducir el costo y el espesor de la base. Generalmente, los materiales que conforman la base son de mejor calidad que los de la sub-base, para cumplir con requisitos más estrictos. Dependiendo del caso, se utiliza combinación de base y sub-base, o solo una de ellas.

c. **Capa de rodadura**

También denominada carpeta o superficie de rodadura. Es la parte superior de un pavimento, generalmente de pavimento bituminoso o rígido, que sostiene directamente la circulación vehicular. Esta capa debe de satisfacer con la función de tener una superficie de rodadura adecuada, permitiendo así una fácil transitabilidad y proporcionando comodidad al usuario. Además, no debe de permitir la infiltración de agua de lluvia hacia las capas inferiores, ya que esto disminuiría la resistencia estructural del pavimento. La capa de rodadura debe de ser capaz de resistir los efectos climáticos y la destrucción provocada por los vehículos.

3. Pavimentos flexibles

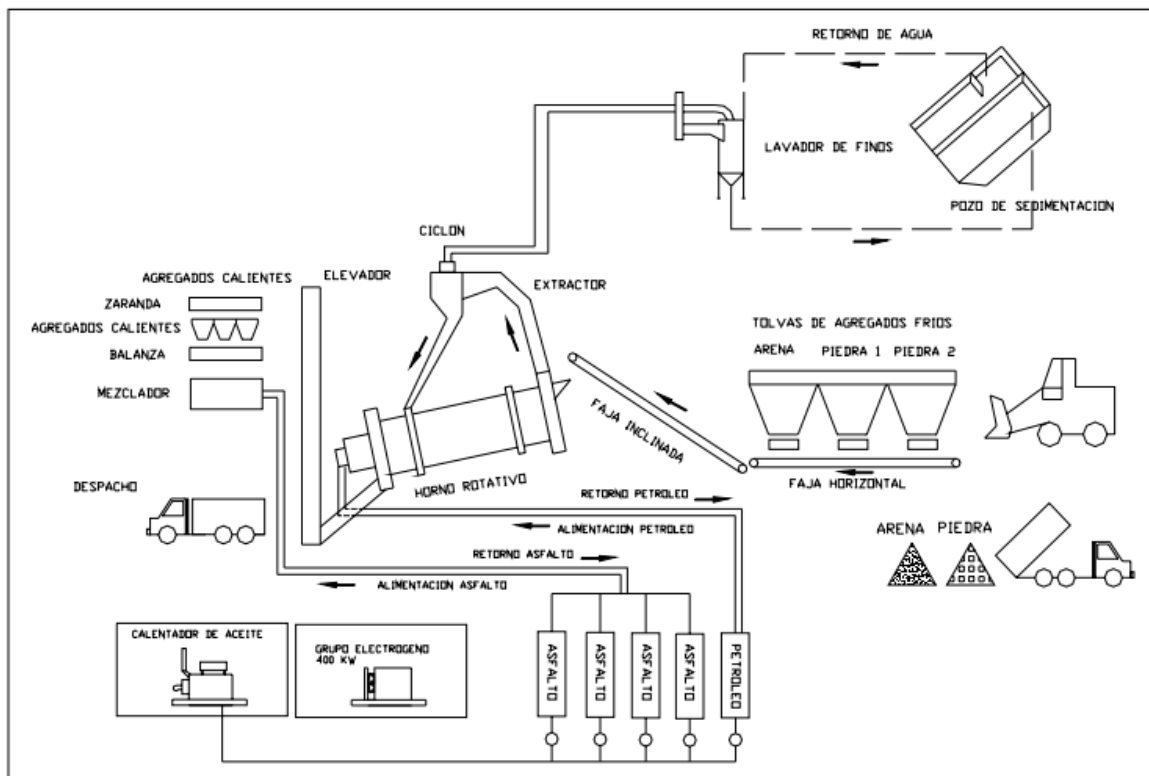
Los pavimentos flexibles son una de las dos principales tipologías de pavimentos utilizadas en la construcción de carreteras, junto con los pavimentos rígidos. Se caracterizan por tener una estructura compuesta por varias capas de materiales que, en conjunto, distribuyen las cargas del tráfico hacia el suelo subyacente. A diferencia de los pavimentos rígidos, que tienen una losa de concreto como capa superficial, los pavimentos flexibles dependen principalmente de la resistencia de las capas inferiores y la capacidad de deformación elástica de los materiales para soportar las cargas sin fallar (Huang, 2004).

a. Asfaltos

Los asfaltos son componentes naturales presentes en muchos petróleos, en los cuales se disuelven. Su uso se remonta a más de 5,000 años, con evidencia arqueológica que muestra su utilización entre los años 3,200 y 540 a.C. En la construcción, el asfalto ha tenido diversas aplicaciones. En Mesopotamia, se usaba para unir mamposterías y como capa impermeabilizante en baños y tanques de agua. En Francia, en 1802, se empleó roca asfáltica para formar pisos y banquetas. El primer uso de materiales asfálticos en la construcción de pavimentos se registró en Washington en 1876, donde se construyó el primer pavimento de lámina asfáltica utilizando asfalto importado del lago. Para finales de 1902, se habían refinado aproximadamente 20,000 barriles de asfalto de petróleo. Desde entonces, la producción mundial de asfalto ha aumentado, con México, Venezuela y Estados Unidos siendo los principales productores, generando conjuntamente millones de toneladas anuales (Crespo Villalaz, 2004).

La Figura 7 representa el proceso industrial de producción de mezcla asfáltica, incluyendo el manejo de agregados, el mezclado en caliente, y la incorporación del asfalto en una planta especializada.

Figura 7.
Proceso de producción de mezcla asfáltica



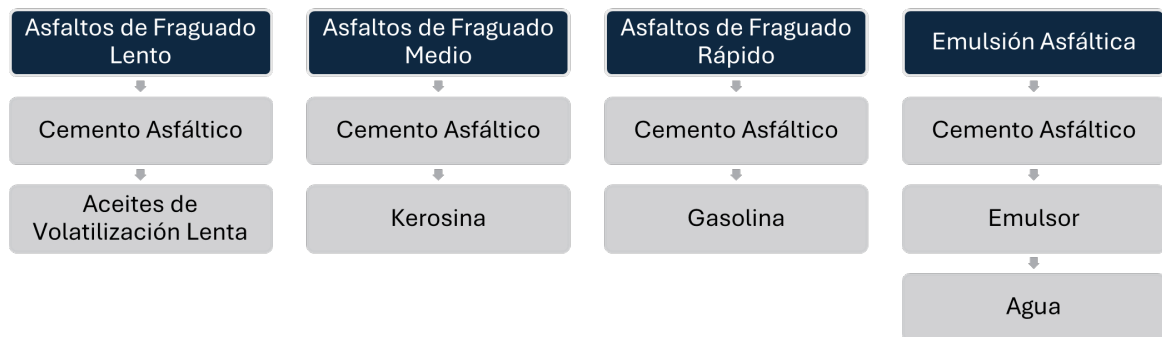
Nota. Adaptado de Pincay (s.f.).

En América, la mayor parte del asfalto utilizado proviene de la refinación del petróleo. Este asfalto refinado se produce en una amplia variedad de tipos, desde sólidos, duros y quebradizos hasta fluidos casi tan líquidos como el agua. La forma semisólida se conoce como cemento asfáltico, una mezcla de asfalto duro y aceites no volátiles del petróleo. Al disolver este cemento asfáltico en diferentes destilados volátiles del petróleo o al emulsificarlo con agua, se obtienen productos asfálticos con un alto valor cementante.

Entre los tipos de productos asfálticos líquidos más utilizados en pavimentos flexibles se encuentran: los asfaltos de fraguado lento, que son soluciones de cemento asfáltico en aceites de volatilización lenta; los asfaltos de fraguado medio, que son soluciones de cemento asfáltico en queroseno; los asfaltos de fraguado rápido, que son soluciones de cemento asfáltico en gasolina; y las emulsiones asfálticas, que consisten en cemento asfáltico disuelto en agua y emulsionantes (Crespo Villalaz, 2004).

La Figura 8 presenta de forma esquemática estos tipos de productos asfálticos líquidos, detallando sus componentes según la clasificación por tipo de fraguado o emulsión.

Figura 8.
Tipos de productos asfálticos líquidos



Nota. Elaboración propia.

b. **Propiedades mecánicas de los pavimentos flexibles**

Los pavimentos flexibles están diseñados para ser deformables bajo carga, lo que significa que experimentan deflexiones elásticas cuando son sometidos al tráfico. Las propiedades mecánicas clave que determinan el desempeño de un pavimento flexible incluyen:

- **Módulo resiliente:** este es un parámetro fundamental para los pavimentos flexibles, que describe la capacidad de los materiales de las capas para recuperarse elásticamente después de ser deformados por las cargas de tráfico. El módulo resiliente se utiliza para evaluar la rigidez del pavimento y su resistencia a la deformación permanente (Monismith & Epps, s.f.).

- **Capacidad portante:** la capacidad portante del pavimento se refiere a su habilidad para soportar las cargas de tráfico sin fallar. En pavimentos flexibles, la capacidad portante depende de la resistencia y rigidez de las capas granulares y del suelo subrasante. Para medir esta propiedad, se utilizan ensayos de deflectómetros, como el FWD y el LWD, que miden la deflexión de la superficie del pavimento bajo una carga controlada (Sebaaly et al., 2015).

c. Comportamiento bajo cargas

El comportamiento de un pavimento flexible bajo cargas de tráfico se caracteriza por la distribución progresiva de la tensión y la deformación hacia las capas inferiores. Esto se debe a que las capas superiores son más rígidas y fuertes, lo que permite que las tensiones generadas por las cargas vehiculares disminuyan conforme se propagan hacia abajo.

- **Distribución de esfuerzos:** en un pavimento flexible, las cargas aplicadas se distribuyen en forma de cono invertido hacia el suelo subyacente. Esta distribución cónica reduce los esfuerzos en las capas inferiores y minimiza el riesgo de deformación permanente del subrasante (Monismith & Epps, s.f.).
- **Deformación permanente:** aunque los pavimentos flexibles están diseñados para ser elásticos, con el tiempo pueden sufrir deformaciones permanentes, especialmente si las capas no están bien compactadas o si la subrasante es demasiado débil. Estas deformaciones se manifiestan en forma de ahuellamiento (rutting) o fisuración en la superficie del pavimento (Sebaaly et al., 2015).

d. Estabilización de suelos en pavimentos flexibles

Una de las técnicas más comunes para mejorar la resistencia y la capacidad portante de los pavimentos flexibles es la estabilización de suelos. Esta técnica consiste en tratar los suelos o materiales granulares con aditivos, como cemento, cal o mezclas asfálticas, para mejorar sus propiedades mecánicas y reducir la deformación bajo carga.

- **Estabilización con cemento:** el uso de cemento para estabilizar suelos y capas de base en pavimentos flexibles es una práctica común en la ingeniería vial. El cemento mejora significativamente la rigidez del material, aumenta la resistencia al esfuerzo cortante y reduce la susceptibilidad del suelo a la humedad y la expansión. En pavimentos flexibles, la estabilización con cemento se utiliza para reforzar la base o la subbase, aumentando la vida útil del pavimento y reduciendo los costos de mantenimiento (Little & Nair, 2009).
- **Módulo de elasticidad en bases estabilizadas:** la estabilización con cemento también modifica el módulo de elasticidad del material tratado, haciéndolo más resistente a la deformación bajo cargas repetitivas. Este parámetro es clave para evaluar el desempeño de las bases estabilizadas, y puede ser medido mediante pruebas como el ensayo UCS (*Unconfined Compressive*

Strength) o con deflectómetros como el LWD y el FWD (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2017b).

e. **Deterioro de los pavimentos flexibles**

El deterioro de los pavimentos flexibles es un proceso inevitable que ocurre debido al tráfico continuo y a la exposición a condiciones climáticas adversas, como el agua y las temperaturas extremas. Los principales tipos de deterioro en los pavimentos flexibles son:

- **Fisuración:** la fisuración ocurre cuando las capas del pavimento sufren tensiones que exceden su capacidad de deformación. Existen varios tipos de fisuras, incluyendo fisuración por fatiga, fisuración térmica y fisuración por contracción (Monismith & Epps, s.f.).
- **Ahuellamiento:** el ahuellamiento es una deformación permanente que se produce en la capa de rodadura debido a la repetición de cargas vehiculares. Este fenómeno es más común en pavimentos con capas no estabilizadas o con una subrasante débil (Sebaaly et al., 2015).
- **Desprendimiento superficial:** este tipo de deterioro ocurre cuando la capa superficial del pavimento comienza a perder agregados o material debido a la acción del tráfico o a condiciones climáticas extremas, lo que compromete la durabilidad del pavimento y su capacidad de resistir el desgaste (Asphalt Institute, 2007).

f. **Normativas relacionadas con pavimentos flexibles**

Existen diversas normativas internacionales que regulan el diseño, la construcción y la evaluación de pavimentos flexibles. Entre las más relevantes se encuentran las siguientes:

ASTM D1557. Métodos de ensayo estándar para las características de compactación de suelos en laboratorio utilizando esfuerzo modificado: esta norma describe los métodos para determinar las características de compactación de los suelos utilizando un esfuerzo modificado, lo cual es crucial para garantizar que las capas granulares de los pavimentos flexibles estén adecuadamente compactadas (ASTM, 2012).

AASHTO T99. Relación humedad-densidad de los suelos utilizando un pisón de 5.5 libras y una caída de 12 pulgadas: esta norma establece los métodos para determinar la relación entre la humedad y la densidad de los suelos en pavimentos flexibles, con el fin de lograr la compactación óptima en campo (American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2018).

C. HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LOS DEFLECTÓMETROS DE IMPACTO

1. Antecedentes y orígenes

El origen de los deflectómetros de impacto se remonta a los inicios de la década de 1960 del siglo veinte, cuando ingenieros franceses que conformaban parte del Laboratorio Central de Puentes y Carreteras (LCPC, de sus siglas en francés: *Laboratoire central des ponts et chaussées*), buscaban alternativas para medir la capacidad estructural de los pavimentos iguales o más eficientes, en comparación con la viga Benkelman. Después de años de investigación, los franceses dieron origen al sistema que hasta la actualidad se ha mantenido: el deflectómetro con aplicación de carga amortiguada, que consiste en una masa que se deja caer sobre un sistema de muelles, de ahí surge su nombre, *Falling Weight Deflectometer* o Deflectómetros de Impacto (por sus siglas en inglés, FWD). (Bardasano Gonzales, 2014).

