



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE
INGENIERÍA (PUEI)**

**EVALUACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EN
SUELOS Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LAS
CAPAS GRANULARES DE LA ESTRUCTURA DE LOS
PAVIMENTOS CON EL USO DEL DEFLECTOMETRO
DE IMPACTO**

T E S I N A

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ESPECIALISTA EN
VÍAS TERRESTRES**

P R E S E N T A:

ING. JUAN CAMILO BUSTAMANTE VEGA

**DIRECTOR DE TESINA:
ING. MANUEL ZARATE AQUINO
Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 2023**



DEDICATORIA

A mí,

Quiero dedicarme este trabajo a mí mismo, con el ánimo de felicitarme por el arduo camino recorrido hasta el día de hoy, por la superación de cada uno de los desafíos y cada uno de los sacrificios que he tenido que afrontar para lograr llegar a donde estoy hoy.

Esta tesina es la demostración del deseo de superación y de compromiso con el conocimiento. Veo en ella reflejada mi capacidad de enfrentar desafíos, la valentía para explorar nuevas experiencias y la constancia que me ha llevado a alcanzar un nuevo logro.

Que esta dedicatoria sea un recordatorio más de que soy capaz de alcanzar grandes logros y de que la pasión por la superación personal propia es el motor más poderoso con el cual seguiré construyendo un futuro brillante.

A mi fuerza interior, a mi perseverancia inquebrantable y a mi capacidad de superar obstáculos.

Porque me lo merezco...

AGRADECIMIENTO

No solo por este momento, sino por estar presentes durante toda esta aventura que estoy concluyendo con este trabajo. Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a cada uno de ustedes por su inmenso apoyo, amor incondicional y constante inspiración durante esta locura.

Julio y Clemencia, queridos padres; agradezco por su inquebrantable apoyo y palabras constantes de aliento han sido la base sobre la cual he construido cada logro. Su sabiduría, paciencia y dedicación han sido mi fuente de fortaleza. Gracias por creer en mí, por motivarme a dar lo mejor de mí mismo y por ser mi ejemplo de perseverancia y determinación. Espero se sientan muy orgullosos de la familia tan linda que han construido.

Pipe y Yeyo, mis hermanitos; su respaldo incondicional y ánimo contagioso han sido un faro en los momentos desafiantes. Su compañía, ahora desde la distancia, y complicidad han enriquecido mi vida de innumerables maneras. Agradezco la forma en que siempre han estado a mi lado, infundiéndome valor y alegría en todo momento. Quiero ser ejemplo para ustedes.

La señora Carlina, esa mujer que ha sido el motor de mi vida, mi abuelita linda. Su amor incondicional ha sido un regalo invaluable en mi vida. Sus palabras de aliento y su ejemplo de bondad han dejado una marca gigante en mi corazón. Agradezco sinceramente el cariño y la comprensión que siempre me brinda.

Viviana; el amor que me brindas, tu ánimo constante y gran apoyo han iluminado mi camino a lo largo de esta aventura. Desde el primer día, tu cariño ha sido mi más grande fuerza. La coincidencia más linda.

Por último, al hombre que con su ejemplo forjó mucho de la persona que soy hoy en día. Para don Pachito no tengo más que un profundo sentimiento de admiración y gratitud. Cuanto me gustaría que aun estuviera conmigo. Mi ángel de la guarda, mi abuelito.

Con todo mi cariño y gratitud, por y para ellos.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
OBJETIVOS Y ENFOQUE	9
Objetivo general.	9
Objetivos Específicos.	9
CAPITULO UNO	10
DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO, USOS Y APLICACIÓN.	10
1.1. DEFLECTOMETRÍA Y DEFLECTÓMETRO	10
1.2. CLASIFICACIÓN SEGÚN SUS NIVELES DE APLICACIÓN	11
• Deflectómetro de Impacto Convencional – FWD (Falling Weigh Deflectometer)	11
• Deflectómetro Liviano – LWD (Light Weigh Deflectometer).....	13
• Deflectómetro Pesado – HWD (Heavy Weigh Deflectometer)	14
1.3. OPERACIÓN DEL EQUIPO.....	15
1.3.1. SISTEMA MECÁNICO	17
1.3.2. SISTEMA DE MEDICIÓN	18
1.3.3. SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE DATOS	19
1.4. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA TOMA DE DATOS.....	20
CAPITULO DOS	22
GENERALIDADES DE LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL.....	22
2.1. MÓDULO RESILIENTE	22
2.2. MÓDULO ELÁSTICO.....	23
2.3. NÚMERO ESTRUCTURAL.....	25
2.4. COMPACTACIÓN PROCTOR	27
2.5. PORCENTAJE DE HUMEDAD	31
2.6. CBR – CALIFORNIA BEARING RATIO	32
CAPÍTULO TRES	35
MÉTODOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL	35

3.1.	EXPLORACIONES	36
3.2.	CARGA ESTÁTICA.....	38
3.3.	VIBRACIONES	44
3.4.	IMPACTO.....	45
3.5.	DENSIMETRO NUCLEAR	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO CUATRO.....		48
DEFLEXIÓN COMO PARÁMETRO DE EVALUACIÓN.....		48
4.1.	MÉTODO DE ANALISIS A PARTIR DE DATOS DE DEFLEXIÓN	48
4.2.	RELACIÓN CARGA – DEFLEXIÓN - TIEMPO.....	51
4.3.	CUENCA DE LA DEFLEXIÓN COMO PARÁMETRO DE MEDICIÓN.....	53
CAPÍTULO CINCO		58
ESTIMACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS CAPAS PARA DETERMINAR ÍNDICES DE CALIDAD, NORMALIZADOS ACTUALMENTE.		58
5.1.	MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE	58
5.2.	MÓDULO ELÁSTICO.....	61
5.3.	NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO.....	62
5.4.	ANÁLISIS DE SERVICIO.....	63
5.5.	ESPESOR DE LA SOBRECARPETA.....	64
5.6.	VIDA RESIDUAL DEL PAVIMENTO.....	65
CAPÍTULO SEIS.....		66
ESTIMACIÓN PARA DETERMINAR CBR – CALIFORNIA BEARING RATIO MEDIANTE CORRELACIONES BASADAS EN MEDIDAS DE DEFLECTOMETRÍA.		66
6.1.	ESTIMACIÓN DEL CBR – CALIFORNIA BEARING RATIO.....	66
CAPÍTULO SIETE.....		71
COMPARACIÓN DEL DEFLECTOMETRO DE IMPACTO Y DEL DENSIMETRO NUCLEAR, ALTERNATIVA DE USO.....		71
7.1.	DENSIMETRO NUCLEAR.....	71
7.2.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS COMPARATIVAS.....	73

7.3. ALTERNATIVA QUE PRESENTA EL USO DEL DEFLECTOMETRO DE IMPACTO FRENTE AL USO DEL DENSIMETRO NUCLEAR	75
CONCLUSIONES	83
BIBLIOGRAFÍA.....	85

INTRODUCCIÓN

Podemos afirmar que la red terrestre es un elemento clave para el desarrollo de un país, ya sea para movilidad, logística, transporte, turismo o producción. Su falta de buena calidad perjudica la economía, la cultura y el comportamiento social de una nación de una forma directa. Por eso es importante tener un cuidado especial con la infraestructura terrestre para asegurar su propiedad y que no se deteriore. Esto toma vital importancia al tratarse de un país en vía de desarrollo, donde es necesario contar con esta infraestructura para el surgimiento de la economía propia.

Creo que para enfrentar este tema, tenemos que partir de la concepción de que las vías terrestres son parte de un servicio que se pone a disposición de la humanidad, en cada uno de los ámbitos en el que los usuarios se hagan partícipes del mismo, pero de la misma manera se debe tener en cuenta que es un activo físico y tangible, al cual se le hace una gran inversión de dinero para obtener como resultado final una infraestructura, con características óptimas para presentar unas características propias de un buen funcionamiento y una correcta operación.

Luego de esta retahíla, hay que mencionar que ese buen funcionamiento y esa correcta operación, de la cual se hace mención, va de la mano proporcionalmente, al buen estado físico de la vía con la cual se garantiza un alto nivel de calidad, de cada una de las magnitudes, que representa economía, seguridad y comodidad para cada uno de los actores involucrados en la planeación de una vía.

De esta manera, la existencia de vías terrestres como autopistas, calles, carreteras, caminos, ferrocarriles, plataformas y pistas de aterrizaje, etc., son una condición indispensable para el correcto funcionamiento de un país. Esta infraestructura conformada por carpetas de suelo y materiales pétreos nos permiten llevar la calidad de vida a nuestras ciudades a través de la facilidad para desplazarse. Es donde se debe resaltar y hacer mucho más visible la importancia del concepto 'Pavimento'.

Implícito a lo anterior, desde la visual de desarrollo económico, deja de ser un tema local para convertirse en un tema globalizado que, a su vez, también tiene implícitos temas de modernización para moverse a la misma velocidad de los demás sectores de la economía. Principalmente, uno que nos toca hoy en día a todos, la tecnología aplicada.

Ahora, con todo esto en mente, me gustaría incluir como concepto el objetivo del ser humano siempre encaminado a encontrar el estado del arte en cada una de las situaciones a las que se

enfrenta; por el simple hecho de evolucionar y mejorar, siempre estamos en búsqueda y consecución de objetivos en pro de la mejoría.

La evaluación estructural de pavimentos es un aspecto crucial para garantizar la eficiencia y seguridad de las infraestructuras viales. La búsqueda del estado del arte en este campo revela múltiples avances en las técnicas y tecnologías utilizadas para llevar a cabo esta evaluación, incluyendo el uso de técnicas como la deflectometría y otros métodos de evaluación no destructiva.

Uno de los avances más significativos en la evaluación de la estructura de pavimentos se ha centrado en el desarrollo de herramientas y técnicas para mejorar la precisión de la evaluación. El deflectómetro de impacto, en particular, ha experimentado avances sustanciales en términos de precisión en la adquisición de datos, lo que ha mejorado la capacidad para comprender las condiciones estructurales de los pavimentos con mayor precisión.

En búsqueda de esta mejoría y contextualizando todo lo anteriormente mencionado, se tiene que decir que la evaluación de pavimentos es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia de las redes viales. En este contexto, el Deflectómetro de Impacto ha surgido como una herramienta invaluable para la evaluación estructural de pavimentos, brindando la facilidad para la recopilación de datos cruciales sobre la respuesta de los pavimentos a cargas dinámicas.

Por lo cual, el presente documento tiene como objetivo explorar el estado del arte del deflectómetro de impacto, examinando sus aplicaciones, avances tecnológicos, análisis de datos, y su contribución a la optimización del diseño y mantenimiento de pavimentos.

OBJETIVOS Y ENFOQUE

Objetivo general.

Introducir el concepto del uso del Deflectómetro de Impacto como alternativa técnica no destructiva para realizar la evaluación de calidad de las capas granulares que conforman las estructuras de pavimentos y plantearlo como una herramienta superlativa para la evaluación propia de los pavimentos.

Objetivos Específicos.

- Conceptualizar el uso del Deflectómetro de Impacto en el control de calidad de las características propias de las capas del suelo son como la compactación y el CBR, según las normas técnicas vigentes.
- Analizar la funcionalidad del Deflectómetro de Impacto para la medición de los números estructurales y módulos necesarios para el cálculo de la vida remanente de un pavimento, como alternativa a los estudios de laboratorio.
- Analizar, comparativamente, las ventajas que ofrece el uso del Deflectómetro de Impacto frente a métodos tradicionales, de naturaleza destructivas.
- Proponerlo como alternativa al uso del Densímetro Nuclear, método principalmente utilizado en las obras viales en Colombia.

CAPITULO UNO

DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO, USOS Y APLICACIÓN.

1.1. DEFLECTOMETRÍA Y DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

La deflectometría es una técnica no destructiva para evaluar la condición de los pavimentos y determinar su capacidad de carga. Esta técnica se basa en la medición de la deflexión de un pavimento bajo carga, lo que proporciona información crucial sobre la integridad estructural y la resistencia a las cargas del camino. Básicamente, las mediciones de deflexión se utilizan para analizar la capacidad estructural de un pavimento.

El Deflectómetro de Impacto es un dispositivo que se utiliza comúnmente para realizar mediciones de deflexión en pavimentos. Consiste en una plataforma equipada con un martillo que aplica una carga de impacto al pavimento, y una serie de sensores que registran la deflexión generada por la carga. La información recopilada se analiza para evaluar la resistencia del pavimento, identificar áreas críticas y determinar la necesidad de mantenimiento o rehabilitación.

El funcionamiento del Deflectómetro de Impacto se basa en el principio de que la deflexión de un pavimento bajo carga está relacionada con su capacidad de soportar el tráfico y las cargas aplicadas. Al aplicar una carga de impacto controlada al pavimento, el Deflectómetro mide con precisión la deflexión generada, lo que proporciona datos importantes para evaluar su condición estructural. Estos datos se utilizan para determinar la capacidad de carga del pavimento, identificar áreas débiles o defectuosas, y planificar estrategias de mantenimiento y rehabilitación.

Las aplicaciones del Deflectómetro de Impacto son diversas y fundamentales en el campo de la ingeniería civil y la gestión de pavimentos. Una de las principales aplicaciones es la evaluación de la capacidad de carga de pavimentos existentes, lo que permite determinar su vida útil remanente, identificar áreas críticas y priorizar intervenciones de mantenimiento. Además, el Deflectómetro de Impacto se utiliza para la evaluación de pavimentos nuevos durante la fase de construcción, garantizando que cumplan con los estándares de resistencia y durabilidad requeridos. Al medir la deflexión del pavimento, el Deflectómetro de Impacto puede identificar áreas con problemas estructurales, lo que permite tomar medidas preventivas antes de que los defectos se agraven y comprometan la seguridad vial. Esta capacidad de detección temprana ayuda a reducir los costos de mantenimiento y prolongar la vida útil de los pavimentos.

Además, el Deflectómetro de Impacto se utiliza en la evaluación de la eficacia de diferentes técnicas de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos. Al medir la deflexión antes y después de la aplicación de tratamientos de reforzamiento y la aplicación del mantenimiento necesario a cada una de las capas que conforman la estructura, así se puede evaluar el impacto de estas intervenciones en la capacidad de carga y la integridad estructural del pavimento.

La importancia de la deflectometría y el Deflectómetro de Impacto radica en su contribución a la gestión eficiente y sostenible de los pavimentos. Estas herramientas brindan información precisa y objetiva sobre la condición estructural de los pavimentos, lo que permite tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento, rehabilitación y gestión de activos viales. Al identificar áreas críticas, prevenir la formación de defectos y evaluar la eficacia de las intervenciones, la deflectometría y el Deflectómetro de Impacto ayudan a optimizar el uso de recursos y a garantizar la seguridad y comodidad de los usuarios de la red vial.

1.2. CLASIFICACIÓN SEGÚN SUS NIVELES DE APLICACIÓN

Como se introdujo desde un principio, es un equipo que nos permite realizar una evaluación no destructiva a una estructura de pavimento; método alternativo al efectuado por el densímetro nuclear, por lo cual, prácticamente, cumple también en cada uno de los niveles de aplicación que este efectúa.

Para hablar de niveles de aplicación, debemos primero realizar una caracterización interna según las capacidades de los equipos:

- **Deflectómetro de Impacto Convencional – FWD (Falling Weight Deflectometer)**

Es el equipo convencional, diseñado para producir un impulso dinámico para simular el esfuerzo producido por una rueda en movimiento, el cual causa una deflexión cuyo cuenco posee unas características que ayudan a determinar, por medio de correlaciones, valores para determinar la capacidad del pavimento.

Como se establece en el proceso de uso, se deja caer a un plato de carga de entre trescientos (300) y cuatrocientos cincuenta (450) milímetros de diámetro, una masa que, depende su peso propio y

a la altura establecida, produce el cuenco de deformación objetivo. La carga aplicada para la prueba con este equipo va desde los siete (7) hasta los ciento veinte (120) kilo newtons; eso depende de las especificaciones del pavimento a analizar.

Teniendo en cuenta estos datos y los rangos expuestos, este equipo es comúnmente usado en carreteras con volúmenes entre medios y altos, lo que va dentro de la clasificación de vías secundarias y troncales. En su máximo potencial, puede ser utilizado para realizar mediciones sobre autopistas y pistas de aeropuertos donde no se requiere unas características extremas de uso, pero este trabajo es más comúnmente hecho por equipos con mayores especificaciones.

Este equipo cuenta con bondades como la toma de hasta sesenta (60) pruebas en cada hora, con alta precisión y velocidad. Generalmente, el mismo equipo brinda la determinación de los módulos dinámico y resiliente, así como una posición georreferenciada de cada punto donde se realiza la prueba.



*Ilustración 1 Deflectómetro de Impacto - FWD
Fuente: tbttek.com.ar*

- **Deflectómetro Liviano – LWD (Light Weigth Deflectometer)**

Es una versión portátil del anterior, emplea los mismo principios mecánicos y físicos, con la diferencia en proporción de la carga aplicada para generar el impacto. Este equipo es el que, actualmente, está totalmente normatizado para México. Su clara desventaja es la capacidad, ya que solo puede aplicar carga con fuerza de impacto hasta, aproximadamente, los quince (15) kilo newtons.

Hoy en día son, más comúnmente, utilizados en estructuras de pavimento con espesores de capas moderados. Los proveedores de dichos equipos no lo recomiendan para evaluación de estructuras de pavimentos con altas capacidades, ya que no está hecho para producir niveles de deformación óptimos para la obtención de datos necesarios para el cumplimiento de las pruebas.

Por otro lado, es la mejor herramienta para trabajos específicos de campo en menores proporciones ya que brinda facilidad y versatilidad en las pruebas y arroja resultados que implicarían análisis de laboratorio, como la obtención de niveles de densidad, compactación, módulos dinámicos y resilientes, entre otros. Esto, sumado a la economía que proporciona lo hace una herramienta sobresaliente.



*Ilustración 2 Deflectómetro Liviano - LWD
Fuente: dirimpex.com*

- **Deflectómetro Pesado – HWD (Heavy Weigth Deflectometer)**

Tiene el mismo sistema de recolección de datos, calibración y al sistema de funcionamiento en general, pero con una mayor capacidad de aplicación de carga y, por supuesto, una caracterización de mayores especificaciones. Generalmente, esta herramienta es utilizada en autopistas y carreteras de alta capacidad, así como en pistas de aeropuertos y otras plataformas industriales, ya que tiene la capacidad de imitar la fuerza producto del peso de una aeronave de gran tamaño y de maquinaria de tráfico pesado.

Al aplicar una carga con una mayor magnitud que las anteriores, es necesario el uso de una mayor cantidad de geófonos para el registro de datos y de un sistema de análisis del cuenco de deformación más complejo, teniendo en cuenta una gran área periférica alrededor del plato de carga, donde la deformación registrada es mayor en el punto de impacto y con menores valores a medida que se aleja del mismo.

Para soportar las características ya descritas, la maquina tiene un cuerpo más robusto e indicaciones de operación con mayores necesidades logísticas.



*Ilustración 3 Deflectómetro Pesado - HWD
Fuente: dynatestlatam.com*

1.3. OPERACIÓN DEL EQUIPO

Primero que nada, como está normatizado para la mayoría de equipos y herramientas para toma de datos, se debe realizar una calibración específica de los diferentes componentes que aportarán datos al sistema. Esto se realiza estableciendo la comparación de las mediciones tomadas, con patrones establecidos dependiendo de la zona donde se esté por utilizar.

En el caso de México, así como en muchos de los países de Latino América, legalmente hablando, solo existe normatividad establecida para el uso del Deflectómetro de Impacto Ligero. Para nuestro país se establece el documento denominado M-MMP-1-16/20, establecido por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte como “Grado de Compactación con Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD)”.

Para el caso de la calibración, según este documento normativo, establece que se hará constancia por medio de un certificado propio emitido por el fabricante del equipo, con una vigencia de máximo un año, en el cual deben reposar los datos propios de la calibración del dispositivo generador del impacto y del que toma los datos de la deflexión producida. Dicha calibración se debe realizar según el protocolo de AASHTO R32-11.