Este tipo de equipos, con el paso del tiempo, han evolucionado para que los equipos sean más manejables y seguros, ya que los primeros modelos de deflectómetros ideados por ingenieros franceses y daneses eran poco prácticos. Entre las mejoras que se han introducido a lo largo de los años están: el uso de topes de goma como amortiguadores, la elevación de la carga mediante bombas hidráulicas, el montaje de equipo en remolques para facilitar su transporte y el registro electrónico de mediciones a través de sensores LVDT (*Linear Variable Differential Transformer* o transformador diferencial de variación lineal).

2. Deflectómetros de impacto

Los deflectómetros de impacto son equipos no destructivos utilizados para medir la deflexión superficial de los pavimentos bajo una carga aplicada, proporcionando información sobre la capacidad estructural y la rigidez de los materiales que conforman el pavimento y sus capas subyacentes. La deflexión medida se utiliza para calcular el módulo elástico del pavimento, lo que es clave para evaluar su comportamiento frente al tráfico y determinar la necesidad de mantenimiento o rehabilitación (Huang, 2004).

Estos equipos aplican una carga dinámica que simula las condiciones de carga de los vehículos pesados en la carretera, midiendo la respuesta del pavimento a dicha carga en términos de deflexión. Los deflectómetros de impacto pueden clasificarse principalmente en dos tipos: el *Falling Weight Deflectometer* (FWD) y el *Light Weight Deflectometer* (LWD). Ambos equipos proporcionan mediciones basadas en principios similares, pero difieren en su tamaño, capacidad de carga y aplicaciones.

El uso de deflectómetros de impacto en la evaluación de pavimentos y carreteras requiere además una estricta adherencia a normativas y estándares específicos para asegurar la precisión y uniformidad en la recopilación de datos. Entre las regulaciones más relevantes se encuentra la norma ASTM E2583, que establece los procedimientos para medir la deflexión de pavimentos mediante estos equipos, así como la guía AASHTO R 32, proporcionada por la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y de Transporte (AASHTO, 1993), y las normas emitidas por la Organización Internacional de Normalización (ISO) relacionadas con la evaluación estructural de pavimentos.

A esto se suman las recomendaciones de los fabricantes, las normativas locales o estatales aplicables según la ubicación del proyecto, y las prácticas técnicas recomendadas por la industria. El cumplimiento de estas disposiciones es fundamental para obtener datos confiables y respaldar la toma de decisiones en el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos y redes viales (Flintsch et al., 2013).

3. *Falling Weight Deflectometer (FWD)*

El *Falling Weight Deflectometer (FWD)* es un equipo de mayor tamaño y capacidad que el LWD, diseñado para evaluar las propiedades estructurales de los pavimentos de manera precisa y eficiente. El FWD se utiliza principalmente en proyectos viales grandes, donde es necesario evaluar la integridad estructural de las carreteras pavimentadas, como autopistas y aeropuertos.

El FWD aplica una carga de impacto mediante la caída controlada de un peso, que genera una deflexión en la superficie del pavimento. Sensores geofónicos distribuidos alrededor del punto de impacto registran la deflexión del pavimento en varios puntos, lo que permite calcular el perfil de deflexión. A partir de este perfil, se puede estimar el módulo elástico de cada capa del pavimento, así como identificar posibles problemas estructurales en las capas inferiores (ASTM, 2009). La Figura 9 muestra el equipo FWD de Dynatest, uno de los modelos más utilizados internacionalmente para este tipo de ensayos.

Este equipo es altamente preciso y se utiliza en estudios de rehabilitación de pavimentos y en investigaciones que requieren evaluaciones profundas de la capacidad estructural. No obstante, su uso está limitado a grandes proyectos debido a su costo elevado y la complejidad de operación (Portland Cement Association [PCA], 2016).

Figura 9.
Deflectómetro de impacto FWD de Dynatest



Nota. Adaptado de Dynatest (2022).

D. COMPRESIÓN SIN CONFINAR (UCS)

La Prueba de Compresión Sin Confinar (UCS, por sus siglas en inglés *Unconfined Compressive Strength*) es ampliamente utilizada en la ingeniería geotécnica para medir la resistencia a compresión de suelos y materiales estabilizados sin la aplicación de esfuerzos laterales, proporcionando información crucial sobre la capacidad de soporte del material bajo carga axial. A continuación, se detallan los principios, procedimientos, normativas, limitaciones y aplicaciones de esta prueba, que son fundamentales para evaluar la calidad de los materiales en proyectos de infraestructura vial.

1. Principios de la prueba

La UCS mide la capacidad de un material para resistir una carga axial sin confinamiento lateral, lo que permite simular condiciones in situ para ciertos tipos de suelo y bases estabilizadas. Se aplica una carga axial a una muestra cilíndrica compactada hasta la falla, determinando la resistencia máxima a la compresión (Das, 2013). Esta prueba se utiliza especialmente en suelos cohesivos y materiales estabilizados con cemento, dado que proporciona una evaluación directa de la resistencia a la compresión del material sin la necesidad de equipos complejos.

2. Aplicación en suelos y materiales estabilizados con cemento

En bases estabilizadas con cemento, la UCS es una herramienta clave para evaluar el comportamiento mecánico y la resistencia de la mezcla suelo-cemento, donde la resistencia aumenta conforme se incrementa el contenido de cemento (Petry & Little, 2002). Esta prueba se utiliza para determinar la cantidad óptima de estabilizante en el diseño de pavimentos, garantizando que las bases tengan la durabilidad y capacidad de carga necesarias para soportar el tránsito vehicular (AASHTO, 2013). En general, una mayor cantidad de cemento en la mezcla conduce a mayores valores de resistencia a la compresión, lo que es crucial para el diseño de pavimentos.

3. Procedimiento de la prueba

El procedimiento estándar para la realización de la prueba UCS sigue normativas técnicas específicas que aseguran su precisión y confiabilidad, tales como las normas ASTM D1633 y D2166 (ASTM, 2016). Estos son los pasos principales:

- 1) **Preparación de la muestra:** la muestra se compacta en moldes cilíndricos siguiendo las especificaciones de densidad y humedad establecidas por las normas técnicas. El tamaño de la muestra es un factor crítico que afecta la validez de los resultados (Bowles, 1996).
- 2) **Prueba de compresión:** la muestra se coloca en la máquina de compresión axial, que aplica una carga uniforme hasta que la muestra falla. Durante la prueba, se registran los datos de carga y desplazamiento axial (Das, 2013).
- 3) **Cálculo de la resistencia a compresión:** la resistencia a compresión se calcula dividiendo la carga máxima obtenida por el área de la sección transversal de la muestra. La resistencia UCS, expresada en unidades de presión (kPa o MPa), es un indicador clave de la calidad y durabilidad del material (Head & Epps, 2011).
- 4) **Determinación de la deformación:** a medida que se aplica la carga, también se mide la deformación de la muestra, lo que permite obtener una curva de esfuerzo-deformación. Esta curva es crucial para calcular el módulo elástico del material y evaluar su comportamiento bajo carga.

4. Normativas aplicables (ASTM D1633)

La prueba UCS para suelos estabilizados con cemento se realiza bajo la norma ASTM D1633, que establece procedimientos específicos para medir la resistencia a compresión de suelos tratados con agentes estabilizadores (ASTM, 2016). Esta norma es esencial para asegurar que los resultados sean comparables y confiables, proporcionando un marco normativo riguroso para la ejecución de

la prueba. Además, la ASTM D2166 establece los procedimientos para la ejecución de la UCS en suelos cohesivos, lo cual es aplicable a muchos suelos estabilizados (ASTM, 2016).

La ASTM D1633 especifica dos métodos: Método A para pruebas sin saturación de las muestras y Método B para muestras completamente saturadas, lo que permite adaptar la prueba según las condiciones específicas del material y del proyecto. En el contexto de pavimentos, este estándar es ampliamente utilizado para determinar la calidad de bases estabilizadas con cemento en proyectos de infraestructura vial (AASHTO, 2013).

5. Interpretación de los resultados

Los resultados de la prueba UCS se interpretan en función de la resistencia máxima a la compresión y de la curva de esfuerzo-deformación generada durante la prueba. Un valor alto de resistencia indica que el material es capaz de soportar mayores cargas antes de fallar, lo que es deseable en aplicaciones estructurales como bases de pavimentos (Das, 2013). Además, la curva de esfuerzo-deformación proporciona información sobre el comportamiento elástico del material, ayudando a los ingenieros a evaluar la ductilidad o fragilidad del material bajo carga (Petry & Little, 2002).

6. UCS en comparación con otros métodos de evaluación de pavimentos

La UCS es un método sencillo y económico para medir la resistencia de suelos estabilizados; sin embargo, presenta algunas limitaciones, especialmente en suelos muy rígidos o estabilizados con altos porcentajes de cemento (Bowles, 1996). A diferencia de otras pruebas como el triaxial o el *Light Weight Deflectometer* (LWD), la UCS no tiene en cuenta los efectos del confinamiento lateral y puede no simular completamente las condiciones de campo (Terzaghi et al., 1996). No obstante, sigue siendo una herramienta valiosa en el diseño y control de calidad de pavimentos.

7. Limitaciones de la prueba UCS en suelos muy rígidos

Es importante destacar que la prueba UCS puede presentar limitaciones cuando se aplica a suelos muy rígidos o altamente estabilizados, como aquellos que contienen altos porcentajes de cemento. En estos casos, el comportamiento del material puede ser más frágil y los resultados de la prueba podrían no reflejar con precisión la resistencia real del pavimento en condiciones de servicio. Esta limitación es relevante para investigaciones que, como esta tesis, comparan los resultados de UCS con otros métodos de medición de módulo como el LWD, donde las diferencias en la medición pueden ser significativas en bases altamente estabilizadas (Head & Epps, 2011).

8. Aplicaciones prácticas y relevancia en el diseño de pavimentos

La UCS es una prueba crucial para el diseño de bases y subbases estabilizadas con cemento en pavimentos, ya que permite a los ingenieros definir los porcentajes óptimos de cemento y otros estabilizantes. Los datos obtenidos de la prueba UCS son utilizados para garantizar que las bases tengan la resistencia necesaria para soportar el tráfico pesado, prolongando así la vida útil del pavimento (Petry & Little, 2002). Esta prueba también es un componente esencial en el control de calidad durante la construcción, asegurando que los materiales cumplan con los estándares requeridos.

9. Uso de la prueba UCS en proyectos de infraestructura vial en Guatemala

En Guatemala, la UCS se utiliza ampliamente en proyectos de infraestructura vial para evaluar la calidad de los suelos y bases estabilizadas. La capacidad de medir la resistencia a la compresión de los suelos estabilizados es esencial en la construcción de carreteras, especialmente en regiones donde los suelos nativos carecen de las propiedades mecánicas adecuadas (Bolaños, 2015). La implementación de la UCS en la práctica diaria ayuda a garantizar que los proyectos viales cumplan con los estándares internacionales de calidad y durabilidad.

E. DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO LIVIANO (LWD)

El Deflectómetro de Impacto Liviano (LWD) es un equipo portátil diseñado para medir la deflexión superficial de un suelo o pavimento bajo una carga de impacto. Este equipo, normado bajo la norma ASTM E2583 de la ASTM (2017a), es utilizado para evaluar la rigidez o el módulo dinámico del suelo in situ, proporcionando una estimación rápida de la capacidad portante del material sin necesidad de extraer muestras.

El LWD es ampliamente utilizado en el control de calidad de suelos y pavimentos, ya que es un método no destructivo que permite realizar mediciones de manera rápida y en múltiples puntos dentro de un proyecto vial. Sin embargo, la norma ASTM E2583 advierte que el equipo no está diseñado para suelos extremadamente rígidos, ya que la deflexión medida bajo tales condiciones puede ser demasiado pequeña para proporcionar resultados precisos (Jiménez & Rodríguez, 2019). En este estudio, aunque el manual del LWD indica esta limitación, se utilizaron muestras de suelo estabilizadas con altos contenidos de cemento (más de 4.5 %) para evaluar el comportamiento del equipo bajo estas condiciones, obteniendo resultados que mostraron una creciente discrepancia entre los módulos medidos con el LWD y los obtenidos mediante la UCS.

El procedimiento del LWD implica la aplicación de una carga sobre la superficie del suelo o pavimento, midiendo la deflexión resultante. A partir de esta deflexión, se calcula el módulo dinámico, que es una indicación de la rigidez del material bajo carga. El LWD es especialmente útil para suelos

no estabilizados o suelos con bajos contenidos de cemento, pero su precisión disminuye a medida que el suelo se vuelve más rígido (PCA, 2016).

1. Origen del LWD

A inicios de los años 1970, los métodos analíticos (o mecanicistas) dentro de la ingeniería de pavimentos comenzaron a recibir un incremento de apoyo internacional. El primer deflectómetro liviano (LWD), portátil del mundo fue introducido por Dynatest, en la década de 1980. Este tuvo como propósito ser un nuevo método para la determinación del módulo elástico de materiales no ligados en pavimentos. Este logró ser un dispositivo de medición deflectométrico no destructivo usado para evaluar la rigidez del suelo, con mayor eficiencia en lo que a movilidad y rapidez de medición se refiere (Urrutia, 2018).

Este equipo está siendo más utilizado a lo largo del mundo, principalmente para el control de calidad a gran escala, evaluación en las nuevas zonas de construcción y evaluación de pavimentos en sitios ya existentes (Rubio Haasler, 2012). Se introdujo como la versión portátil del FWD, con una variedad de mejoras las cuales incluían:

- El desarrollo de un sistema de amortiguación que optimiza el impulso de carga sin necesidad del uso de herramientas.
- El sistema DPS (*Dual Plate System*), diseñado para realizar pruebas en una única ubicación utilizando dos tamaños de placas diferentes.
- El sistema LWDmod, basado en el famoso Elmod de Dynatest (utilizado en FWD), retroanaliza módulos y valida espesores para cumplir con especificaciones.

2. Principios de funcionamiento

El LWD es operable por una sola persona y permite una operación silenciosa. Haciendo uso de los pesos adicionales que se pueden añadir al equipo, el LWD de Dynatest, es capaz de producir hasta 15 kilonewtons (que son 3,300 libras fuerza) de carga máxima. El equipo pesa aproximadamente 22 kilogramos y es altamente portátil. No requiere de medidas de referencia y brinda una alternativa rentable a las pruebas estáticas de placa de carga. Dynatest asegura que el LWD ideal para el aseguramiento de la calidad y control de calidad en la subrasante, subbase y pavimentos flexibles para verificar que se cumplan con las especificaciones (Dynatest, 2021).

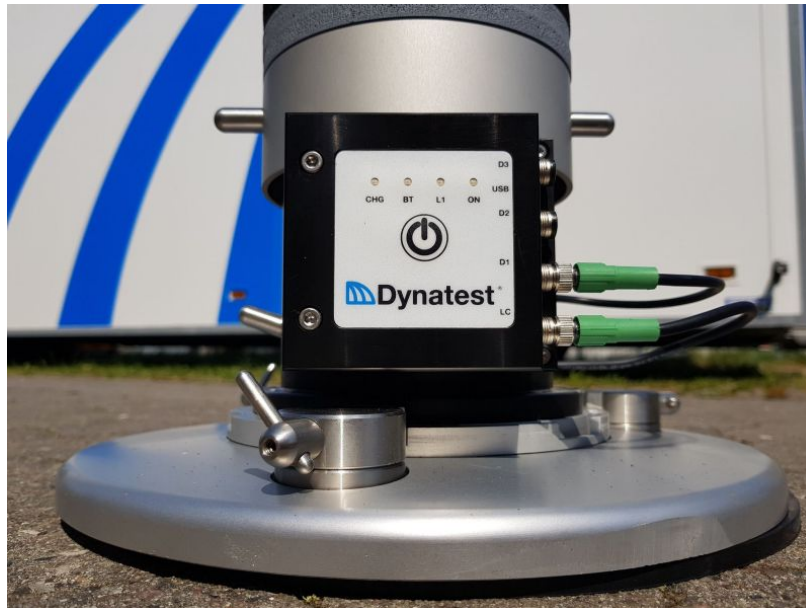
De acuerdo a la información presentada por Dynatest (2021), el LWD utiliza una celda de carga y geófonos con la misma precisión que el Deflectómetro de Impacto. Todas las partes metálicas del equipo utilizan acero inoxidable o anodizado. Todo el sistema se alimenta de cuatro baterías AA alcalinas o recargables, lo que proporciona cerca de 2,000 mediciones o lo equivalente a 12 horas de funcionamiento continuo.

3. Regulaciones internacionales

Cabe recalcar que en base a la información brindada por Dynatest en el 2021, el modelo de LWD distribuido por Dynatest (el que se utilizará en este trabajo de investigación, ilustrado en la Figura 10) cumple con normativas internacionales, las cuales son: la norma americana ASTM E2583, con la norma inglesa IAN73, la norma danesa y la norma italiana para determinar el módulo y la compactación del material (Dynatest, 2022).

Figura 10.

Deflectómetro de impacto liviano modelo 3032 LWD de Dynatest



Nota. Adaptado de Dynatest (2023).

Por otro lado, según información brindada por Terratest (2023), el modelo de LWD distribuido por Terratest también cumple con normativas internacionales, como lo son: ASTM E2583, Unión Europea CEN ICS 93.020, la norma inglesa IAN73 y la norma italiana UNI11531-1 para determinar el módulo y la compactación del material. Este modelo se puede observar en la Figura 11, en la cual se ve su operación.

Figura 11.
Deflectómetro de impacto liviano modelo 9000 LWD de Terratest



Nota. Adaptado de Terratest (2023).

4. Comparación entre FWD y LWD

Tanto el FWD como el LWD son herramientas útiles para evaluar la capacidad estructural de pavimentos y suelos, pero presentan diferencias significativas en su diseño, capacidad y aplicación.

a. Capacidad de Carga

El FWD es capaz de aplicar cargas mucho mayores que el LWD, lo que le permite medir la deflexión en pavimentos y suelos más rígidos, como carreteras pavimentadas y capas estabilizadas con cemento. El LWD, con su capacidad de carga limitada (alrededor de 15 kN), es más adecuado para suelos blandos o bases sin estabilizar. Esta diferencia de capacidad limita el uso del LWD en materiales rígidos, como los suelos estabilizados con altos porcentajes de cemento, ya que la deflexión medida es muy pequeña y difícil de interpretar (ASTM, 2017a).

b. Precisión

El FWD, al utilizar múltiples sensores distribuidos a diferentes distancias del punto de impacto, pro-

porciona un perfil de deflexión detallado, lo que permite una mejor estimación de las propiedades estructurales de las capas del pavimento. En contraste, el LWD utiliza un solo sensor en el punto de impacto, lo que reduce la cantidad de información disponible y, por lo tanto, la precisión en la estimación del módulo elástico (ASTM, 2009).

c. Aplicaciones

El FWD es utilizado en evaluaciones estructurales detalladas y estudios de rehabilitación de pavimentos existentes, mientras que el LWD es más adecuado para controles de calidad durante la construcción de carreteras y suelos compactados. (Jiménez & Rodríguez, 2019). En este estudio, aunque el LWD se utilizó para evaluar bases estabilizadas con cemento, sus resultados fueron menos fiables a medida que aumentaba la rigidez del material debido al contenido de cemento.

d. Costo y Complejidad

El FWD es considerablemente más costoso y requiere de personal especializado para su operación, mientras que el LWD es más económico y fácil de operar, lo que lo convierte en una herramienta más accesible para evaluaciones rápidas y en sitios de construcción.

e. Limitaciones en Suelos Rígidos

Una limitación importante del LWD, reconocida en su manual de operación y en la normativa ASTM E2583, es su ineficacia en suelos extremadamente rígidos, como los suelos estabilizados con cemento en altos porcentajes (ASTM, 2017a).

5. Aplicabilidad en proyectos viales de Guatemala

La evaluación estructural de los pavimentos y suelos en Guatemala se realiza bajo condiciones desafiantes debido a la diversidad geológica y climática del país. Equipos como el FWD y el LWD se han implementado en proyectos viales para garantizar la calidad de los suelos y pavimentos, pero su uso debe adaptarse a las condiciones locales. En particular, el LWD es una herramienta valiosa en proyectos rurales o en construcciones de menor escala, donde la rapidez y la economía son factores clave, mientras que el FWD es más adecuado para proyectos de gran envergadura en las principales redes viales del país (CIV, 2020).

VI. METODOLOGÍA

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo comparar los módulos elásticos obtenidos mediante el uso del *Light Weight Deflectometer* (LWD) y los módulos calculados a partir de la curva de deformación versus esfuerzo en la prueba de compresión simple sin confinamiento (UCS). El estudio se realizó en bases de pavimento estabilizadas con diferentes porcentajes de cemento, utilizando materiales de dos fuentes diferentes: La Roca, proveniente de su planta en Zona 18 de la Ciudad de Guatemala; y Agreca S.A., proveniente de su planta en Palín Escuintla. Este proceso metodológico está estructurado en varias fases, que incluyen: la recolección y caracterización de los materiales, la preparación de muestras, la realización de ensayos de laboratorio, el cálculo de módulos y finalmente el análisis comparativo de los resultados.

A. Estabilización de suelos con cemento

La estabilización de suelos con cemento es una técnica ampliamente utilizada para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos, incrementando su capacidad portante y resistencia a la intemperie. El cemento, al reaccionar con el agua y las partículas del suelo, forma productos de hidratación que unen las partículas del suelo, creando una matriz rígida que mejora significativamente la resistencia del material (Little & Nair, 2009).

Este proceso tiene aplicaciones importantes en la construcción de carreteras, especialmente en la mejora de las bases y subbases. La cantidad de cemento que se utiliza para estabilizar un suelo varía dependiendo de las características del suelo y de los requisitos del diseño estructural. En general, se utilizan porcentajes que oscilan entre el 1.5 % y el 7.5 % en peso de cemento respecto al suelo seco, como es el caso en este estudio. Se observó que, a medida que se incrementaba el contenido de cemento, las bases estabilizadas, particularmente la base "Agreca", mostraron un incremento en la resistencia a la compresión (PCA, 2016).

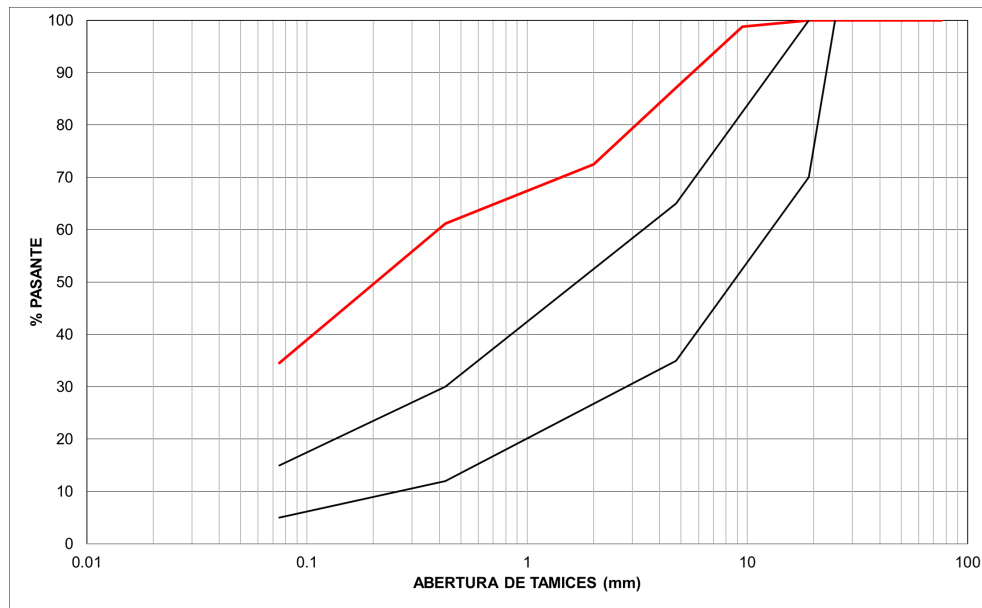
La normativa ASTM D1633 de la ASTM (2017b), establece el procedimiento estándar para la preparación y el ensayo de cilindros de suelo-cemento en laboratorio. Esta normativa especifica el proceso de mezcla, compactación y curado de las muestras de suelo estabilizado, así como el método para ensayar su resistencia a la compresión. Cumplir con esta normativa es fundamental para asegurar que las muestras sean representativas y que los resultados de los ensayos sean consistentes y comparables.

B. Recolección y caracterización de los materiales

La primera fase del proyecto consistió en la obtención y caracterización de los materiales base. Se recolectaron dos tipos de bases trituradas provenientes de fuentes locales utilizadas en proyectos de pavimentación en Guatemala: La Roca y Agreca. A ambas bases se les realizaron ensayos de caracterización de materiales, para los cuales los resultados fueron:

- **Granulometría:** se realizó el ensayo de granulometría para cada material siguiendo la norma ASTM C136. Este ensayo permitió determinar si los materiales cumplían con los requisitos granulométricos exigidos para su uso en pavimentos.
- **La Roca** no cumplió con los criterios granulométricos, presentando una distribución no uniforme de tamaños de partículas. Esto se puede observar en la curva granulométrica observada en la Figura 12.

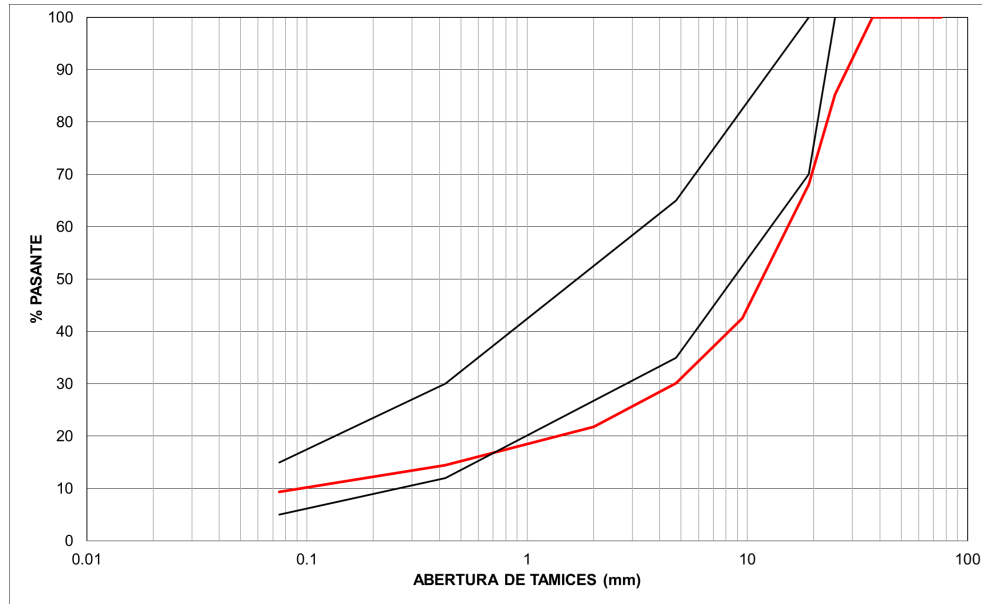
Figura 12.
Granulometría del agregado de La Roca



Nota. Elaboración propia.

- **Agreca** sí cumplió con los requisitos establecidos para la granulometría, lo cual se ve reflejado en la curva granulométrica ilustrada en la Figura 13. Presentando así una distribución adecuada que mejora las propiedades de compactación y resistencia de la base.

Figura 13.
Granulometría del agregado de Agreca



Nota. Elaboración propia.

- **Propiedades físicas:** se determinaron las propiedades físicas fundamentales de ambos materiales, tales como el límite líquido, el índice plástico, y la densidad máxima seca mediante los ensayos establecidos en las normas ASTM D4318 (Límites de Atterberg) y ASTM D1557 (Métodos de compactación utilizando esfuerzo modificado).

Estas pruebas iniciales proporcionaron una base sólida para la evaluación de las características y diferencias en el comportamiento mecánico de los dos materiales.

C. Preparación de muestras

Para cada uno de los dos tipos de base triturada, provenientes de La Roca y Agreca, se prepararon seis grupos de muestras. Cada grupo estuvo compuesto por tres especímenes, incluyendo un grupo sin estabilizar que funcionó como control, y cinco grupos adicionales estabilizados con diferentes porcentajes de cemento: 1.5 %, 3 %, 4.5 %, 6 % y 7.5

La dosificación del cemento se realizó tomando como referencia el peso seco del material base, respetando tanto los valores recomendados en la literatura técnica como las prácticas locales empleadas en la estabilización de suelos y bases. Esta etapa fue fundamental para asegurar la reproducibilidad y representatividad de las condiciones reales de obra.

Posteriormente, las muestras fueron compactadas en moldes utilizando un procedimiento estándar de compactación, conforme a lo establecido en la norma ASTM D558, que define los métodos de ensayo para determinar la relación humedad-densidad en suelos estabilizados con cemento. Esta compactación bajo condiciones controladas permitió alcanzar la densidad máxima posible en laboratorio, garantizando así consistencia entre los diferentes grupos de prueba. La Figura 14 muestra el proceso inicial de preparación y curado de los especímenes estabilizados en campo.