Ahora, para la determinación de las deflexiones en sitio, según la publicación realizada por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte en conjunto con el Instituto Mexicano del Transporte (vale la pena aclarar que no está dispuesta como documento normativo), denominada “Uso y calibración de deflectómetro de impacto en la evaluación estructural de pavimentos”, establece un procedimiento secuencial para la toma de cada una de las muestras establecidas:

1. Se debe alistar la superficie donde se realizará la prueba, con la prevención de no alterar la configuración del terreno. Se debe remover, sutilmente, las partículas de material suelto que reposen sobre la superficie para garantizar el contacto perfecto entre la placa de carga y el terreno. Se ubica el dispositivo en el punto que se quiere realizar la prueba, sin ejercer mayor fuerza sobre el mismo.
2. Se registran las temperaturas que puedan llegar a afectar la prueba, en este caso la del ambiente y la propia del pavimento. Si la prueba está planeada para ser realizada en un transcurso de tiempo considerable, se deben tomar los datos de temperatura en periodos más cortos, esto para establecer la correlación que existe entre ellas.

3. Se debe realizar una bitácora donde reposarán datos importantes a tener en cuenta, como, por ejemplo, operador, fecha, hora y factores climáticos y de calibración, abscisas de inicio y fin del tramo evaluado, localización de terraplenes y cortes, características y estructuras de control como existencia de alcantarillas, puentes, etc., deterioros superficiales identificados y descripción actual del pavimento, entre otras.
4. Inicializar el programa de toma de datos y se completa con la información necesaria para empezar la prueba, esta va desde datos propios de la placa de carga como el diámetro y su posición respecto a los geófonos, así como las características de la masa que va a causar la deflexión. Posteriormente, se establece el formato de toma y de emisión de la información obtenida, esto depende de cómo se vaya a realizar las correlaciones teóricas posteriores.
5. Se comprueba la correcta ubicación del equipo bajando lentamente hasta dejar descansar la masa en la superficie, esto para comprobar la firmeza y estabilidad.
6. Desde este punto, levantar mecánicamente la masa hasta la altura deseada y calculada con anterioridad para lograr la fuerza de ejecución establecida y dejar caer la masa para proporcionar el impacto.
Si la deformación persiste y no se recupera el suelo, se debe repetir el último procedimiento, pero con una configuración de carga menor.
7. Para garantizar fiabilidad en los datos, se debe repetir por lo menos dos (2) veces el ensayo; si existe una diferencia de resultados del tres por ciento (3%), debe ser anotado en la bitácora. Normalmente, se realizan tres (3) golpes, los dos primeros que causan algo de asentamiento y el tercero para que arroje los datos utilizados en las correlaciones.
La repetición de la prueba se puede realizar con la misma carga o con una menor en el mismo punto y, en el transcurso del trayecto, es recomendable realizarlo con diferentes niveles de carga para comprobar la no linealidad del sistema de pavimento.
Si se presentan errores aleatorios en las cuencas de deflexión producidas, se pueden utilizar datos promediados para minimizar esta incertidumbre.

Según el uso que se le quiera dar a los resultados obtenidos, varía la zona donde sería optima la realización de la prueba, pero, generalmente, para un mejor diagnóstico del pavimento, se realiza en la zona de las roderas por donde comúnmente transitan los vehículos.

De la misma manera, este valor se puede utilizar para realizar la comparación con la estabilidad y calidad que, seguramente, es mejor hacia los bordes de la calzada.

El número de pruebas a realizar, depende de la longitud de la calzada y el nivel de análisis al que se quiere llegar con la información recaudada. Pero es recomendable tener intervalos de entre cien (100) y quinientos (500) metros entre cada una de las pruebas y, así mismo, un mínimo de siete (7) pruebas por sección uniforme de pavimento, esto para asegurar una muestra estadística segura. Si el pavimento es de configuración rígida, se establece, como mínimo, un total del diez por ciento (10%) de las juntas existentes entre las losas de concreto.

Si el análisis será realizado para un nivel de un proyecto general, con mayores especificaciones, se recomienda que los sondeos sean realizados en una distancia entre veinte (20) y cincuenta (50) metros y para cumplir con un muestreo estadísticamente correcto, se establece un mínimo de quince (15) puntos mínimos de prueba por cada sección uniforme de pavimento. En esta especificación, si el pavimento es rígido, se recomienda la revisión, mínimo, del veinticinco por ciento (25%) del total de juntas entre losas.

Ahora, si el proyecto en el que será utilizado el análisis está en etapa de detalle, las pruebas serán realizadas en un intervalo entre diez (10) y cien (100) metros, esto garantiza la seguridad y homogeneidad en la toma de datos, así se reduce al mínimo los errores e incertidumbres.

1.3.1. SISTEMA MECÁNICO

A su vez, el sistema mecánico está compuesto por una serie de subsistemas que en conjunto tienen el objetivo de realizar la función de ejecutar el golpe necesario para generar la deflexión en el área específica.

- Sistema de Impacto:

Se compone del conjunto de objetos de masa conocida que producirán el golpe necesario para generar la deformación de la superficie y los elementos donde descansan los mismos.

- Sistema Neumático:

Es el encargado de, mediante la aplicación de aire comprimido, almacenar energía mecánica para que, posteriormente, produzca el trabajo necesario para producir la fuerza de impacto.

- Sistema Hidráulico:

Encargado de elevar la carga a la posición necesaria para producir la fuerza de impacto ya que, generalmente, es accionado por medio de caída libre. Como todos los sistemas hidráulicos, utiliza

un fluido a presión para aprovechar el principio de incompresibilidad para la transmisión de fuerzas controladas dentro del sistema.

- Motor:

Depende su aplicación, es el encargado de convertir la energía, ya sea eléctrica o producto de combustión, a energía mecánica que será aplicada para el funcionamiento del sistema, principalmente en la ejecución del impacto.



1. Sistema de Impacto
2. Sistema Neumático
3. Sistema Hidráulico
4. Motor

*Ilustración 4 Sistema Mecánico Deflectómetro
Fuente: tbttek.com.ar*

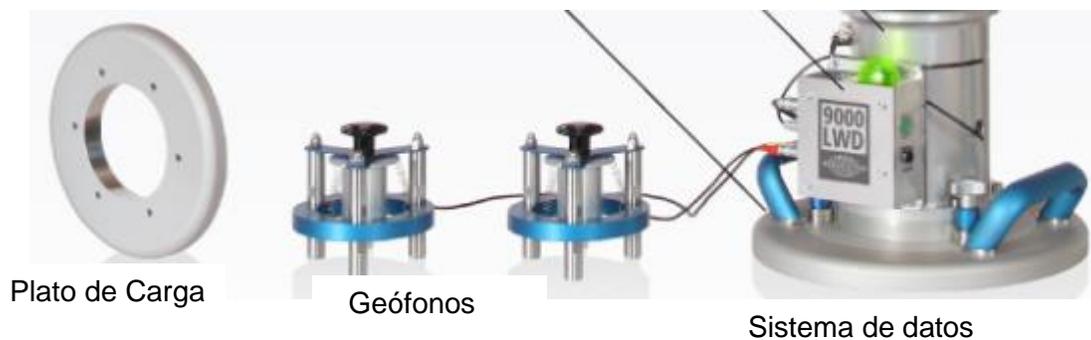
1.3.2. SISTEMA DE MEDICIÓN

Así como en el anterior sistema, está compuesto por una serie de componentes que actúan mancomunadamente para cumplir con el objetivo de tomar las medidas de la deflexión producto del impacto causado por el sistema mecánico de la herramienta.

El sistema está basado en una plataforma con una carga de prueba (también conocida como plato de carga) que impacta la superficie para medir su elasticidad, este debe tener unas características específicas ya que puede afectar la precisión de la medición, como por ejemplo, debe ser lo suficientemente resistente para soportar el impacto sin deformarse, lo que significa que debe tener una buena resistencia a la abrasión y a la corrosión, así mismo, para asegurar la fiabilidad de los

resultados, el plato de carga debe ser calibrado con una precisión de 0.01 mm, lo que se puede lograr aplicando una lámina de acero o aluminio sobre el plato de carga, la cual también debe ser resistente al impacto y a los productos químicos.

La forma geométrica del plato de carga también debe ser adecuada para la medición, dependiendo del equipo con el que se pretenda realizar la prueba y energía que se le imprima al mismo. Por ejemplo, como se divide en la ilustración 5, lo más común es el uso de un disco de acero, que varía entre 30 y 45 centímetros de diámetro, donde impacta la masa que ejerce la fuerza para la toma de datos. Este plato estará conectado a una serie de entre, generalmente, 7 y 9 sensores denominados geófonos que son los encargados de registrar el desplazamiento vertical causado por la aplicación del impacto por la carga. Los geófonos registran la historia de la velocidad durante la aplicación del impacto, a partir de la cual se obtiene, mediante una integración numérica, la deflexión vertical.



*Ilustración 5 Componentes Sistema de Medición
Fuente: terrates-lwd.com*

1.3.3. SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Compuesto por sensores, unidades de almacenamiento y procesadoras de información, este sistema tiene el objetivo de tomar, analizar y procesar cada una de los datos y variables importantes y aquellas que puedan llegar a afectar, directa o indirectamente, al procedimiento efectuado con el Deflectómetro.

En primera medida, un dispositivo integrado de procesamiento de datos que es lo más parecido posible a una tarjeta madre de una computadora, ya que es la pieza central para que todas las demás partes del sistema puedan funcionar, así como la encargada de la toma y el procesamiento de los datos objetivo del accionar del sistema en general.

Posteriormente, codifica los datos para que estos sean dispuestos como información punible y analizable que será empleada para ser correlacionada con las magnitudes físicas finales del ejercicio.

Además, dicha tarjeta está conectada a un sistema de sensores que apoyan con la obtención de datos de temperatura, tanto de la temperatura ambiente del lugar donde se está realizando la prueba, como, por medio de un sistema infrarrojo, de la temperatura propia del material de la capa que posee el pavimento en el instante del accionar. Esto con el fin de tener bajo conocimiento para prevenir la existencia de factores extremos que puedan influir significativamente en los resultados obtenidos.