Figura 14.

Proceso de preparación para curado de las muestras



Nota. Elaboración propia.

Una vez compactadas, las muestras fueron sometidas a un proceso de curado durante siete días. Durante este periodo, se mantuvieron bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, con el objetivo de asegurar una adecuada hidratación del cemento. Este paso es esencial dentro del proceso de estabilización, ya que el curado influye de manera directa en la resistencia mecánica y durabilidad del material tratado a lo largo del tiempo. En la Figura 15 se muestra cómo lucía una muestra, preparada para el ensayo LWD.

Figura 15.
Ejemplo de muestra empleada para ensayo LWD



Nota. Elaboración propia.

Finalmente, la Figura 16 muestra el grupo completo de muestras de La Roca, preparadas para el ensayo de resistencia a la compresión simple (UCS), luego de su periodo de curado.

Figura 16.
Grupo de muestras de La Roca destinadas a ensayo UCS



Nota. Elaboración propia.

D. Ensayos de laboratorio

Una vez finalizado el proceso de curado, se realizaron los ensayos de laboratorio para medir la resistencia y los módulos de cada muestra utilizando dos métodos: la prueba de compresión simple sin confinamiento (UCS) y la medición con el *Light Weight Deflectometer* (LWD).

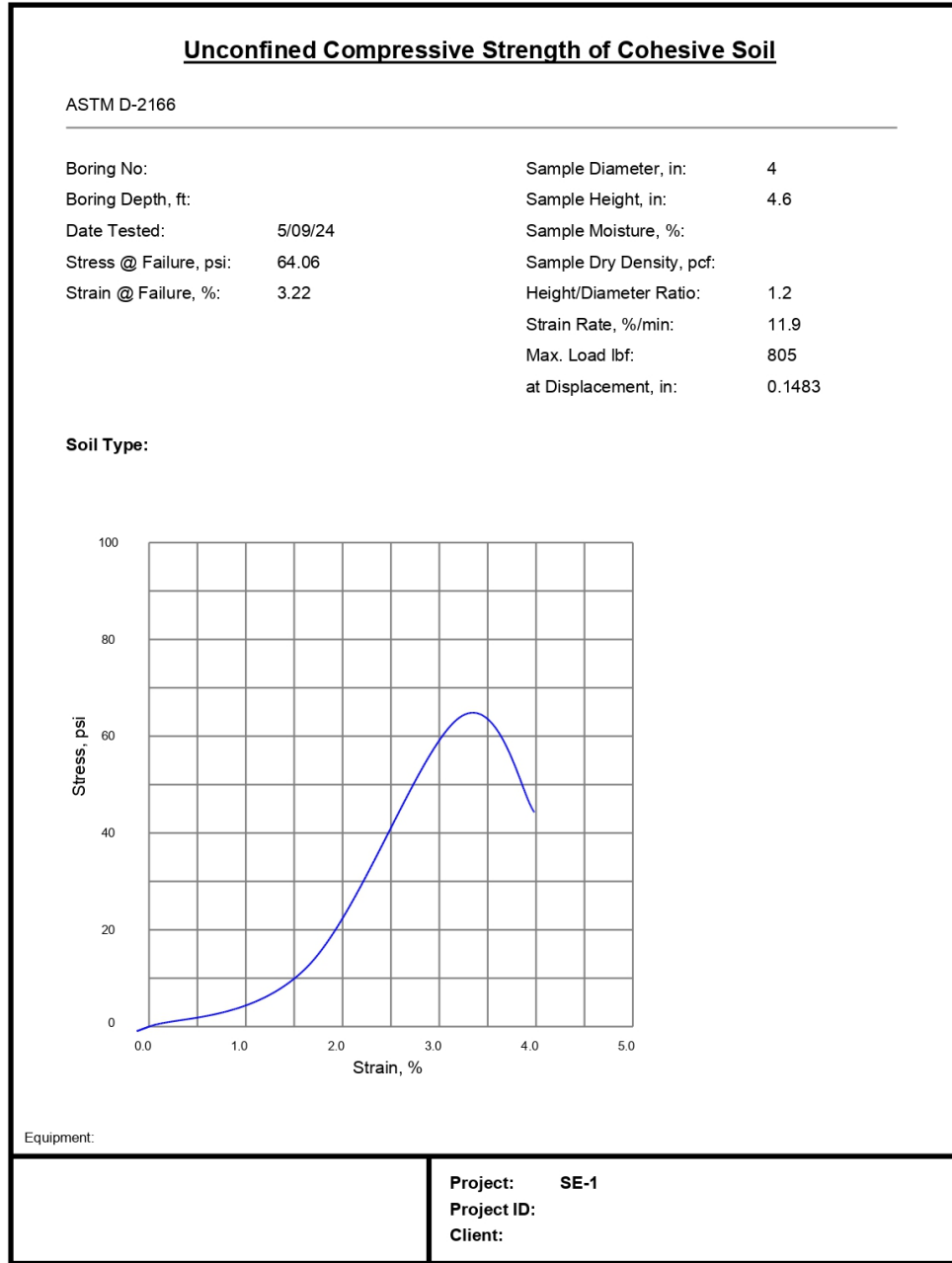
1. Ensayo UCS (*Unconfined Compressive Strength*)

El ensayo de resistencia a la compresión simple sin confinamiento (UCS) se llevó a cabo en las muestras estabilizadas y no estabilizadas, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM D1633 (Métodos estándar de ensayo para la resistencia a la compresión de cilindros de suelo-cemento moldeados). El equipo empleado para realizar el ensayo fue el modelo *HM-398 Load Frame* de Gilson, que tiene capacidad de someter las muestras a una carga máxima de 10,000 libras. Debido a esto, no fue posible realizar en ensayo en las muestras de la base Agreca estabilizadas con más de 4.5 % de cemento, ya que resistían cargas mayores a las que el equipo permitía.

El ensayo UCS permitió obtener el módulo de elasticidad a partir de la curva de esfuerzo-deformación de cada muestra, tomando en cuenta únicamente los esfuerzos equivalentes a los aplicados por el LWD (aproximadamente 233 kPa). La Figura 17 muestra un ejemplo del reporte generado por el software del equipo *HM-398 Load Frame*, el cual contiene la curva esfuerzo-deformación de la muestra ensayada y los parámetros extraídos automáticamente.

- **Procedimiento del ensayo:** cada muestra fue sometida a carga axial hasta su falla. Con la ayuda del Software del equipo *HM-398 Load Frame* (Gilson Unconfined), registrándose la deformación correspondiente a cada incremento de esfuerzo. Se obtuvo la curva de esfuerzo vs. deformación, de la cual se calculó el módulo de elasticidad en la región elástica del material.

Figura 17.
Ejemplo de reporte de resultados de la prueba UCS



Nota. Elaboración propia.

- **Comparación de resultados:** se evaluaron las diferencias en la resistencia entre las muestras de las bases La Roca y Agreca, mostrando que las muestras estabilizadas de Agreca resistieron mayores esfuerzos de compresión en comparación con las de La Roca. La Figura 18 muestra el equipo utilizado durante la prueba UCS, evidenciando la configuración del montaje con la muestra colocada entre las placas de carga.

Figura 18.

Ensayo UCS en muestras



Nota. Elaboración propia.

2. Ensayo con el *Light Weight Deflectometer* (LWD)

Se utilizó el *Light Weight Deflectometer* (LWD) para medir los módulos de cada muestra, tanto en su estado no estabilizado como en los diferentes niveles de estabilización. El LWD es un equipo portátil que genera una carga dinámica sobre la superficie de la muestra, simulando las condiciones reales de carga vehicular. En la Figura 19 se muestra el proceso de ensayo con LWD en una de las muestras, donde se aprecia el contacto del plato de carga sobre la superficie del espécimen.

- **Especificaciones del equipo:** el LWD utilizado aplicó en promedio un esfuerzo sobre la muestra de aproximadamente 233 kPa, suficiente para medir la deflexión de materiales flexibles, pero con limitaciones para medir módulos en materiales muy rígidos, como se señala en el manual del fabricante. A pesar de esta limitación, se decidió realizar el ensayo en las muestras altamente estabilizadas (mayores e iguales a 4.5 % de cemento) para obtener datos comparativos y verificar las posibles divergencias en los resultados.

Figura 19.

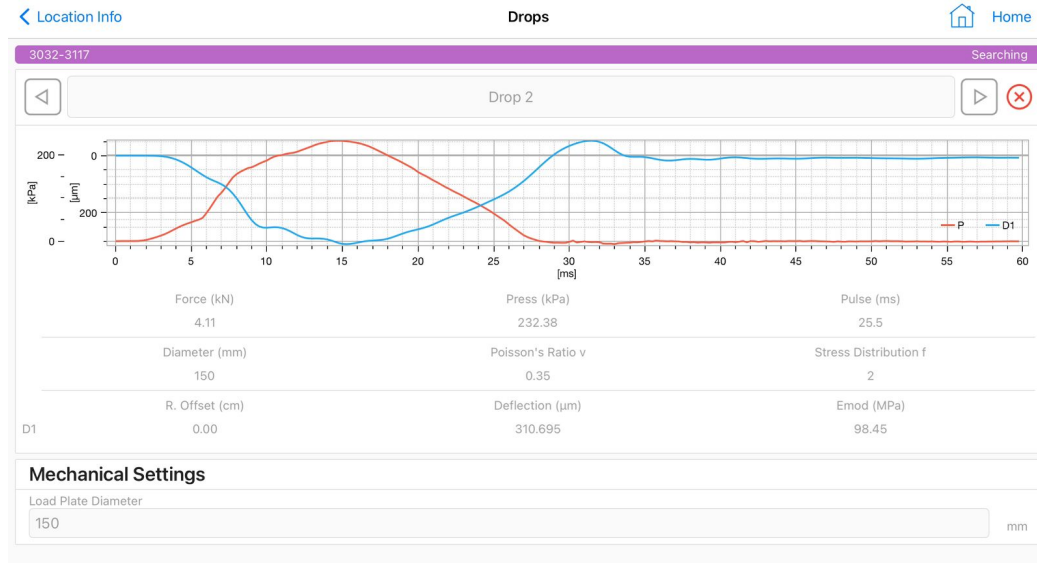
Ensayo con LWD en muestras



Nota. Elaboración propia.

- **Medición de módulos:** Haciendo uso de la aplicación móvil del modelo Dynatest LWD 3032, se midieron los módulos. La Figura 20 muestra un ejemplo de la interfaz del software utilizado, donde se visualizan los resultados obtenidos para el módulo dinámico de cada muestra, con curvas de carga y deflexión correspondientes.

Figura 20.
Ejemplo de medición de módulo haciendo uso del Software de Dynatest



Nota. Elaboración propia.

Los módulos obtenidos con el LWD se compararon con los calculados a partir del ensayo UCS. A medida que el porcentaje de cemento aumenta, se observa que la relación entre los módulos de UCS y LWD se hace más consistente, especialmente en las muestras estabilizadas con 4.5 % de cemento o más.

E. Determinación y comparación de módulos de elasticidad en materiales estabilizados

1. Módulo de elasticidad dinámico (Emod) en el LWD

El Emod o Módulo de Elasticidad Dinámico es una medida de la rigidez de un material bajo condiciones de carga de corta duración, calculada a través del *Light Weight Deflectometer* (LWD). Este valor representa la rigidez superficial del material y se deriva de la deflexión medida durante el impacto generado por el LWD. El cálculo del Emod se basa en la teoría de Boussinesq, que utiliza una carga puntual sobre una semiespacial para modelar la respuesta elástica. Este módulo dinámico se obtiene a partir de la relación entre la carga aplicada, la deflexión observada y el diámetro de la placa del LWD (ASTM, 2015). Este valor es útil para evaluar la resistencia y capacidad de carga de suelos y bases estabilizadas en el lugar, brindando un método práctico y rápido de evaluación en campo, aunque limitado en su aplicabilidad a materiales de alta rigidez.

2. Módulo de elasticidad secante y módulo de elasticidad verdadero

El módulo obtenido al calcular la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en una prueba de compresión sin confinamiento (UCS) se denomina módulo de elasticidad secante. Este módulo representa la relación entre el esfuerzo y la deformación en una región específica de la curva y se utiliza para describir la rigidez en el rango elástico inicial del material (Gowthaman et al., 2020). Por otro lado, el módulo de elasticidad verdadero, también llamado módulo tangente inicial, representa la pendiente de la curva justo al inicio de la deformación. A diferencia del módulo secante, el módulo verdadero refleja la rigidez intrínseca del material bajo pequeñas deformaciones y asume un comportamiento lineal ideal. En suelos y materiales estabilizados, el módulo secante se emplea más comúnmente para describir la rigidez, ya que estos materiales suelen mostrar un comportamiento no lineal en sus curvas esfuerzo-deformación (Muniandy & Huat, 2006).

3. Diferencias entre módulo secante y módulo de elasticidad verdadero

El módulo secante y el módulo de elasticidad verdadero no son equivalentes en su definición ni en su aplicación práctica. El módulo secante es la pendiente de la línea entre el origen y un punto específico en la curva esfuerzo-deformación, proporcionando una medida aproximada de la rigidez en el rango elástico (Zhang & Zhao, 2013). Este valor depende del punto de la curva elegido y resulta útil para describir el comportamiento no lineal en suelos y materiales de construcción. En cambio, el módulo de elasticidad verdadero se define como la pendiente inicial de la curva y describe la rigidez elástica del material en condiciones de deformación mínima, sin considerar la no linealidad (ASTM, 2015). En consecuencia, el módulo secante suele ser una estimación del módulo elástico bajo condiciones prácticas específicas, mientras que el módulo verdadero representa un valor más teórico.

4. Cálculo del módulo secante para esfuerzos equivalentes del LWD

Si se toma solo la porción de la curva esfuerzo-deformación que corresponde a los esfuerzos aplicados por el LWD en esta investigación (233 kPa en promedio) para calcular la pendiente, el valor resultante es un módulo secante, específicamente ajustado para el rango de carga que el LWD aplica en campo (Chua & Wheeler, 2007). Aunque representa la rigidez en el rango de carga específico del LWD, este valor no puede considerarse como el módulo de elasticidad verdadero, ya que sigue siendo un módulo secante calculado a partir de una porción específica de la curva esfuerzo-deformación y no desde el punto inicial (Gowthaman et al., 2020). Este módulo aproximado es útil en estudios

comparativos para observar la respuesta del material bajo el esfuerzo equivalente del LWD, pero no representa una rigidez elástica completa del material.

F. Análisis estadístico de resultados

La fase final del estudio consistió en comparar los módulos de elasticidad obtenidos mediante ambos métodos (UCS y LWD) para cada tipo de base triturada y porcentaje de estabilización. Se realizó un análisis estadístico para comparar los resultados de los módulos obtenidos teóricamente mediante pruebas de compresión sin confinar (UCS) y los módulos prácticos medidos con el *Light Weight Deflectometer* (LWD). El objetivo de este análisis fue determinar la relación entre ambos conjuntos de datos y evaluar la precisión de las predicciones teóricas frente a los resultados en campo.

Como se mencionó anteriormente, se tomaron seis muestras de pavimentos estabilizados con diferentes porcentajes de cemento (0 %, 1.5 %, 3 %, 4.5 %, 6 % y 7.5 %), y para cada una de ellas se registraron tanto los módulos teóricos como los módulos prácticos. A partir de estos datos, se realizaron los siguientes análisis:

1. Estadísticas descriptivas

Se calcularon medidas de tendencia central y dispersión, como la media, desviación estándar, valor mínimo, valor máximo, y los cuartiles para ambos conjuntos de datos (módulos teóricos y prácticos). Estas estadísticas proporcionan una visión general de la variabilidad y comportamiento de ambos tipos de módulos.

2. Análisis de variación porcentual

Se calculó la diferencia porcentual entre los módulos teóricos y prácticos utilizando la fórmula:

$$\text{Variación (\%)} = \left(\frac{\text{Módulos Teóricos} - \text{Módulos Prácticos}}{\text{Módulos Teóricos}} \right) \times 100 \quad (1)$$

3. Correlación de Pearson

La correlación de Pearson es una medida estadística que evalúa la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos variables cuantitativas (Mukaka, 2012). Representada por el coeficiente de correlación r , esta medida puede variar entre -1 y 1, donde un valor de 1 indica una correlación positiva perfecta, -1 una correlación negativa perfecta, y 0 la ausencia de correlación (Rodgers & Nicewander, 1988). La correlación de Pearson es ampliamente utilizada en investigación para determinar si existe una asociación significativa entre variables, y su cálculo asume que los datos siguen una distribución normal y que la relación entre las variables es lineal (Schober et al., 2018). Para evaluar la relación entre los módulos teóricos y prácticos, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, calculado a través de la siguiente fórmula:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

donde:

- r = Coeficiente de correlación de Pearson
- X_i = Valores individuales del primer conjunto de datos
- Y_i = Valores individuales del segundo conjunto de datos
- $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$
- $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$
- n representa el número de datos en cada conjunto.

4. Regresión lineal

La regresión lineal es una técnica estadística que modela la relación entre una variable dependiente y una o más independientes mediante una ecuación lineal. Permite predecir el valor de la variable dependiente según los valores de las independientes y estimar la influencia de cada predictor (Draper & Smith, 1998). Asume una relación lineal entre variables y se aplica comúnmente en campos como economía, ciencias sociales y medicina para hacer predicciones, identificar tendencias y analizar relaciones (Kutner et al., 2004).

En esta investigación se aplicó una regresión lineal simple para analizar la relación entre los módulos teóricos (variable independiente) y los módulos prácticos (variable dependiente).

VII. RESULTADOS

En esta sección se analizan e interpretan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados a las muestras de base estabilizada con cemento. En los siguientes cuadros se presenta una comparación entre los resultados de las muestras de La Roca en ambas pruebas: el ensayo con deflectómetro de impacto liviano (LWD) y el de Compresión Sin Confinar (UCS).

A. RESULTADOS DE LA BASE TRITURADA LA ROCA

El Cuadro 2 muestra una comparación de los esfuerzos de compresión (en kPa) a los que las muestras de la base La Roca fueron sometidas mediante dos métodos: la prueba de Compresión Sin Confinar (UCS) y el *Light Weight Deflectometer* (LWD). Los datos revelan una diferencia considerable entre los esfuerzos de compresión que ambos métodos pueden aplicar sobre las muestras.

Cuadro 2

Comparación de esfuerzos a los que las muestras fueron sometidas de la base La Roca

LA ROCA		Compresión Sin Confinar	LWD
No. Muestra	% Cemento	Esfuerzo de compresión (kPa)	Esfuerzo de Compresión (kPa)
1	0.00%	498.57	229.00
2	1.50%	2,708.87	231.75
3	3.00%	4,269.51	232.25
4	4.50%	4,949.98	232.75
5	6.00%	4,472.35	232.00
6	7.50%	5,430.35	235.25

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 3*Resultados de la prueba UCS de la base La Roca*

LA ROCA		Compresión Sin Confinar	
No. Muestra	% Cemento	Esfuerzo de compresión (kPa)	Módulo Teórico (MPa)
1	0.00%	498.57	81.17
2	1.50%	2,708.87	133.78
3	3.00%	4,269.51	145.66
4	4.50%	4,949.98	166.59
5	6.00%	4,472.35	203.46
6	7.50%	5,430.35	265.01

Nota. Elaboración propia.**Cuadro 4***Resultados de la prueba LWD de la base La Roca*

LA ROCA		LWD		
No. Muestra	% Cemento	Esfuerzo de Compresión (kPa)	Emod por Muestra (MPa)	Emod Promedio (MPa)
1	0.00%	229.00	83.00	83.67
			83.00	
			85.00	
2	1.50%	231.75	108.00	106.33
			106.00	
			105.00	
3	3.00%	232.25	128.00	129.33
			129.00	
			131.00	
4	4.50%	232.75	104.00	105.67
			105.00	
			108.00	
5	6.00%	232.00	77.00	78.67
			79.00	
			80.00	
6	7.50%	235.25	119.00	117.67
			118.00	
			116.00	

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 5

Cuadro comparativo entre módulos teóricos (UCS) y módulos prácticos (LWD) de la base La Roca

LA ROCA		Compresión Sin Confinar	LWD
No. Muestra	% Cemento	Módulo Teórico (MPa)	Emod Promedio (MPa)
1	0.00%	81.17	83.67
2	1.50%	133.78	106.33
3	3.00%	145.66	129.33
4	4.50%	166.59	105.67
5	6.00%	203.46	78.67
6	7.50%	265.01	117.67

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 6

Estadística descriptiva de los resultados de la base La Roca

LA ROCA	Módulo Teórico (MPa)	Emod Promedio (MPa)
Media	165.94	103.56
Desviación Estándar	63.02	19.45
Valor Mínimo	81.17	78.67
Valor Máximo	265.01	129.33
1er Cuartil	136.75	89.17
Mediana	156.12	106.00
3er Cuartil	194.24	114.83

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 7

Variación porcentual de los resultados de la base La Roca

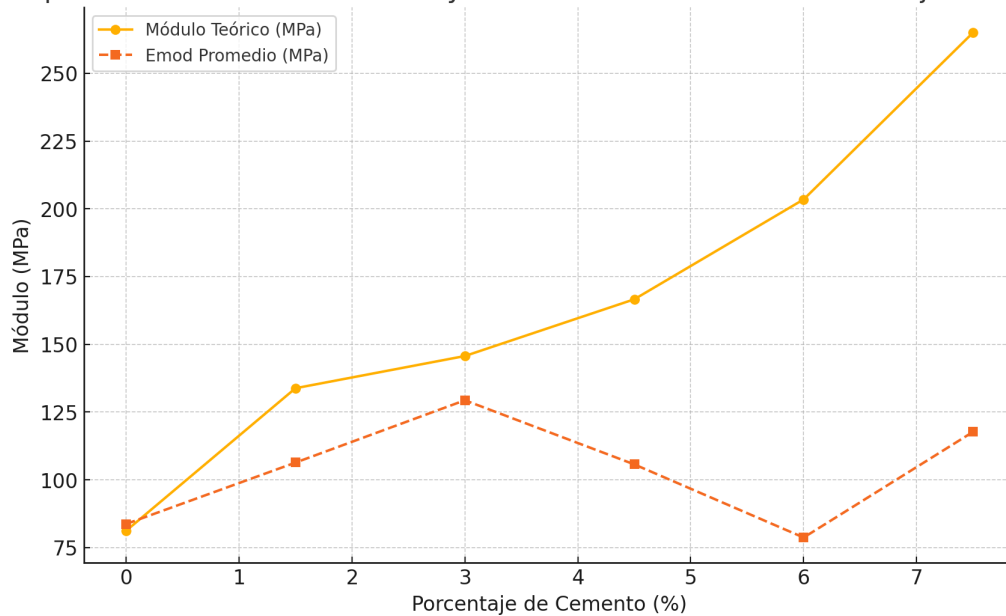
LA ROCA		Compresión Sin Confinar	LWD	Variación (%)
No. Muestra	% Cemento	Módulo Teórico (MPa)	Emod Promedio (MPa)	
1	0.00%	81.17	83.67	3.08
2	1.50%	133.78	106.33	20.52
3	3.00%	145.66	129.33	11.21
4	4.50%	166.59	105.67	36.57
5	6.00%	203.46	78.67	61.34
6	7.50%	265.01	117.67	55.60

Nota. Elaboración propia.

Figura 21.

Visualización comparativa de los módulos teóricos y prácticos en función del porcentaje de cemento de la base La Roca

Comparación de Módulos Teóricos y Prácticos en Función del Porcentaje de Cemento

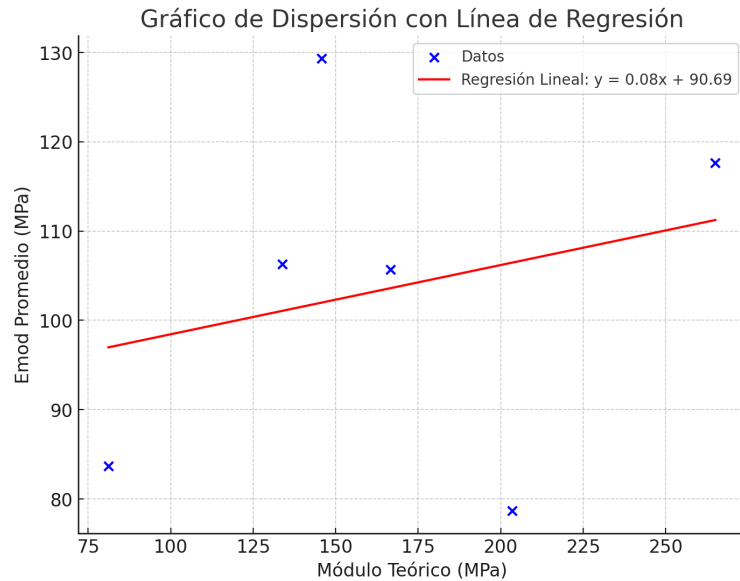


Nota. Elaboración propia.

En el caso de los ensayos de La Roca, la correlación entre los módulos teóricos y los módulos prácticos es de aproximadamente **0.25**, lo que indica una correlación positiva débil. Esto sugiere que, aunque existe una relación entre ambos conjuntos de datos, no es muy fuerte.

Figura 22.

Gráfico de dispersión de los resultados de la base La Roca



Nota. Elaboración propia.

La ecuación de la regresión lineal es:

$$y = 0.08x + 90.69 \quad (3)$$

donde:

- y = representa el módulo práctico (Emod promedio).
- x = representa el módulo teórico (módulo teórico).

Esta ecuación describe la relación aproximada entre los módulos teóricos y prácticos, aunque, como indica la baja correlación, esta relación es débil.

B. RESULTADOS DE LA BASE TRITURADA AGRECA

El Cuadro 8 presenta una comparación de los esfuerzos de compresión (en kPa) aplicados a las muestras de la base Agreca mediante dos métodos: la prueba de Compresión Sin Confinar (UCS) y el *Light Weight Deflectometer* (LWD). La diferencia en los esfuerzos de compresión que ambos métodos pueden aplicar es notable, destacándose una brecha considerable entre los resultados de cada prueba.

Cuadro 8

Comparación de esfuerzos a los que las muestras fueron sometidas de la base Agreca

AGRECA		Compresión Sin Confinar	LWD
No. Muestra	% Cemento	Esfuerzo de compresión (kPa)	Esfuerzo de Compresión (kPa)
1	0.00%	534.60	229.25
2	1.50%	3,523.48	233.00
3	3.00%	5,585.81	235.75
4	4.50%	-	235.50
5	6.00%	-	237.00
6	7.50%	-	234.60

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 9*Resultados de la prueba UCS de la base Agreca*

AGRECA		Compresión Sin Confinar	
No. Muestra	% Cemento	Esfuerzo de compresión (kPa)	Módulo Teórico (MPa)
1	0.00%	534.60	134.43
2	1.50%	3,523.48	131.26
3	3.00%	5,585.81	209.29
4	4.50%	-	-
5	6.00%	-	-
6	7.50%	-	-

Nota. Elaboración propia.**Cuadro 10***Resultados de la prueba LWD de la base Agreca*

AGRECA		LWD		
No. Muestra	% Cemento	Esfuerzo de Compresión (kPa)	Emod por Muestra (MPa)	Emod prom (MPa)
1	0.00%	229.25	72.00	72.67
			73.00	
			73.00	
2	1.50%	233.00	94.00	98.67
			99.00	
			103.00	
3	3.00%	235.75	119.00	124.67
			132.00	
			123.00	
4	4.50%	235.50	119.00	122.33
			124.00	
			124.00	
5	6.00%	237.00	121.00	121.33
			119.00	
			124.00	
6	7.50%	234.60	111.00	111.00
			112.00	
			110.00	

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 11*Cuadro comparativo entre módulos teóricos (UCS) y módulos prácticos (LWD) de la base Agreca*

AGRECA		Compresión Sin Confinar	LWD
No. Muestra	% Cemento	Módulo Teórico (MPa)	Emod prom (MPa)
1	0.00%	134.43	72.67
2	1.50%	131.26	98.67
3	3.00%	209.29	124.67
4	4.50%	-	122.33
5	6.00%	-	121.33
6	7.50%	-	111.00

Nota. Elaboración propia.**Cuadro 12***Estadística descriptiva de los resultados de la base Agreca*

LA ROCA	Módulo Teórico (MPa)	Emod Promedio (MPa)
Media	158.33	108.44
Desviación Estándar	44.16	20.02
Valor Mínimo	131.26	72.67
Valor Máximo	209.29	124.67
1er Cuartil	132.84	101.75
Mediana	134.43	116.17
3er Cuartil	171.86	122.08

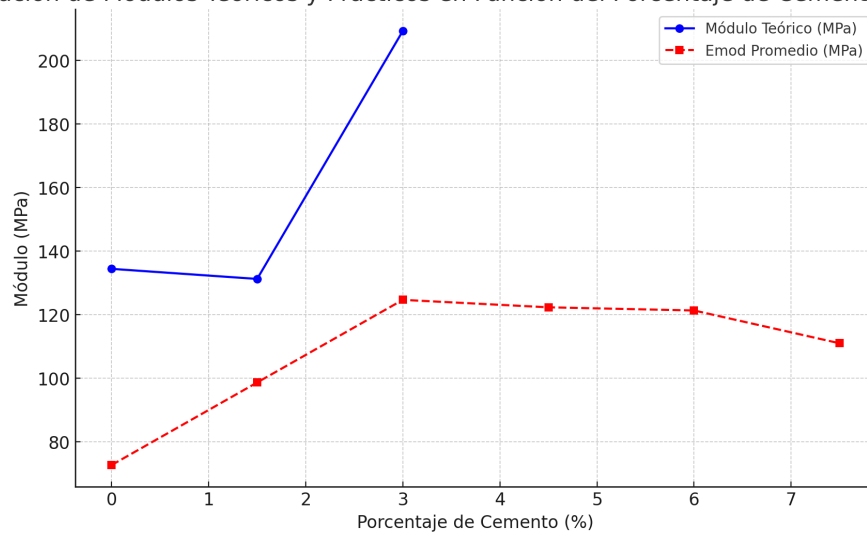
Nota. Elaboración propia.