*Ilustración 6 Componentes Sistema de Procesamiento de Datos
Fuente: dynatestlatam.com*

1.4. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA TOMA DE DATOS

En mayor medida, los factores que influyen en mayor medida a las la medida y toma de datos del sistema son la carga, el clima y las mismas condiciones del pavimento.

- **CARGA**

La magnitud de carga aplicada y el tiempo en el que esta lo hace influye directamente en la deflexión del pavimento, por lo cual es recomendable, para la obtención de datos confiables y utilizables con fiabilidad en la evaluación de la estructura del pavimento, utilizar cargas similares a

las establecidas en el diseño del mismo a la duración y frecuencia de aplicación que fue indicada en el mismo proceso. Generalmente, se acepta al deflectómetro de impacto como el mejor equipo hasta ahora, para simular la magnitud y duración de las cargas actuales que circulan por los caminos (Lyton, 1989).

En muchas ocasiones, por las propiedades del material del cual están compuestos las capas del pavimento, las deflexiones medidas son proporcionales a las cargas aplicadas y los resultados se pueden extrapolar para cargas más altas. Pero no es lo aconsejable ya que, aritméticamente, puede acarrear errores.

Así mismos, existen ecuaciones de correlación y regresión para relacionar la deflexión causada a bajas cargas con las que debería producir una carga mayor, pero aun así tienen gran dispersión en los datos con las cuales se realizaron y eso lleva a errores relevantes. De la misma manera, los pavimentos, por más que sean similares en su composición, no son genéricos, principalmente por el material del cual están compuestos.

- TEMPERATURA

La temperatura es uno de los factores que afectan directamente el rendimiento momentáneo de los pavimentos; por ejemplo, a una temperatura elevada, los pavimentos flexibles producen el reblandecimiento de la carpeta asfáltica e incrementa la deflexión en ellos. Por el contrario, en el pavimento rígidos, las altas temperaturas expanden las losas de concreto, disminuyendo el ancho de las juntas y proporciona una mejor transferencia de carga haciendo que las deflexiones sean menores.

Así mismo, dependiendo la época del año en la cual sea analizada varia esta deflexión ya que, en regiones con estaciones climáticas marcadas se diferencia de un periodo a otro. En invierno y épocas de congelamiento, el pavimento se rigidiza y al descongelarse, el nivel de agua libre interna, aumenta las deflexiones en el mismo, y de ahí en adelante, al desaparecer el agua interna por las ondas altas de calor y, posteriormente, con la baja gradual de la temperatura, vuelve a tomar mayor rigidez. Ahora, en las regiones sin estaciones, el agua libre dentro del pavimento es alta en época de lluvias y vuelve a endurecer cuando se seca internamente, pero puede sufrir reblandecimiento por elevadas temperaturas.

Como anteriormente se mencionó, se debe tener en consideración la temperatura del ambiente y la interna del pavimento a la hora de realizar las pruebas de medición.

- **CONDICIONES DEL PAVIMENTO**

Claramente, las condiciones estructurales del pavimento afectan directamente la toma de datos de deflexión del mismo. Para el pavimento flexible, si se realiza la prueba en la zona periférica de áreas que presentan agrietamientos o en las roderas de la capa son mayores a los que se obtienen en las áreas libres de deterioros y en los bordes de la calzada o en las cercanas a estructuras complementarias como, por ejemplo, las del borde de una alcantarilla.

Ahora, en las de concreto hidráulico, los vacíos que no se observan, pero existen bajo las losas, provocan deflexiones más grandes. Así mismo, es mayor la deflexión obtenida en el centro de la losa que la del área que está más cercana a las juntas.

CAPITULO DOS

GENERALIDADES DE LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL.

2.1. MÓDULO RESILIENTE

Cada objeto, ya sea de un material natural o artificial o incluso nuestro propio cuerpo, tiene una resistencia específica que determina su grado de resiliencia. Sin embargo, es importante destacar que esta capacidad no es algo innato, sino que puede ser adquirida y mejorada a lo largo del tiempo o con la inclusión de ciertas características al mismo.

En términos físicos, la resiliencia se refiere a la capacidad de un objeto para volver a su forma original después de haber sido sometido a una fuerza externa, por lo cual, el módulo resiliente es una medida que nos indica la capacidad de un material para resistir y recuperarse de una deformación antes de alcanzar su punto de ruptura. Esto significa que mientras mayor sea el módulo resiliente de un objeto, mayor será su capacidad de soportar una fuerza y recuperarse después de ser sometido a ella.

Por ejemplo, una pelota de goma tiene un alto módulo resiliente, lo que le permite absorber la fuerza de un impacto y volver a su forma original sin sufrir daños. Por otro lado, una pelota de vidrio tiene un módulo resiliente más bajo, por lo que es más propensa a romperse cuando se le aplica una fuerza. En el caso de los pavimentos, la resiliencia se relaciona con la capacidad del material para absorber y redistribuir las cargas del tráfico, evitando así la formación de grietas y deformaciones permanentes que puedan afectar la estabilidad y funcionalidad de la vía.

El módulo resiliente se determina a través de ensayos de laboratorio en los que se somete una muestra del pavimento a diferentes niveles de carga y se mide su deformación. Estos resultados se utilizan para construir una curva de deformación y recuperación, la cual permite determinar el parámetro en diferentes condiciones de carga y temperatura. Además, se pueden realizar ensayos en campo para obtener valores más precisos y representativos de la condición del pavimento en su ubicación real.

La inclusión del módulo resiliente en la evaluación de pavimentos ha significado un avance significativo en la ingeniería de carreteras, ya que permite obtener información más detallada y confiable sobre la capacidad de carga y la vida útil de un pavimento.

Además, el módulo resiliente permite realizar un análisis más preciso y detallado de las capas del pavimento, ya que se pueden obtener valores individuales de cada una de ellas. Esto es especialmente útil en la evaluación de pavimentos flexibles, donde la deformación se distribuye en diferentes capas y no solo en la superficie.

2.2. MÓDULO ELÁSTICO

El módulo elástico es uno de los parámetros más importantes en el diseño de pavimentos, ya que representa la capacidad del pavimento para soportar el tráfico y proteger la estructura del pavimento. La medición de este módulo es un proceso fundamental en la caracterización de los pavimentos y su correcta selección para diferentes tipos de tráfico y cargas.

El módulo elástico se define como el módulo de un material homogéneo y, valga la redundancia, elástico que tendría un comportamiento equivalente a una capa de pavimento. Esto significa que dicho módulo es una medida de la rigidez del pavimento, considerando no solo el material del que está compuesto, sino también su espesor y condiciones de soporte.

El parámetro que se utiliza en la estimación de deformaciones bajo cargas estáticas es el módulo de elasticidad. El módulo elástico relaciona los esfuerzos aplicados y las deformaciones resultantes. El nivel de esfuerzos aplicado al suelo a través de la estructura del pavimento es mínimo comparado con la deformación en falla, por ello se asume que existe una relación lineal entre los esfuerzos y las deformaciones.

La teoría de la elasticidad permite utilizar ensayos de laboratorio y campo para la determinación del módulo elástico. El ensayo de compresión confinada utilizando el consolidómetro simula el

comportamiento deformacional que tendrá el suelo debajo de una cimentación superficial. El esfuerzo de confinamiento lateral es variable durante la prueba, dada por la pared metálica del equipo que no permite la deformación horizontal de la muestra. El ensayo permite obtener el módulo elástico en la condición natural y humedecida. En suelos arenosos el humedecimiento bajo carga ocurre de manera inmediata y es posible medir el asentamiento adicional por este efecto. El ensayo triaxial estudia el comportamiento deformacional del suelo bajo confinamiento y permite obtener módulos elásticos para cualquier nivel de presión de confinamiento y deformación. Los parámetros se utilizan cuando las presiones verticales transmitidas alcanzan profundidades importantes. El equipo no permite medir el efecto del humedecimiento (Minaya & Ordoñez, 2014).

Una vez obtenidos los datos de deflexión, se utilizan fórmulas matemáticas y modelos de cálculo para determinar el módulo elástico del pavimento. Estos modelos pueden incluir factores como la geometría de la capa de pavimento, la resistencia del suelo de soporte y la variación de la rigidez con la profundidad, entre otros.

La medición del módulo elástico es esencial para el diseño de pavimentos, ya que permite evaluar la capacidad del pavimento para soportar las cargas de tráfico previstas y predecir su comportamiento a lo largo del tiempo. Además, también es importante para la evaluación y rehabilitación de pavimentos existentes, ya que ayuda a identificar posibles zonas de debilidad o problemas de estructura que puedan afectar su desempeño.

Para la evaluación estructural de un pavimento, el módulo elástico es un término que se refiere a la rigidez equivalente de una estructura de pavimento en comparación con una estructura ideal de pavimento que tiene la misma capacidad para soportar cargas. Se puede considerar como una medida de la calidad del pavimento en términos de su capacidad de soporte de cargas. El módulo elástico se calcula a partir de la combinación de los módulos de cada una de las capas de un pavimento y su relación geométrica. Esta combinación se realiza utilizando el método de equivalencia de capas, que se basa en la teoría de la flexión de placas.

Es importante tener en cuenta que los pavimentos no son homogéneos, es decir, están compuestos por diferentes capas con propiedades mecánicas diferentes. El módulo elástico es una forma de unificar estas diferentes capas en un solo valor, lo que facilita la evaluación de la capacidad de soporte de cargas del pavimento en su conjunto. Además, al ser una medida de rigidez, el módulo elástico también tiene en cuenta la resistencia a la deformación del material del pavimento.

Uno de los principales beneficios del uso del módulo elástico en la evaluación de pavimentos es que permite comparar de manera directa diferentes diseños de pavimentos. Al obtener un valor único de rigidez, es posible determinar cuál de los diseños evaluados es el más adecuado para soportar las cargas del tráfico en una determinada vía. Esto ahorra tiempo y recursos, ya que evita la necesidad de construir diferentes pavimentos y someterlos a pruebas de carga para determinar cuál es el más resistente.