Cuadro 13*Variación porcentual de los resultados de la base Agreca*

AGRECA		Compresión Sin Confinar	LWD	Variación (%)
No. Muestra	% Cemento	Módulo Teórico (MPa)	Emod Promedio (MPa)	
1	0.00%	134.43	72.67	45.94
2	1.50%	131.26	98.67	24.83
3	3.00%	209.29	124.67	40.43
4	4.50%	-	122.33	N/A
5	6.00%	-	121.33	N/A
6	7.50%	-	111.00	N/A

Nota. Elaboración propia.**Figura 23.***Visualización comparativa de los módulos teóricos y prácticos en función del porcentaje de cemento de la base Agreca*

Comparación de Módulos Teóricos y Prácticos en Función del Porcentaje de Cemento para AGRECA

*Nota.* Elaboración propia.

La correlación entre los módulos teóricos y prácticos para las muestras de Agreca es de aproximadamente **0.85**, lo que indica una correlación positiva fuerte. Esto sugiere que, dentro del rango de datos disponibles, existe una relación significativa entre los valores teóricos y prácticos, lo cual puede reflejar consistencia en la rigidez medida por ambos métodos hasta el 3 % de cemento.

Figura 24.

Gráfico de dispersión de los resultados de la base Agreca



Nota. Elaboración propia.

La ecuación de la regresión lineal es:

$$y = 0.50x + 19.67 \quad (4)$$

donde:

- y = representa el módulo práctico (Emod promedio).
- x = representa el módulo teórico (módulo teórico).

Esta ecuación describe la relación aproximada entre los módulos teóricos y prácticos en el rango de datos disponibles, indicando una correlación positiva fuerte entre ambos conjuntos de datos.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente estudio comparó los módulos obtenidos mediante el Deflectómetro de Impacto Liviano (LWD) y la prueba de compresión sin confinar (UCS) en bases trituradas estabilizadas con cemento, específicamente en las bases La Roca y Agreca. Es importante mencionar que, según el manual del LWD, este equipo no está diseñado para medir módulos en suelos o bases muy rígidas, como aquellas estabilizadas con cemento. Sin embargo, se realizaron las pruebas para evaluar la viabilidad del uso del LWD bajo estas condiciones y observar la precisión de los resultados obtenidos. Los resultados de ambos métodos fueron evaluados con un análisis estadístico que incluyó medidas de tendencia central y dispersión, variación porcentual, correlación de Pearson y regresión lineal simple, lo cual permitió entender las diferencias y patrones de los módulos teóricos y prácticos obtenidos.

A. Comparación entre bases La Roca y Agreca

La comparación entre las bases La Roca y Agreca reveló diferencias notables en el comportamiento mecánico debido a su granulometría. Como se muestra en la Figura 12, la base La Roca no cumplía con la granulometría adecuada, lo que impactó negativamente su capacidad de compactación y afectó su resistencia a la compresión, especialmente en muestras con altos porcentajes de cemento. En contraste, la base Agreca mostró un mejor desempeño al cumplir con una granulometría adecuada, lo que permitió una mejor cohesión y distribución del cemento, y por ende, mayor resistencia a la compresión (ver Figura 13). Esta diferencia en la resistencia se reflejó también en los módulos obtenidos a través del LWD, que mostró una variación significativa entre ambas bases en los niveles de estabilización más altos.

B. Efecto del contenido de cemento en los módulos UCS y LWD

Los módulos obtenidos mediante UCS y LWD en muestras con diferentes porcentajes de cemento (1.5 %, 3 %, 4.5 %, 6 % y 7.5 %) mostraron una tendencia clara: a medida que el contenido de cemento aumentaba, la discrepancia entre ambos métodos se hacía más evidente. En los cuadros de resultados (Cuadro 5 y Cuadro 10), se observa que, a partir de un contenido de cemento de 4.5 %, los módulos obtenidos con el LWD fueron considerablemente menores en comparación con los valores de UCS, reflejando una subestimación de la rigidez por parte del LWD en suelos de mayor rigidez.

Esto puede explicarse en parte por las limitaciones del LWD, que, al estar diseñado para medir en suelos menos rígidos, no logra captar adecuadamente el aumento de rigidez en suelos cementados. En esta investigación, el LWD aplicó en promedio un esfuerzo de 233 kPa, lo que es significativamente inferior al esfuerzo máximo que pueden resistir las muestras altamente estabilizadas. Es por eso que para una comparación equitativa, se consideró únicamente la parte de la gráfica de esfuerzo-deformación de la prueba UCS que era equivalente a los esfuerzos aplicados por el LWD (233 kPa o menos). A pesar de esta corrección, la desviación entre los módulos se amplió conforme aumentaba el contenido de cemento, lo que sugiere que el LWD subestima la rigidez de las bases más rígidas, como era de esperarse por sus limitaciones de diseño (ver Cuadro 7 y Cuadro 15).

C. Limitaciones del LWD en bases estabilizadas

Los resultados obtenidos confirman las limitaciones descritas en el manual del LWD, que advierte su poca precisión en materiales muy rígidos. Las muestras con contenidos altos de cemento (6 % y 7.5 %), los módulos obtenidos por el LWD fueron notablemente inferiores a los medidos por UCS, lo que refleja la incapacidad del LWD para medir adecuadamente en suelos con alta rigidez. Esto es especialmente crítico en ambas bases, donde la estabilización con cemento resultó en una resistencia y rigidez mucho mayor que la captada por el LWD. En las muestras con menores porcentajes de estabilización (1.5 % y 3 %), los resultados del LWD estuvieron más alineados con los obtenidos en la prueba UCS, aunque aún presentaron discrepancias menores. Esto sugiere que el LWD puede ser útil para caracterizar suelos con estabilizaciones ligeras y suelos con una rigidez moderada, pero pierde precisión a medida que la rigidez y el contenido de cemento aumentan.

D. Análisis estadístico de los resultados

Para evaluar de manera más rigurosa la relación entre los módulos de rigidez obtenidos por UCS y LWD, se aplicó un análisis estadístico. Las medidas de tendencia central y dispersión reflejaron que los módulos obtenidos por UCS fueron consistentemente mayores que los obtenidos por LWD, especialmente en muestras con altos contenidos de cemento. Por ejemplo, la media de los módulos teóricos en la base La Roca fue de 165.95 MPa en UCS frente a 101.67 MPa en LWD, lo que indica una clara subestimación del LWD en suelos rígidos. La variación porcentual también mostró una tendencia creciente de discrepancia conforme aumentaba el contenido de cemento, en particular en la base Agreca, donde los niveles más altos de cemento resultaron en diferencias superiores al 50 % entre los métodos UCS y LWD. Esto se refuerza con los resultados de la correlación de Pearson, donde se obtuvo un coeficiente bajo en La Roca (0.25) y uno más alto en Agreca (0.85), sugiriendo que el LWD puede ofrecer estimaciones razonables en suelos menos rígidos. La regresión lineal también mostró una pendiente baja en La Roca, mientras que en Agreca la pendiente fue de 0.50, lo que reafirma la relación limitada entre los módulos en suelos de alta rigidez.

E. Conclusión preliminar

La integración de estos resultados confirma que, aunque el LWD es una herramienta útil para estimaciones rápidas en suelos menos rígidos o con bajo contenido de estabilización, no es adecuado para evaluar la rigidez en bases altamente estabilizadas, como aquellas con contenido de cemento superior al 4.5 %. Los módulos obtenidos por el LWD subestimaron significativamente la rigidez en estas muestras, por lo que el UCS sigue siendo el método recomendado para obtener mediciones más precisas del módulo elástico en este tipo de materiales.

Este estudio contribuye con información importante para la ingeniería vial en Guatemala, señalando que el LWD puede ser una herramienta útil para ciertos casos, pero se recomienda su uso complementario con el UCS para asegurar una evaluación completa y precisa de las propiedades mecánicas del material en condiciones de alta rigidez.

IX. CONCLUSIONES

La investigación comparó los módulos obtenidos mediante el uso del *Light Weight Deflectometer* (LWD) y los módulos calculados a partir de la curva de deformación-esfuerzo en la prueba de compresión simple sin confinamiento (UCS) en bases de pavimento estabilizadas con diferentes porcentajes de cemento. Las conclusiones principales de este estudio son las siguientes:

- Los resultados confirmaron que el LWD no es adecuado para medir módulos en suelos de alta rigidez, conforme a las especificaciones del fabricante y los datos obtenidos en los ensayos. En particular, cuando el porcentaje de cemento superó el 4.5 %, los módulos medidos por el LWD mostraron una discrepancia considerable en comparación con los valores de UCS. Esta divergencia se atribuye al esfuerzo promedio de 233 kPa que se aplicó con el LWD, insuficiente para captar la rigidez de bases con alto contenido de cemento.
- La base de Agreca, que cumplía con los criterios granulométricos, mostró mejores propiedades mecánicas en comparación con la base de La Roca, que no cumplía con estos requisitos. Los resultados del UCS y del LWD indicaron que la granulometría adecuada contribuye a una mayor resistencia y cohesión del material estabilizado. En el Cuadro 10, se observa que la base Agreca alcanzó valores superiores de módulo elástico y resistencia a la compresión, lo cual enfatiza la importancia de cumplir con especificaciones granulométricas en bases estabilizadas.
- El aumento en el contenido de cemento resultó en una mejora sustancial en la rigidez y resistencia de ambas bases, según los datos del ensayo UCS. Sin embargo, el LWD no reflejó esta tendencia de forma consistente en muestras con altos porcentajes de cemento. En las bases estabilizadas con hasta un 3 % de cemento, los módulos obtenidos por el LWD y el UCS mostraron una relación cercana. A medida que el cemento aumentó, el LWD comenzó a subestimar los módulos debido a sus limitaciones técnicas.

- A pesar de sus limitaciones en suelos rígidos, el LWD sigue siendo una herramienta útil para la medición rápida de módulos en suelos y bases que no han alcanzado altos niveles de rigidez, como en el caso de materiales sin estabilizar o con bajas dosis de estabilización con cemento (hasta 3 %). En este contexto, el LWD no solo permite obtener mediciones prácticas y eficientes en campo, sino que también ofrece una alta repetitividad en las mediciones, lo cual es crucial para garantizar la consistencia y fiabilidad en el control de calidad de pavimentos. Sin embargo, su uso debe considerar la naturaleza del material evaluado, ya que en bases muy estabilizadas su aplicabilidad es limitada y puede requerirse el complemento de otros métodos para obtener una evaluación más precisa.
- Los hallazgos subrayan la importancia de seleccionar materiales que cumplan con los requisitos granulométricos, especialmente en bases estabilizadas. La base de Agreca mostró un rendimiento superior al cumplir estas especificaciones, a diferencia de La Roca. Esto respalda la necesidad de emplear materiales con una distribución de tamaño de partículas que favorezca la compactación y resistencia, como se muestra en el Cuadro 13, donde la base Agreca alcanzó valores más altos de módulo elástico y resistencia.
- El análisis estadístico evidenció que la discrepancia entre los módulos medidos por LWD y UCS aumenta con el contenido de cemento, especialmente en la base Agreca. La correlación de Pearson y la regresión lineal confirmaron que el LWD tiene mayor precisión en suelos de menor rigidez y subestima los módulos en materiales más rígidos, reforzando la necesidad de métodos complementarios en bases altamente estabilizadas.

La investigación evidencia que, aunque el LWD es una herramienta útil y eficiente para medir módulos en suelos con rigidez moderada, su aplicabilidad en suelos de alta rigidez está limitada. Para bases estabilizadas con altos contenidos de cemento, el UCS sigue siendo una opción más precisa para caracterizar la rigidez y resistencia del material. Los datos proporcionados en este estudio son relevantes para mejorar el control de calidad en pavimentos, especialmente en el contexto de la infraestructura vial guatemalteca, donde las condiciones del suelo y la selección de materiales impactan directamente en la durabilidad y el desempeño de las bases estabilizadas.

X. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos, se recomiendan las siguientes acciones para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en proyectos viales:

- Optimizar el uso del LWD en proyectos viales de Guatemala: Dado que el LWD es más preciso en suelos sin estabilización o con bajos niveles de cemento (hasta un 3 %), se recomienda su uso en estos contextos para obtener mediciones rápidas y prácticas en campo. Para suelos con altos contenidos de cemento, el LWD puede subestimar los módulos de rigidez; en estos casos, métodos como el UCS resultan más adecuados para una evaluación precisa..
- Asegurar el cumplimiento de especificaciones granulométricas en materiales base: La selección de materiales que cumplan con las especificaciones granulométricas es esencial para optimizar la respuesta mecánica de las bases estabilizadas. Una distribución granulométrica adecuada facilita una mayor cohesión y capacidad de carga tras la estabilización, mejorando la durabilidad del pavimento.
- Realizar estudios adicionales sobre técnicas de estabilización: Es recomendable realizar estudios que exploren la relación entre diferentes técnicas y dosis de estabilización con el desempeño mecánico a largo plazo de los pavimentos, especialmente en suelos con características no ideales. Estos estudios contribuirían a la optimización de las dosis de estabilización en función de las propiedades específicas de cada material base.
- Implementar un enfoque complementario en la caracterización de rigidez: Para bases de alta rigidez, se sugiere emplear una combinación de LWD y UCS para obtener una evaluación más completa de la rigidez. Este enfoque híbrido permitirá optimizar la precisión de las mediciones y la eficiencia en proyectos de pavimentación.