Otra ventaja del módulo elástico es que ayuda a predecir el comportamiento futuro del pavimento. Al conocer su rigidez, es posible estimar su vida útil y planificar adecuadamente el mantenimiento y rehabilitación del pavimento. Por ejemplo, un pavimento con un módulo elástico alto tendrá una mayor capacidad para soportar cargas y una vida útil más prolongada en comparación con un pavimento con un módulo elástico bajo.

2.3. NÚMERO ESTRUCTURAL

El número estructural (SN) es un parámetro fundamental en el diseño y evaluación de pavimentos. Este número es crucial para evaluar la resistencia estructural de la capa de pavimento y su capacidad para soportar el tráfico. El SN depende de varios factores, entre ellos el coeficiente de daño, el espesor de la capa y el drenaje, además del coeficiente estructural.

El coeficiente de daño es un parámetro que refleja el efecto acumulativo del tráfico sobre el pavimento. A medida que los vehículos pasan sobre la superficie de la carretera, se generan cargas repetitivas que causan deformaciones permanentes en el pavimento. Estas deformaciones, junto con otros factores como el clima y la calidad misma de los materiales, contribuyen al daño del pavimento. El coeficiente de daño se calcula teniendo en cuenta la carga del eje, la frecuencia de tráfico y otros factores relevantes, y se utiliza para determinar el deterioro progresivo del pavimento a lo largo del tiempo.

El espesor de la capa de pavimento es otro factor crítico que influye en el número estructural, ya que la capacidad de carga de un pavimento está estrechamente relacionada con el espesor de la capa de pavimento. Un pavimento con una capa delgada estará más expuesto a las cargas del tráfico y tenderá a deteriorarse más rápidamente, mientras que un pavimento con una capa más gruesa ofrecerá una mayor resistencia frente al daño provocado por el tráfico. Por lo tanto, el

espesor de la capa de pavimento es un factor determinante en el cálculo del número estructural y en la evaluación de la durabilidad y resistencia del pavimento.

El drenaje es un aspecto crucial en el diseño de pavimentos, ya que influye de manera significativa en la capacidad del pavimento para resistir el daño provocado por el agua. El agua es uno de los principales agentes que contribuyen al deterioro del pavimento, ya que puede debilitar la estructura del pavimento y causar daños, como la formación de baches y la erosión de los materiales. Por lo tanto, el drenaje adecuado es fundamental para mantener la integridad del pavimento y prolongar su vida útil. El número estructural tiene en cuenta el sistema de drenaje del pavimento, junto con otros factores, anteriormente expuestos, para evaluar la capacidad del pavimento para resistir el daño causado por el agua.

Además, para complementar el concepto, el coeficiente estructural es un parámetro que refleja la calidad de los materiales utilizados en la construcción del pavimento, así como la capacidad de la estructura para distribuir las cargas del tráfico de manera efectiva. Este coeficiente se calcula teniendo en cuenta la resistencia de los materiales del pavimento, la calidad de la construcción y la capacidad estructural para soportar las cargas del tráfico. Este coeficiente es fundamental en el cálculo del número estructural, ya que influye directamente en la capacidad del pavimento para resistir el daño provocado por el tráfico y otros factores.

Al combinar estos factores, se obtiene un número estructural que representa la capacidad del pavimento para soportar las cargas del tráfico y resistir el deterioro. Una vez que se determina el número estructural necesario para un diseño de pavimento, se puede utilizar una tabla de la AASHTO para seleccionar el tipo de pavimento y el espesor más adecuados para satisfacer las demandas del tráfico previsto.

El número estructural en la evaluación de pavimentos es una medida importante que permite tener una visión global y precisa del comportamiento de una estructura de pavimento, ya sea nueva o existente. En este sentido, el número estructural se ha convertido en una herramienta crucial en la toma de decisiones para el diseño y rehabilitación de pavimentos, ya que proporciona una estimación precisa del espesor requerido para soportar las cargas de tráfico y evitar fallos en la estructura.

Una de las principales ventajas de utilizar el número estructural en la evaluación de pavimentos es su capacidad para tener en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la construcción del pavimento. Esto permite una evaluación más precisa y realista del

comportamiento estructural de la carretera y evita el uso excesivo o insuficiente de materiales, lo que puede resultar en un alto costo económico y ambiental.

Además, el número estructural permite considerar las diferentes características de diseño de los pavimentos y de cada una de las capas que componen la estructura completa. Estos elementos afectan directamente la capacidad de carga del pavimento y, por lo tanto, deben ser tomados en cuenta en su evaluación. Al considerar todas estas características, el número estructural proporciona una visión holística de la capacidad de carga del pavimento y su capacidad para soportar el tráfico esperado.

En términos de rehabilitación de pavimentos existentes, el número estructural proporciona una herramienta valiosa para evaluar el deterioro y determinar la necesidad de una nueva superficie de rodadura. Al conocer el número estructural de la estructura existente y el espesor de la capa de rodadura existente, es posible calcular el número estructural de la superficie de rodadura y determinar si es necesario un reemplazo o solo una nueva capa de rodadura.

2.4. COMPACTACIÓN PROCTOR

La compactación del suelo es una herramienta útil para aumentar la resistencia del suelo y mejorar muchas de las propiedades físicas del suelo. La compactación implica la eliminación parcial o total de poros en el suelo a través de la aplicación de una presión mecánica. Esto se logra generalmente mediante la compresión del suelo con una unidad de compactación, como un rodillo de compactación mecánico. La compactación de suelos mejora la resistencia a la compresión, aumenta la resistencia de la superficie al desgaste por el tránsito y mejora la capacidad del suelo para resistir el movimiento lateral.

La prueba Proctor consiste en compactar una muestra representativa de suelo en condiciones controladas y determinar su humedad y densidad. Esto se logra mediante el uso de un aparato de compactación y una serie de golpes. Los resultados de la prueba Proctor se utilizan para establecer la curva de compactación del suelo, que muestra la humedad óptima y la densidad máxima alcanzables.

Durante la construcción de un proyecto carretero, se lleva a cabo la prueba Proctor en diferentes etapas. Primero, se toman muestras del suelo en diferentes puntos de la vía y se llevan al

laboratorio para su análisis. Se determina la humedad natural del suelo y se procede a realizar la compactación en el aparato de ensayo. Se aplican diferentes niveles de energía de compactación y se registran los datos correspondientes de humedad y densidad.

La prueba consiste en compactar el suelo a emplear en tres capas dentro de un molde de forma y dimensiones normalizadas, por medio de 25 golpes en cada una de ellas (56 para el Método C) con un pisón de 2,5 kilogramos de peso, que se deja caer libremente desde una altura de 30,5 centímetros.

Con este procedimiento Proctor observó que, para un suelo dado, a contenido de humedad creciente incorporado a la masa del mismo, se obtenían densidades secas sucesivamente más altas (mejor grado de compactación). Así mismo, notó que esa tendencia no se mantenía indefinidamente si no que, al superar un cierto valor la humedad agregada, las densidades secas disminuían, con lo cual las condiciones empeoraban. Es decir, puso en evidencia que, para un suelo dado y a determinada energía de compactación, existe un valor de “Humedad Óptima” con la cual puede alcanzarse la “Máxima Densidad Seca”.

El objetivo principal de la prueba Proctor en la construcción de proyectos carreteros es encontrar, como ya se mencionó, la humedad óptima y la densidad máxima del suelo, ya que esta combinación proporciona la máxima resistencia y capacidad portante del terreno. Una vez que se obtienen los resultados de la prueba, se determinan las especificaciones de compactación que deben seguirse durante la construcción de la vía.

La aplicación de la prueba Proctor en la construcción de proyectos carreteros es esencial para garantizar una adecuada compactación del suelo. Esta prueba nos ayuda a determinar la humedad y densidad óptimas del suelo, lo que contribuye a la durabilidad y resistencia de la vía. La prueba Proctor permite establecer las especificaciones de compactación, asegurando que se sigan los estándares adecuados durante la construcción de carreteras. Gracias a esta evaluación, podemos asegurar la calidad y estabilidad de la vía, brindando seguridad y comodidad a los usuarios.

En la actualidad existen distintos métodos para reproducir en laboratorio las condiciones de compactación en obra. Todos ellos pensados para estudiar, además, los distintos factores que gobiernan la compactación de los suelos. Históricamente, el primer método, en el sentido de la técnica actual, es el debido al Dr. R. R. Proctor (1933) y es conocido como Prueba Proctor Estándar dada por la AASHTO (American Association of State Highway Officials). El método Proctor estándar es un procedimiento de laboratorio que utiliza un cilindro de compactación y una energía de

compactación estándar para simular las condiciones de campo. Durante el ensayo, se aplica una cantidad específica de energía de compactación al suelo húmedo en capas sucesivas, y se mide la densidad seca del suelo resultante. Luego, se determina la humedad óptima y la densidad máxima del suelo para ese contenido de humedad.

Pero hay que tener en cuenta que, además de este primer ensayo con base del principio del mismo, surge un método modificado como alternativa del primero. Conocido como Proctor Modificado, este método se introduce por la necesidad de modernizar el ya establecido como estándar dado al aumento de la capacidad que se necesitaba para cumplir con las especificaciones de los vehículos modernos que fueron surgiendo. Por esta razón, el método modificado utiliza una energía de compactación mayor y un molde más grande que el método estándar, lo que resulta en una mayor densidad del suelo analizado. Además, el Proctor modificado permite procedimientos para mezclar el suelo con aditivos u otros materiales antes de compactarlo, lo que simula mejor las condiciones reales de campo.

Un aspecto clave, quizá el primordial a considerar, al comparar ambos métodos es la diferencia en la energía de compactación utilizada, ya que mientras que el Proctor estándar utiliza una energía de compactación menor, el Proctor modificado emplea una energía mayor para compactar el suelo. Esta diferencia conlleva consecuencias significativas en términos de la densidad obtenida y, por ende, en la capacidad del suelo para soportar cargas.

En cuanto a la representatividad de los resultados, el método Proctor estándar puede subestimar la densidad máxima que se puede lograr en la práctica, ya que la energía de compactación utilizada en el ensayo puede no ser suficiente para simular las cargas y el tráfico reales a los que será sometido el suelo en el campo. Por otro lado, el Proctor modificado, al emplear una energía de compactación más alta, tiende a proporcionar resultados que se asemejan más a las condiciones de campo, especialmente en proyectos de ingeniería civil de mayor escala.

En lo que respecta a la influencia de la humedad en la compactación del suelo, ambos métodos buscan determinar la humedad óptima del suelo, es decir, el contenido de agua que permite lograr la máxima densidad. Sin embargo, el método Proctor modificado tiende a proporcionar una humedad óptima ligeramente mayor que el método estándar, debido a la energía de compactación adicional y a la incorporación de aditivos que pueden influir en las propiedades del suelo.

En relación con la aplicabilidad en proyectos de ingeniería, el método Proctor estándar es comúnmente utilizado para realizar pruebas de laboratorio en suelos naturales y en proyectos de

menor envergadura, donde las condiciones de compactación pueden ser simuladas de manera efectiva con la energía estándar. Por su parte, el Proctor modificado es preferido en proyectos de ingeniería geotécnica más críticos, como presas, autopistas y cimientos de edificios de gran envergadura, donde la compactación del suelo es de suma importancia y debe ser representativa de las condiciones reales.

Para divisar un poco mejor la comparativa que hay entre estas dos pruebas, podemos analizar la siguiente tabla donde se plasman las características propias de cada una de estas alternativas.

PARÁMETRO	PROCTOR					
	MODIFICADO			ESTÁNDAR		
NORMA MTC	115			116		
NORMA ASTM	D 1557			D 698		
SUELO	Tienen 30% o menos en peso de sus partículas retenidas en el tamiz de 3/4"					
CAPAS	5			3		
ESFUERZO	$5.49 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$			$2.96 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$		
ALTURA	457.2 mm			304.8 mm		
PISÓN	Peso = 44.5 N			Peso = 24.4 N ; Diámetro = 50.8 mm		
MÉTODO	A	B	C	A	B	C
DIÁMETRO - MOLDE	4 pulg	4 pulg	6 pulg	4 pulg	4 pulg	6 pulg
GOLPES	25	25	56	25	25	56
GRANULOMETRÍA	Nº 4	9.5 mm (3/8")	19 mm (3/4")	Nº 4	9.5 mm (3/8")	19 mm (3/4")
CAPAS	5	5	5	3	3	3
USOS	Pueden ser ensayados usando los métodos B o C	Pueden ser ensayados usando el método C	No será usado con los métodos A o B	Pueden ser ensayados usando los métodos B o C	Pueden ser ensayados usando el método C	No será usado con los métodos A o B
CANTIDAD DE MATERIALES	Nº 4 ≤ 20%	Nº 4 > 20% 3/8" ≤ 20%	3/8" > 20% 3/4" ≤ 30%	Nº 4 ≤ 20%	Nº 4 > 20% 3/8" ≤ 20%	3/8" > 20% 3/4" ≤ 30%

Tabla 1 Comparativa de parámetros entre Proctor Estándar y Modificado
Fuente: yachaywasi.org

A grandes rasgos, la diferencia básica entre el ensayo Proctor Normal y el Modificado es la energía de compactación usada. En el Normal se hace caer un peso de 2.5 kilogramos de una altura de 30 centímetros, compactando la tierra en 3 capas con 25 golpes y, en el Modificado, un peso de 5 kilogramo de una altura de 45 centímetros, compactando la tierra en 5 capas con 50 golpes.

2.5. PORCENTAJE DE HUMEDAD

El porcentaje de humedad del suelo se refiere a la cantidad de agua contenida en el suelo. Esto puede variar en función del contenido de materia orgánica, la composición mineral, la cantidad de agua subterránea, la temperatura, la textura y otros factores. Puede ser medido en peso o en volumen y es esencial para mantener la salud de los suelos y los ecosistemas. Los suelos con un alto porcentaje de humedad tienden a ser más productivos, hablando en términos de agricultura, y menos susceptibles a la erosión.

En ingeniería, uno de los parámetros físicos más importantes para el éxito de la obra es el porcentaje de humedad en el suelo. Este dato es indispensable para realizar procesos constructivos exitosos, en muchos casos es esta variable la que marca la diferencia entre un proyecto exitoso y uno fallido.

Por este motivo, la medición del porcentaje de humedad del suelo se ha convertido en un proceso indispensable durante la realización de obras de ingeniería.

Para realizar esta tarea en forma correcta se han desarrollado varios métodos. Un enfoque sencillo para medir la humedad del suelo es secar la muestra de suelo en un horno. Al hacer esto, se elimina el agua inmovilizada en el suelo, que puede variar en una amplia gama de concentraciones. Este método se realiza secando la muestra de suelo a una temperatura relativamente alta de manera controlada. Esto asegura que ningún componente volátil se perderá entre los límites de evaporación, ya que es importante que la condición inicial de la muestra se conserva en todo momento.

Inicialmente, tomada la muestra del suelo lo menos manipulada posible, se debe obtener el valor de la masa utilizando una balanza. Después de esto, se calienta la muestra en el horno a una temperatura determinada, esta temperatura generalmente está por sobre los 100 grados centígrados, y se gradúa dependiendo de las fases y componentes del material. Posteriormente, se vuelve a pesar para determinar la masa seca final. La diferencia entre la masa seca inicial y la masa seca final es el agua inmovilizada presente en la muestra. Aunque este método no es del todo exacto, si arroja una precisión alta y suficiente para ser certera en la toma de decisiones al respecto de las obras de ingeniería.

Además de este, gracias a la tecnología existen métodos más avanzados y precisos para la obtención de este parámetro, con el condicionante e inconveniente, si se quiere ver de ese modo, de ser sustancialmente más costoso que el ya mencionado.

Conocer el porcentaje de humedad del suelo es, sin lugar a dudas, un factor de extrema importancia en un proyecto de ingeniería. Por suerte, los avances en tecnología y medición han permitido desarrollar diversos métodos para medir este parámetro con mucha precisión.

Como factor, el porcentaje de humedad óptima del suelo es importante a tener en cuenta a la hora de evaluar la calidad del suelo y su resistencia a la compactación. Un suelo demasiado húmedo será más fácilmente compactado y tendrá una resistencia menor. Por otro lado, un suelo demasiado seco no podrá soportar el peso adecuadamente y también tendrá una resistencia reducida. Por lo tanto, el porcentaje de humedad óptima del suelo es un factor crítico para determinar el grado de compactación y resistencia del suelo.

Una vez definido el porcentaje óptimo de humedad, el siguiente paso es evaluar unívocamente el grado de compactación del suelo. Para esto, se requerirá de la aplicación de pruebas de compactación. Estas pruebas permiten medir el grado de compactación de una muestra de suelo, determinando su densidad relativa a la distancia que se aplicó la presión de compactación. Esto permite medir el grado de resistencia y la capacidad de la muestra para soportar el peso de la construcción.

2.6. CBR – CALIFORNIA BEARING RATIO

Un ensayo de la prueba CBR (California Bearing Ratio) es un método de prueba de suelos que se utiliza para determinar la capacidad de soporte de un suelo. Esta prueba se utiliza comúnmente para determinar si un suelo es apto para soportar actividades tales como la construcción de carreteras, túneles, diques, edificios y otras infraestructuras. El ensayo de CBR proporciona información importante sobre la resistencia al desplazamiento, la durabilidad de los materiales y el comportamiento de los materiales bajo cargas dinámicas.

Lo primero para calcular este índice, se determina la humedad óptima y la densidad máxima del suelo mediante el ensayo de Proctor, anteriormente definido. Lo siguiente es añadir agua hasta lograr la humedad óptima anteriormente calculada. Dicha muestra ya tomada, se compacta en el mismo molde estandarizado, en tres capas diferentes, cada una aplicándole fuerza mediante la caída libre de una maza uniforme, desde una altura uniforme, pero con una cantidad de interacciones diferentes en cada una de las capas.

Posteriormente, con la muestra lista para la realización del ensayo, tenemos dos variantes del mismo ensayo en condiciones de humedad diferentes; la prueba de CBR saturada y la prueba de CBR con humedad óptima o de operación, son dos variantes de esta prueba que proporcionan información crucial sobre las propiedades de los suelos en diferentes condiciones de humedad.

Por un lado, la muestra se sumerge totalmente en agua y así, la prueba de CBR saturada. Esta condición de saturación refleja las condiciones de campo en las que el suelo está completamente copado, lo que puede ocurrir en áreas con alto contenido de agua subterránea o en suelos sometidos a inundaciones temporales. La realización de la prueba de CBR saturada permite evaluar la resistencia al corte del suelo en condiciones extremas de saturación. Los suelos llenos de agua tienden a comportarse de manera diferente a los suelos no saturados debido a la presión intersticial de este líquido, que puede afectar significativamente su capacidad de soportar cargas. La prueba de CBR saturada es útil para evaluar el comportamiento del suelo en áreas propensas a inundaciones o en proyectos de ingeniería que implican suelos con alto contenido de agua subterránea. Los resultados de esta prueba proporcionan información crucial sobre la capacidad de carga del suelo en condiciones extremadamente húmedas, lo que es fundamental para el diseño de pavimentos y estructuras en áreas con problemas de drenaje o exposición a inundaciones.

Por otro lado, la prueba de CBR con humedad óptima se lleva a cabo en muestras de suelo con el contenido de humedad en el suelo que resulta en la máxima densidad del suelo bajo condiciones de compactación específicas, determinada mediante el ensayo Proctor o ensayos de compactación. La realización de la prueba de CBR con humedad óptima permite determinar la resistencia al corte del suelo en condiciones cercanas a su densidad máxima y contenido de humedad óptimos. La realización de la prueba de CBR con humedad óptima permite evaluar la resistencia al corte del suelo en condiciones cercanas a su densidad máxima y contenido de humedad óptimos. La compactación óptima del suelo es crucial para garantizar la estabilidad y durabilidad de los pavimentos, por lo que la determinación de la resistencia al corte del suelo en estas condiciones proporciona información importante para el diseño y la construcción de pavimentos y estructuras. Además, la prueba de CBR con humedad óptima ayuda a comprender mejor el comportamiento del suelo en condiciones realistas de campo, lo que es fundamental para garantizar la seguridad y la eficiencia de las infraestructuras.