Este estudio proporciona una base sólida para la evaluación de la viabilidad del LWD y la estabilización con cemento en bases trituradas, contribuyendo al entendimiento de sus aplicaciones en proyectos viales en Guatemala.

XI. REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993 [Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento 1993]*. AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2013). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures [Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento]*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). *Moisture-Density Relations of Soils Using a 5.5-lb Rammer and a 12-in. Drop (T99) [Relación humedad-densidad de suelos utilizando un martinete de 5.5 lb y caída de 12 pulgadas (T99)]*. AASHTO.
- American Society for Testing and Materials. (2009). *Standard Test Method for Deflections with a Falling Weight Deflectometer (FWD) (D4694) [Método de ensayo estándar para deflexiones con deflectómetro de peso rodante (FWD) (D4694)]*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (D1557) [Métodos de ensayo estándar para las características de compactación de suelos en laboratorio usando esfuerzo modificado (D1557)]*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (D2166) [Método de ensayo estándar para la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos (D2166)]*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2017a). *Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD) (E2583) [Método de ensayo estándar para medir deflexiones con un deflectómetro liviano (LWD) (E2583)]*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2017b). *Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders (D1633) [Métodos de ensayo estándar para la resistencia a la compresión de cilindros de suelo-cemento moldeados (D1633)]*. ASTM International.
- Asphalt Institute. (2007). *The Asphalt Handbook [Manual del asfalto] (7th)*.
- Bardasano Gonzales, R. (2014). El origen del deflectómetro de impacto. <https://es.scribd.com/embeds/542145073/content>
- Bolaños, J. (2015). *Evaluación de la resistencia a la compresión de bases estabilizadas con cemento en proyectos viales*.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design [Análisis y diseño de cimentaciones] (5th)*. McGraw-Hill.
- Chua, S. C., & Wheeler, R. D. (2007). Evaluation of soil modulus using portable light weight deflectometer [Evaluación del módulo del suelo utilizando deflectómetro portátil de peso ligero]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 160(1), 49-54. <https://doi.org/10.1680/geng.2007.160.1.49>

- Crespo Villalaz, C. (2004). *Vías de Comunicación: Caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos*. Editorial Limusa, S.A.
- Das, B. M. (2013). *Principles of Geotechnical Engineering [Principios de ingeniería geotécnica]* (8th). Cengage Learning.
- Dirección General de Caminos. (2001). *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Ingenieros Consultores de Centroamérica, S. A.
- Dirección General de Caminos. (2020). *Plan de Recuperación de la Red Vial Nacional*. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda.
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied Regression Analysis [Análisis de regresión aplicado]* (3rd). Wiley.
- Dynatest. (2021). DYNATEST 3032 LWD Light Weight Deflectometer - Owner's Manual Version 1.0.6 [Deflectómetro de impacto liviano DYNATEST 3032 - Manual del propietario Versión 1.0.6]. <https://www.dynatestlatam.com/wpcontent/uploads/2022/09/1110300-LWD-3032-Manual.pdf>
- Dynatest. (2022). Deflectómetro de impacto liviano (LWD). <https://www.dynatestlatam.com/equipment-structural/deflectometrode-impacto-liviano-2/>
- Dynatest. (2023). LWD Light Weight Deflectometer [Deflectómetro de impacto liviano LWD]. <https://dynatest.com/equipment/light-weight-deflectometer/>
- Escobar, L. M., Vasquez, L. G., & Gaviria, J. M. (2012). Diseño de pavimento flexible y rígido. *Armenia: Universidad del Quindío*.
- Flintsch, G., Katicha, S., Bryce, J., Ferne, B., Nell, S., & Diefenderfer, B. (2013). *Assessment of continuous pavement deflection measuring technologies [Evaluación de tecnologías de medición continua de deflexión de pavimentos]* (inf. téc. N.º SHRP 2 Report S2-R06F-RW-1). Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/22766>
- Gowthaman, S., Hayashi, S., & Nakajima, K. (2020). Meso- and macro-scale analysis of shear modulus in stabilized soils under unconfined compressive tests [Análisis a escala meso y macro del módulo de corte en suelos estabilizados bajo pruebas de compresión no confinada]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(2), 358-367. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.01.001>
- Head, K. H., & Epps, R. J. (2011). *Manual of Soil Laboratory Testing [Manual de ensayos de laboratorio de suelos]* (Vol. 2). Whittles Publishing.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design [Análisis y diseño de pavimentos]* (2nd). Pearson Education.
- International, A. (2015). *Standard test method for measuring deflections using a portable impulse plate load test device (ASTM E2835-11) [Método de ensayo estándar para medir deflexiones usando un dispositivo portátil de carga por placa de impulso]*.
- Jiménez, R., & Rodríguez, L. (2019). Impacto de la Estabilización de Suelos en Carreteras Rurales de Guatemala. *Ingeniería y Sociedad*, 7(1), 34-45.

- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., & Neter, J. (2004). *Applied Linear Regression Models [Modelos de regresión lineal aplicada]* (4th). McGraw-Hill Irwin.
- Little, D. N., & Nair, S. (2009). *Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials [Práctica recomendada para la estabilización de suelos de subrasante y materiales de base]*. Transportation Research Board.
- Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda. (s.f.). *Objetivos detallados por unidad ejecutora*. Gobierno de Guatemala.
- Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda. (2018). *Reformulación y actualización del Plan de Desarrollo Vial 2018-2032*.
- Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. (2020). *Manual de Carreteras para Guatemala*.
- Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda. (2025). *Plan Operativo Anual 2025*. Gobierno de la República de Guatemala.
- Monismith, C. L., & Epps, J. (s.f.). *Pavement Analysis and Design [Análisis y diseño de pavimentos]*.
- Mukaka, M. M. (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research [Guía para el uso adecuado del coeficiente de correlación en la investigación médica]. *Malawi Medical Journal*, 24(3), 69-71. <https://doi.org/10.4314/mmj.v24i3.84633>
- Muniandy, R., & Huat, B. B. K. (2006). Evaluation of modulus of elasticity and compressive strength relationship for high performance concrete [Evaluación de la relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión para concreto de alto rendimiento]. *Journal of Applied Sciences*, 6(3), 448-453. <https://doi.org/10.3923/jas.2006.448.453>
- Oblitas-Gastelo, B. E., Medina-Cardozo, I. I., & Paredes-Asalde, C. R. (2021). Índice de regularidad internacional e índice de condición de pavimento para definir niveles de serviciabilidad de pavimentos. *Iteckne*, 18(2), 170-175.
- Petry, T. M., & Little, D. N. (2002). Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures [Revisión de la estabilización de arcillas y suelos expansivos en pavimentos y estructuras con cargas ligeras]. *Transportation Research Record*, 1809(1), 44-53. <https://doi.org/10.3141/1809-06>
- Pincay, A. (s.f.). Proceso de producción de mezcla asfáltica [Obtenido de ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS: <https://cementoyasfalto.wordpress.com/>].
- Portland Cement Association. (2016). *Design and Control of Concrete Mixtures [Diseño y control de mezclas de concreto]* (16th).
- Rodgers, J. L., & Nicewander, W. A. (1988). Thirteen ways to look at the correlation coefficient [Trece formas de analizar el coeficiente de correlación]. *The American Statistician*, 42(1), 59-66. <https://doi.org/10.1080/00031305.1988.10475524>
- Rubio Haasler, M. R. (2012). *Utilización del falling weight deflectometer, FWD (Deflectómetro de Impacto) en el diseño del reforzamiento de pavimentos flexibles de carreteras en Guatemala*.

- la y su complementación con otros métodos tradicionales*. [Tesis doctoral, Universidad del Valle de Guatemala].
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation [Coeficientes de correlación: uso adecuado e interpretación]. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Sebaaly, P. E., El-Basyouny, K., Baker, R., Al-Mansour, A., & Al-Qadi, I. (2015). A Study of the Effect of Different Stabilizing Agents on the Strength of Cement-Stabilized Soils [Estudio del efecto de diferentes agentes estabilizantes sobre la resistencia de suelos estabilizados con cemento]. *Transportation Research Record*, 2485, 25-32. <https://doi.org/10.3141/2485-04>
- Terratest. (2023). Terratest LWD Light Weight Deflectometer - Terratest 9000 LWD [Deflectómetro de impacto liviano Terratest 9000 LWD]. <https://Terratestlwd.com/PDF/Deflect%C3%B3metro%20de%20impacto%20liviano%20-%20Light%20Weight%20Deflectometer%20-%20Español%20Terratest%209000%20LWD.pdf>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice [Mecánica de suelos en la práctica de la ingeniería]* (3rd). John Wiley & Sons.
- Unidad Ejecutora de Conservación Vial. (2024). *Especificaciones técnicas 2024*.
- Urrutia, D. (2018). Light Weight Deflectometer | Dynatest [Deflectómetro de impacto liviano | Dynatest]. https://issuu.com/dariourrutia/docs/deflectometro_lwd3031
- Vargas, G. B. (2010). Aspectos y consideraciones importantes en el cálculo del índice de regularidad internacional (IRI). *Ingeniería*, 20(1-2), 155-168.
- Vásquez Varela, L. R. (2002). Pavement Condition Index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Zhang, L., & Zhao, C. (2013). An investigation into modulus of elasticity prediction in pavement materials [Una investigación sobre la predicción del módulo de elasticidad en materiales de pavimento]. *Construction and Building Materials*, 47, 743-749. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.015>

XII. ANEXOS

En la presente sección se incluyen los resultados complementarios obtenidos durante el desarrollo experimental del estudio. El primer cuadro corresponde a un cuadro con los resultados detallados del ensayo realizado mediante deflectómetro de impacto tipo Light Weight Deflectometer (LWD) sobre una base estabilizada con cemento proveniente de La Roca. Este cuadro resume las mediciones de deflexión superficial obtenidas bajo condiciones controladas, permitiendo evaluar la capacidad estructural del material tratado y su respuesta frente a cargas dinámicas simuladas.

■ Anexo 1

Cuadro 14

Resultados detallados del ensayo con deflectómetro de impacto liviano (LWD) para base La Roca

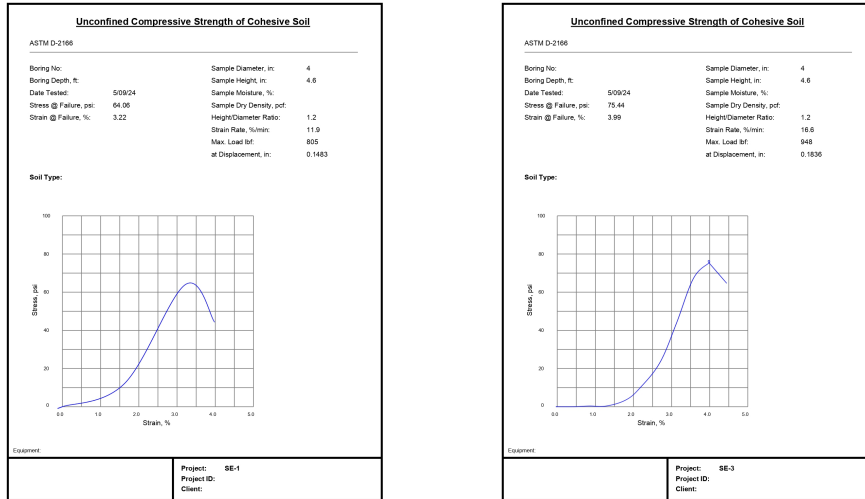
File:	Base La Roca									
Point No.	Location	Drop	Time	Radius mm	Load kN	Stress kPa	Pulse W. ms	Def. 1 Micron	Eo MPa	Energy Joule
1	Roca Sin Est	1	04:47:39	75	4	226	25.5	447	67	0.768
		2	04:47:49	75	4.1	231	25.5	366	83	0.471
		3	04:47:58	75	4.1	230	25.75	364	83	0.48
		4	04:48:06	75	4.1	229	25.5	354	85	0.451
2	La Roca 1.5	1	04:53:33	75	4.1	229	25.5	309	98	0.311
		2	04:54:08	75	4.1	232	25.25	283	108	0.217
		3	04:54:16	75	4.1	234	25.25	290	106	0.236
		4	04:54:23	75	4.1	232	25.25	291	105	0.227
3	La Roca 3.0	1	04:59:44	75	4.1	232	25.5	238	128	0.203
		2	04:59:52	75	4.1	232	25.75	238	128	0.199
		3	05:00:00	75	4.1	232	25.5	237	129	0.197
		4	05:00:07	75	4.1	233	25.25	235	131	0.182
4	La Roca 4.5	1	05:05:58	75	4.1	230	25.5	323	94	0.405
		2	05:06:08	75	4.1	233	25.75	295	104	0.282
		3	05:06:16	75	4.1	233	26	292	105	0.257
		4	05:06:24	75	4.1	235	26	287	108	0.263
5	La Roca 6.0	1	05:13:52	75	4.1	234	26.5	442	70	0.965
		2	05:14:04	75	4.1	232	25.75	396	77	0.593
		3	05:14:12	75	4.1	230	25	383	79	0.586
		4	05:14:20	75	4.1	232	25.5	382	80	0.545
6	La Roca 7.5	1	05:20:25	75	4.1	234	25.5	259	119	0.211
		2	05:20:35	75	4.2	235	25.5	262	118	0.207
		3	05:20:45	75	4.1	234	25.5	259	119	0.195
		4	05:20:53	75	4.2	238	25.25	269	116	0.238

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del ensayo compresión sin confinar, aplicado a las muestras de la base La Roca.