Ambas pruebas de CBR proporcionan información valiosa sobre las propiedades de los suelos en diferentes condiciones de humedad, lo que ayuda a los ingenieros a comprender mejor el comportamiento de los suelos y tomar decisiones informadas en el diseño de estructuras y

pavimentos. La resistencia al corte medida en la prueba de CBR se utiliza para calcular el valor del índice de soporte California, que es un parámetro importante en el diseño de pavimentos y la evaluación de la capacidad de carga de los suelos.

A través de este procedimiento se determina lo que se llama el Índice CBR que es la relación entre la carga determinada y la que se obtiene por el mismo procedimiento para una muestra tipo de roca estandarizada triturada, por tal motivo se expresa en porcentaje.

Ahora, para la realización de los respectivos cálculos y la obtención del valor real buscado, se debe calcular la presión aplicada por el pistón para cada penetración, esto se logra dividiendo la carga aplicada por el área del pistón, y se dibuja una curva para obtener los esfuerzos de penetración a partir de los datos de prueba. Ocasionalmente, la curva resulta cóncava hacia arriba en su parte inicial, debido a irregularidades en la superficie del espécimen o a otras causas y, en tal eventualidad, el punto cero de la curva se debe ajustar, como se muestra en la ilustración siguiente. La corrección consiste en trazar una tangente a la curva en el punto de inflexión, cuya prolongación hasta el eje de abscisas definirá el nuevo origen de esa curva (penetración cero) para la determinación de las presiones correspondientes a 2.54 y 5.08 mm. Se debe dibujar una curva por cada espécimen penetrado. (INV-148-13, Invías)

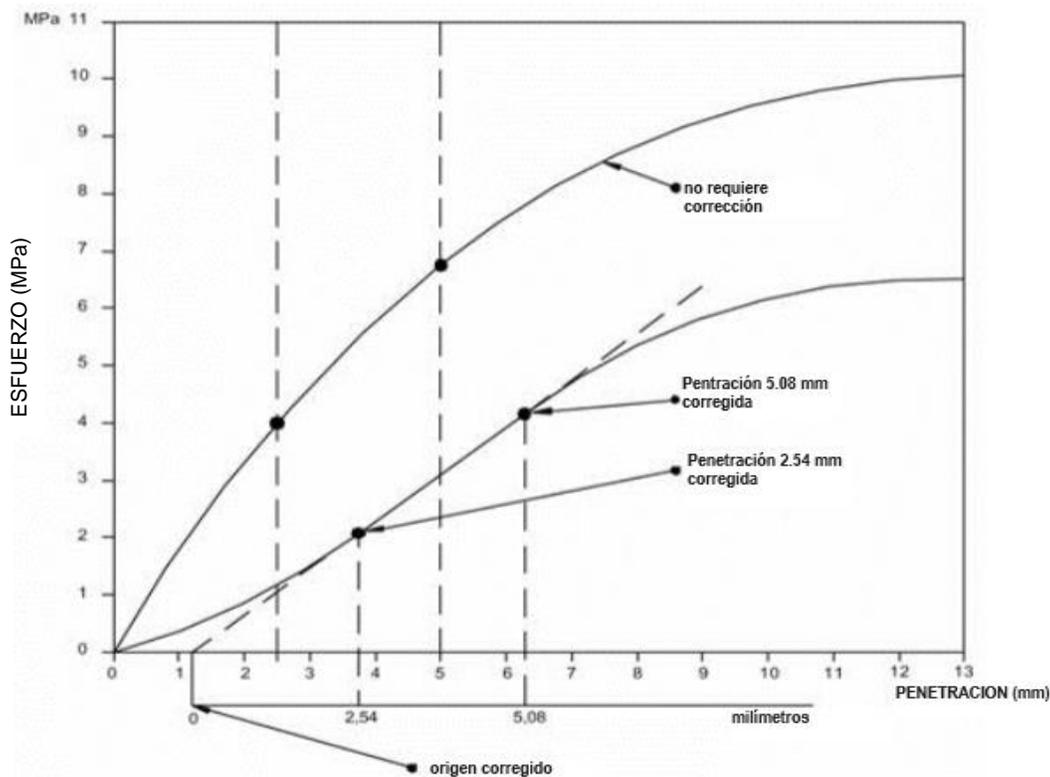


Ilustración 7 Curva penetración – esfuerzo, ensayo de CBR
Fuente: invias.gov.co

Usando los esfuerzos corregidos, tomados de las curvas penetración - esfuerzo, para penetraciones de 2.54 y 5.08 mm (0.100 y 0.200"), se calculan las relaciones de soporte correspondientes, dividiendo dichos esfuerzos por los esfuerzos de referencia 6.9 MPa (1000 lb/pg²) y 10.3 MPa (1500 lb/pg²), respectivamente, y multiplicando por 100. También, se debe calcular la relación de soporte para el esfuerzo máximo, si éste se produjo a una penetración inferior a 5.08 mm (0.200"); en este último caso, el esfuerzo de referencia se deberá obtener por interpolación. La relación de soporte (CBR) reportada para el suelo es, normalmente, la de 2.54 mm (0.1") de penetración. Cuando la relación a 5.08 mm (0.2") de penetración es mayor, se repite el ensayo. Si el ensayo de comprobación da un resultado similar, se toma como resultado del ensayo la relación de soporte (CBR) para 5.08 mm (0.2") de penetración. (INV-148-13, Invías)

CAPÍTULO TRES

MÉTODOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

La evaluación estructural de pavimentos, es un proceso que se usa para determinar el estado de un pavimento, su viabilidad para mantener o mejorar el diseño y planificar el mantenimiento y las reparaciones necesarias. La evaluación estructural de pavimentos es una herramienta vital para mantener una vía en perfecto estado de operación de una vía, ya que brinda una imagen clara de la cantidad de daño que un pavimento ha sufrido. Esta información ayuda a determinar la necesidad de reparación o rehabilitación para garantizar que el pavimento siga siendo una parte segura y efectiva de la red de transporte.

Esta evaluación de pavimentos se lleva a cabo analizando ítems de como la de densidad, la resistencia, la estabilidad de la estructura básica de la carretera, entre algunos otros factores a tener en cuenta. Para tal objetivo, se hacen mediciones y análisis para determinar si el pavimento está experimentando algún daño estructural, las cuales permiten descubrir áreas de debilidad en el pavimento.

Esta inspección es de suma importancia a la hora de la finalización de la construcción de una carretera nueva, para comprobar la correcta ejecución de la misma y su estado óptimo para ser puesta en operación. Lo anterior, con el objetivo de garantizar el nivel de servicio previsto que esta debe prestar a los usuarios y, así mismo, confirmar la vida útil para la cual fue proyectada desde el primer momento.

Así mismo, con la aplicación de estos métodos de evaluación se va realizando una verificación a tiempo real conforme va avanzando la construcción de cada una de las capas de la estructura para garantizar su correcta disposición; además, esto genera facilidad de prevención en el caso de que se presenten errores e infortunios en alguno de los procesos constructivos y poder ser motivo de corrección, en los casos que sea necesario.

Los resultados de la evaluación serán críticos para determinar el enfoque óptimo de mantenimiento y operación para el área de carretera específica. Si se identifican áreas problemáticas o si se detecta una disminución significativa en la resistencia del pavimento, se deben tomar medidas para solucionar el problema. Estas acciones pueden incluir la reparación o el aplanamiento de los problemas existentes, así como la regeneración del pavimento con materiales nuevos.

La evaluación estructural de pavimentos es una herramienta esencial para prolongar la vida útil de todas las carreteras. Estas mediciones aseguran la toma de decisiones y medidas adecuadas en cuanto a la rehabilitación y operación adecuadas de los pavimentos. Esto ayuda a prevenir el daño estructural y los costos asociados con las reparaciones.

A continuación, se enumerarán algunos de los métodos más comúnmente utilizados para realizar la evaluación anteriormente dicha.

3.1. EXPLORACIONES

La exploración es una herramienta vital para la evaluación estructural de los pavimentos. Este proceso se lleva a cabo mediante la recopilación de datos sobre el estado subyacente de los materiales del pavimento, permitiendo a los profesionales identificar puntos problemáticos para su necesario arreglo.

Antes de determinar la necesidad de realizar una obra de mantenimiento, se debe realizar un diagnóstico del estado de los pavimentos existentes, lo cual consiste, básicamente, de una evaluación de los daños y condiciones actuales de una superficie de pavimento. Esta evaluación se realiza para determinar la vida útil restante del pavimento, el impacto de los daños en su desempeño y la necesidad de reparaciones para mejorar su desempeño. El diagnóstico también incluye un análisis de los factores que contribuyen a la degradación del pavimento, como la erosión, el tráfico pesado, la vegetación, el clima, la edad, la calidad del pavimento, etc.

Este diagnóstico generalmente comienza con un examen visual de la superficie del pavimento para identificar cualquier daño, como grietas, desequilibrios, baches, desplazamiento de los bloques de pavimento, etc. Estas características se documentan y se evalúan para determinar el grado de daño y el impacto en el desempeño del pavimento.

Los métodos de exploración visual son probablemente los métodos más comunes para llevar a cabo la evaluación estructural de los pavimentos. Estas exploraciones se realizan generalmente inspeccionando la superficie del pavimento para identificar puntos de daño, grietas, erosiones y otras cualidades estructurales. Además de la inspección visual, el profesional debe verificar la integridad del pavimento al tacto para verificar el estado de los materiales.

Actualmente, las tecnologías aplicadas a este objetivo, como la propia del georradar, han tomado fuerza posicionándose como una herramienta útil para la evaluación estructural de los pavimentos. Este método de exploración utiliza latidos de onda de radio para identificar daños en la estructura del pavimento. El Georradar o Ground Penetrating Radar (GPR), es un método de prospección geofísica de gran aplicación en la evaluación estructural de pavimentos flexibles a nivel mundial. Se ha logrado caracterizar algunas de las principales patologías que afectan a los pavimentos flexibles y su respuesta en la señal electromagnética de alta frecuencia del Georradar. Más por ensayos a prueba y error y documentando los resultados, se han identificado investigaciones de las cuales se han obtenido los datos para las respuestas electromagnéticas producidas por problemas de compactación, vacíos, fracturas y zonas de humedad, entre otras. Lo que significa que la respuesta propia de diferentes materiales a las ondas, producen frecuencias diferentes y claramente identificables.