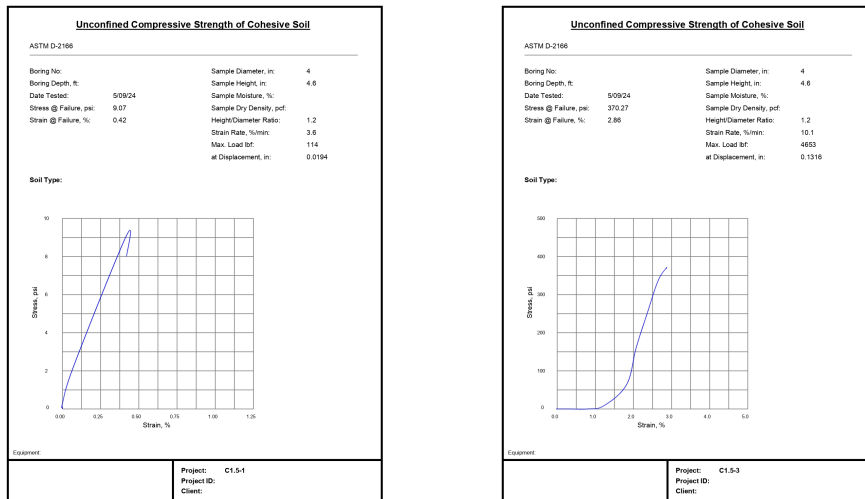
■ Anexo 2

Figura 25.
Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base La Roca (sin estabilizar)



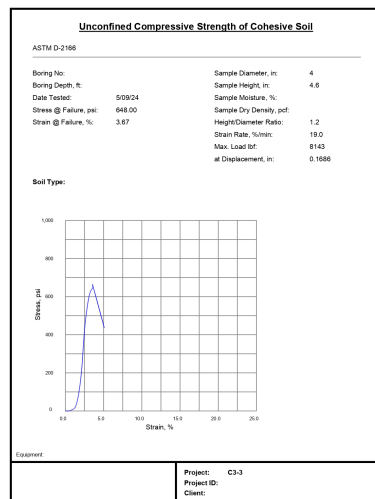
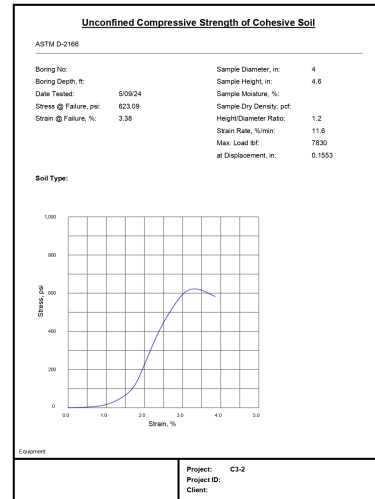
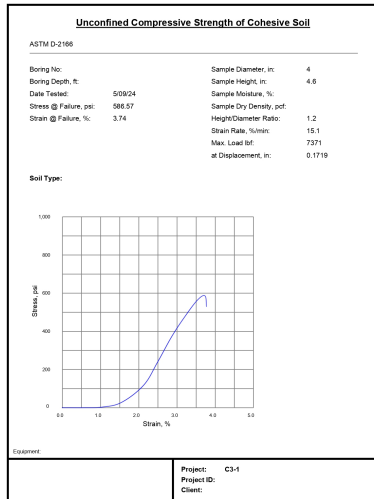
Nota. Elaboración propia.

Figura 26.
Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base La Roca (1.5 % de cemento)



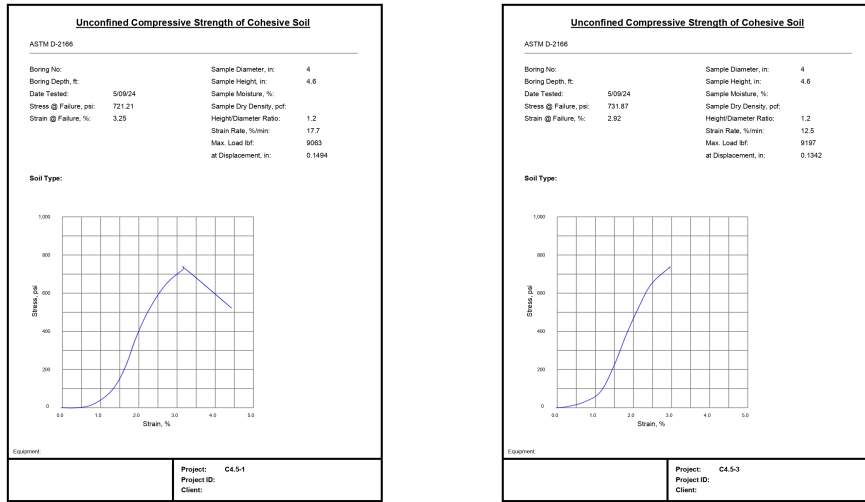
Nota. Elaboración propia.

Figura 27.
Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base La Roca (3 % de cemento)



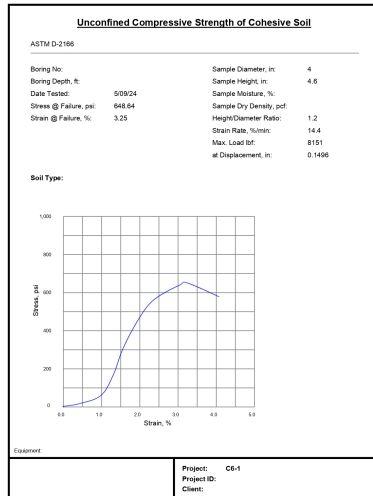
Nota. Elaboración propia.

Figura 28.
Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base La Roca (4.5 % de cemento)



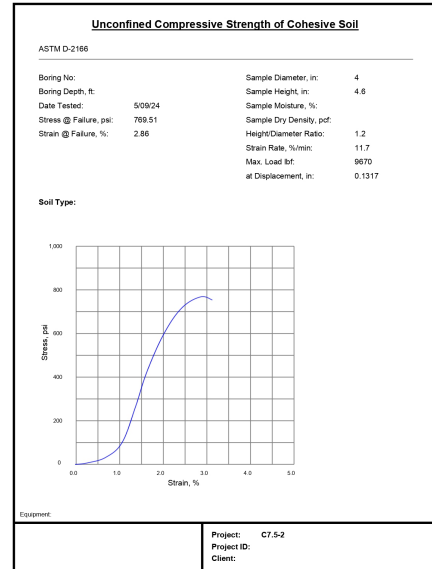
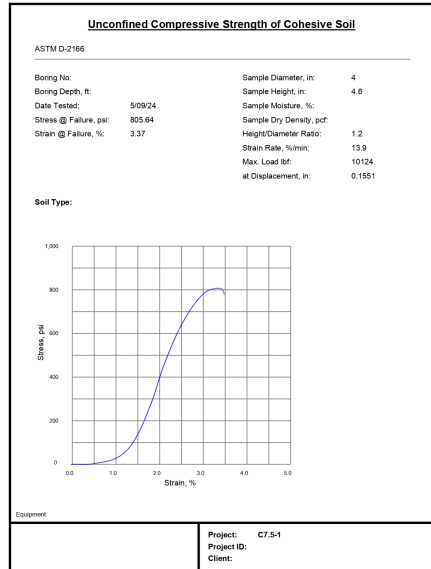
Nota. Elaboración propia.

Figura 29.
Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base La Roca (6 % de cemento)



Nota. Elaboración propia.

Figura 30.
Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base La Roca (7.5 % de cemento)



Nota. Elaboración propia.

En el siguiente cuadro se detallan los resultados obtenidos mediante el ensayo con deflectómetro de impacto liviano (LWD) aplicado a la base estabilizada con cemento, Agreca.

■ Anexo 3

Cuadro 15

Resultados detallados del ensayo con deflectómetro de impacto liviano (LWD) para base Agreca

File:	Base Agreca									
Point No.	Location	Drop	Time	Radius mm	Load kN	Stress kPa	Pulse W. ms	Def. 1 Micron	Eo MPa	Energy Joule
1	Agreca Sin Est	1	05:37:51	75	4	229	26	510	59	1.001
		2	05:37:58	75	4.1	231	26	422	72	0.728
		3	05:38:09	75	4	228	26	410	73	0.792
		4	05:38:17	75	4	229	26.25	412	73	0.758
2	Agreca 1.5	1	05:43:17	75	4	229	25.5	525	57	1.165
		2	05:43:24	75	4.1	234	25	326	94	0.422
		3	05:43:31	75	4.1	233	25.5	310	99	0.378
		4	05:43:38	75	4.2	236	25.25	300	103	0.341
3	Agreca 3.0	1	05:47:26	75	4.1	231	25.25	454	67	0.832
		2	05:47:33	75	4.1	235	25.25	266	116	0.298
		3	05:47:40	75	4.2	237	25.25	254	123	0.248
		4	05:47:46	75	4.2	236	25.25	236	132	0.19
		5	05:47:55	75	4.2	235	25.5	259	119	0.276
4	Agreca 4.5	1	05:54:55	75	4.1	234	25	284	109	0.324
		2	05:55:01	75	4.2	235	25	260	119	0.295
		3	05:55:08	75	4.1	234	25.5	271	114	0.332
		4	05:55:15	75	4.2	237	25.25	252	124	0.274
		5	05:55:21	75	4.2	236	25.25	251	124	0.256
5	Agreca 6.0	1	06:01:35	75	4.2	235	25.25	270	115	0.294
		2	06:01:41	75	4.2	237	25	257	121	0.23
		3	06:01:49	75	4.2	238	25.5	264	119	0.224
		4	06:01:56	75	4.2	236	25.25	257	121	0.241
		5	06:02:04	75	4.2	237	25.25	252	124	0.208
6	Agreca 7.5	1	06:11:01	75	4.2	235	25	278	111	0.256
		2	06:11:08	75	4.1	234	25	274	112	0.267
		3	06:11:15	75	4.1	234	25	276	112	0.261
		4	06:11:21	75	4.2	236	25	279	111	0.271
		5	06:11:28	75	4.1	234	25	280	110	0.279

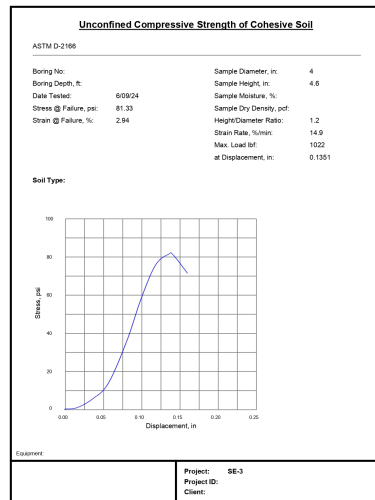
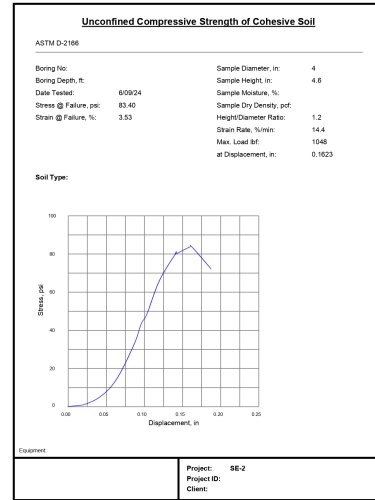
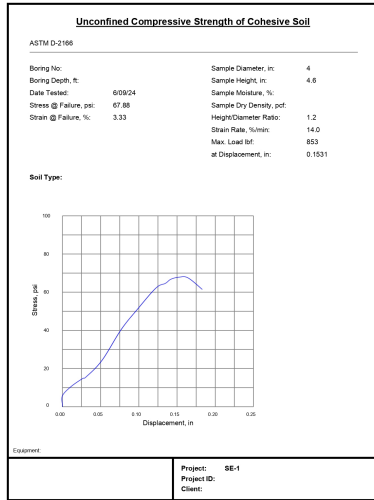
Nota. Elaboración propia.

Finalmente, las siguientes figuras presentan los resultados del ensayo de compresión sin confinar realizados sobre muestras de la base estabilizada con cemento, Agreca.

■ Anexo 4

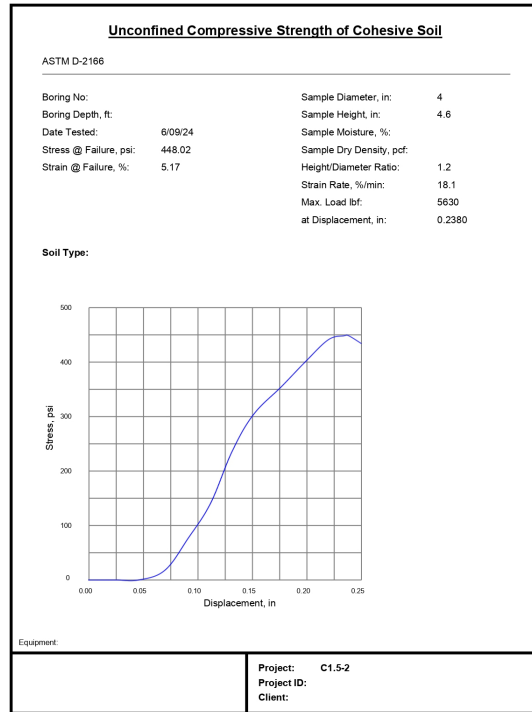
Figura 31.

Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base Agreca (sin estabilizar)



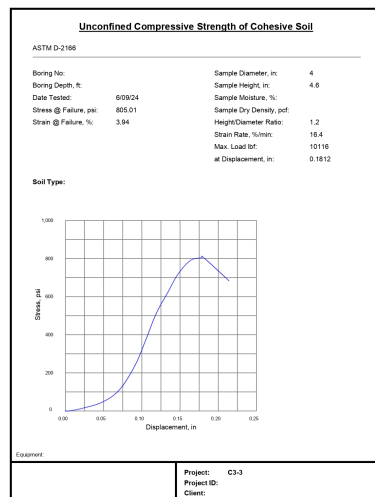
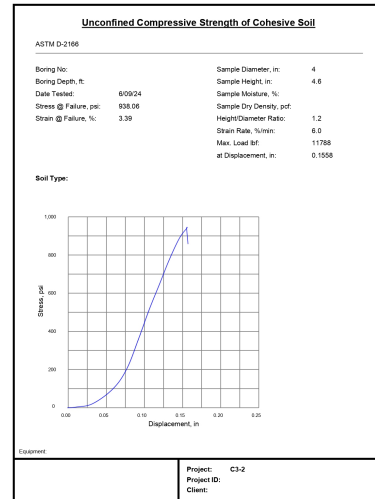
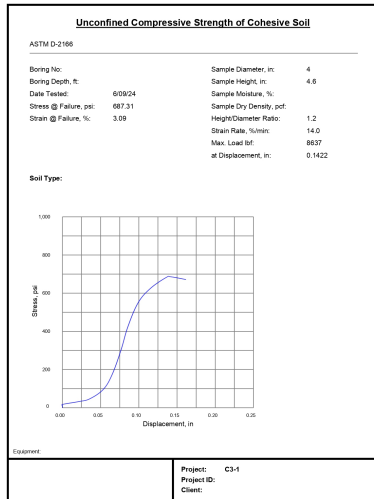
Nota. Elaboración propia.

Figura 32.
Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base Agreca (1.5 % de cemento)



Nota. Elaboración propia.

Figura 33.
Resultados del ensayo compresión sin confinar (UCS) para base Agreca (3 % de cemento)



Nota. Elaboración propia.