Esta información se puede recopilar creando un mapa tridimensional de la estructura entera del pavimento, realizando modelos con aproximaciones muy altas del estado real en el que se encuentra cada una de las capas que la conforman.

Debemos mencionar a uno de los procesos más comunes que se utilizan en México para la obtención de los parámetros necesarios para complementar una buena evaluación estructural de pavimentos, este es el ensayo con el cono de arena para identificar la densidad de los materiales y, a su vez, los grados de compactación de los mismos.

El método del cono de arena es uno de los métodos más comunes para evaluar la densidad de un pavimento. Esta prueba se realiza para determinar una estimación aproximada de la cantidad de grava que se ha compactado en el pavimento. La densidad de los materiales del pavimento está

en gran medida determinada por la cantidad de grava compactada, y el cono de arena es una forma práctica de realizar esta medición.

Esta prueba ayuda a los inspectores de carreteras a determinar si los materiales del pavimento están siendo compactados correctamente y a desarrollar un programa para su mantenimiento. Los datos recopilados a través de esta prueba también se pueden usar para estimar la durabilidad del pavimento y la necesidad de realizar trabajos de mantenimiento complejo.

Existen algunas consideraciones relacionadas con la prueba de cono de arena. Es importante comprender la variabilidad del suelo en el área para asegurarse de que los resultados obtenidos de la prueba sean precisos. Además, las muestras recopiladas de los pavimentos deben ser recopiladas rápidamente, ya que una muestra muerta tendrá menos grava que una muestra de un pavimento recién compactado. Con el mismo principio funciona el método realizado con la denominada trompa de elefante.

3.2. CARGA ESTÁTICA

En esta clasificación, entran algunos de los otros métodos ya que, teóricamente, incluyen a todas las maneras en las que se puede evaluar el pavimento sin que sea directamente expuesto al accionar de una carga dinámica sobre el mismo. Bajo esta premisa, dentro de esta categoría caben los de inspección visual, así como los que se realizan en un laboratorio y los que se deducen por métodos de cálculo y otros para el análisis de diseño de superficies.

Los métodos de laboratorio usados para la evaluación estructural de pavimentos son diversos y están en constante evolución. Algunos de los métodos más comunes incluyen el ensayo de resistencia al desgaste, que se usa para evaluar la resistencia a la abrasión y de la capa de base; el ensayo de resistencia al esfuerzo, que se usa para medir la resistencia del material a los esfuerzos de cizalla y flexión. De esta misma manera, se hacen relevantes los ensayos utilizados para medir la rigidez y capacidad de las capas que conforman el pavimento. En el proceso de evaluación de estructura de pavimentos, los métodos de cálculo juegan un papel importante. Los métodos de cálculo se utilizan para predecir el comportamiento de los pavimentos bajo determinadas cargas y condiciones. La elección correcta del método de cálculo puede ayudar a optimizar el diseño de pavimentos, reducir la necesidad de mantenimiento y al mismo tiempo mejorar la durabilidad de los proyectos de carreteras.

De los más famosos y útiles dentro de esta categoría, se debe mencionar el conocido como prueba de placa. La prueba de placa es un procedimiento importante en la ingeniería de pavimentos, utilizado para evaluar la capacidad portante del suelo subyacente y determinar la resistencia estructural del pavimento. En este ensayo, se aplica una carga estática sobre una placa de acero colocada en la superficie del pavimento, y se mide la deformación resultante para calcular la capacidad de soporte del suelo y la resistencia del pavimento.

La prueba de placa es crucial para el diseño, la evaluación y el mantenimiento de pavimentos, ya que proporciona información precisa sobre la capacidad de soporte del suelo y la resistencia del pavimento, lo que a su vez influye en las decisiones de diseño y rehabilitación de carreteras.

El procedimiento de la prueba de placa comienza con la colocación de una placa de acero de forma circular o cuadrada en la superficie del pavimento a evaluar. Esta placa está conectada a un dispositivo de carga que aplica gradualmente una carga estática sobre la placa. A medida que se aplica la carga, se registran las deformaciones en la superficie del pavimento, generalmente utilizando equipos de medición como extensómetros o transductores de deformación. Durante el ensayo, se registran las deformaciones a intervalos de carga específicos, y se construye una curva de carga-deformación que muestra cómo responde el pavimento a la carga aplicada. Esta curva proporciona datos cruciales para evaluar la capacidad de soporte del suelo y la resistencia del pavimento.

La interpretación de los resultados de la prueba de placa es fundamental para realizar recomendaciones adecuadas en cuanto a la capacidad portante del suelo y la resistencia estructural del pavimento. Los ingenieros utilizan los datos recopilados para calcular el módulo de reacción del suelo subyacente, que es una medida de su capacidad para soportar cargas. También se evalúa el índice de elasticidad del pavimento, que indica la capacidad del mismo para resistir deformaciones bajo carga.

Además, la prueba de placa permite evaluar la deflexión del pavimento, que es vital para comprender la capacidad de redistribuir las cargas y resistir la fatiga estructural a lo largo del tiempo. Estos datos son esenciales para el diseño y la rehabilitación de pavimentos, ya que influyen en las decisiones sobre el grosor y tipo de materiales a utilizar en la construcción o reconstrucción de la carretera.

De esta misma manera, no hay que dejar de lado la posibilidad de la realización de un ensayo que nos brinda la obtención del CBR in situ. El procedimiento de la prueba de CBR in situ normalmente

comienza con la identificación, marcación y limpieza de la zona del terreno en la capa donde se pretende realizar el ensayo, que representa la ubicación y condiciones en las cuales se construirá el pavimento. Luego, se aplica una carga al penetrómetro estándar, con un diámetro y forma específicos, que se hunde en el suelo a una tasa constante. Durante la penetración, se mide la resistencia del suelo a la carga, y se comparan los resultados con los de un material patrón, generalmente una mezcla de agregado y compactada a una densidad y humedad conocida. La relación entre la resistencia del suelo ensayado y el material patrón representa el CBR in situ, que es una medida clave de la capacidad de soporte del suelo para propósitos de pavimentación.

Los resultados de la prueba de CBR in situ son fundamentales para el diseño de pavimentos, ya que influyen en la selección de materiales, el espesor del pavimento y la evaluación de las condiciones del material a utilizar. Por ejemplo, suelos con un CBR alto suelen indicar una mayor capacidad de soporte, lo que puede permitir la reducción del espesor del pavimento, mientras que suelos con un CBR bajo pueden requerir un pavimento más grueso o la mejora del suelo mediante técnicas de estabilización. Partiendo de este concepto, la prueba de CBR in situ es valiosa para la evaluación de la calidad, ya que los resultados proporcionan una indicación clara de la capacidad del suelo para soportar cargas, lo que es crucial para prever el comportamiento del pavimento a lo largo del tiempo y su resistencia a la fatiga estructural. Esta información es esencial para la selección de los materiales y métodos de construcción más adecuados, así como para la estimación de la vida útil del pavimento y realizar la proyección de trabajos necesarios para la recuperación de la misma, si es el caso.

Ahora, más allá de la aplicación propia de ensayos y métodos directos para la evaluación estructural, existen varios métodos de cálculo disponibles que, dentro de mi punto de vista entran en esta categoría. El método más común es el referenciado y conocido como Método AASHTO 93.

El diseño de pavimentos es un aspecto fundamental en la construcción de carreteras y vías de transporte. El método de diseño de pavimentos AASHTO 93, desarrollado por la Asociación Americana de funcionarios de Carreteras Estatales y de Transporte (AASHTO, por sus siglas en inglés), es ampliamente utilizado en la ingeniería civil para determinar las dimensiones y espesores adecuados de los pavimentos. Este método se basa en el análisis estructural y las propiedades mecánicas de los materiales utilizados.

El método de diseño de pavimentos AASHTO 93 se compone de varias etapas que deben seguirse para obtener un diseño óptimo y seguro. Primero, se realiza un estudio del tráfico, que implica evaluar el volumen y los tipos de vehículos que circularán por la carretera. Esta información es

crucial para determinar las cargas que los pavimentos deberán soportar y permite clasificar el nivel de servicio del pavimento.

Luego, se procede a realizar el análisis estructural del pavimento. Esto implica evaluar las capas del pavimento y sus características mecánicas, como el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. El método AASHTO 93 utiliza modelos matemáticos y fórmulas empíricas para calcular la capacidad de carga del pavimento y su vida útil esperada.

Se consideran diversos factores en el diseño, como la subrasante del suelo, las capas de base y subbase y la capa de rodadura. La elección de los materiales y espesores para cada capa se basa en las propiedades mecánicas de los mismos y en el tráfico previsto. El objetivo es garantizar que el pavimento sea resistente y duradero frente a las cargas y condiciones climáticas.

Una vez calculadas las dimensiones y espesores necesarios, se procede a realizar una evaluación económica. Esto implica considerar el costo de construcción y mantenimiento del pavimento a lo largo de su vida útil. Se busca encontrar un equilibrio entre la calidad y el costo, para asegurar un diseño eficiente y rentable.

El método de diseño de pavimentos AASHTO 93 es una herramienta confiable y ampliamente utilizada en la ingeniería civil para el diseño de pavimentos viales. Gracias a su enfoque basado en el análisis estructural y las propiedades mecánicas de los materiales, este método permite obtener pavimentos seguros, duraderos y acordes a las necesidades del tráfico. La aplicación del método AASHTO 93 garantiza un dimensionamiento adecuado de las capas del pavimento, considerando las características del suelo, el tráfico y la economía del proyecto.

Ahora, todo lo anterior se sintetiza en una herramienta grafica conocida como ábaco, el cual se creó para determinar el espesor de estructura requerido para diseñar un pavimento que cumpla con los criterios de desempeño y carga anteriormente mencionados para garantizar un desempeño adecuado a lo largo de su vida útil.

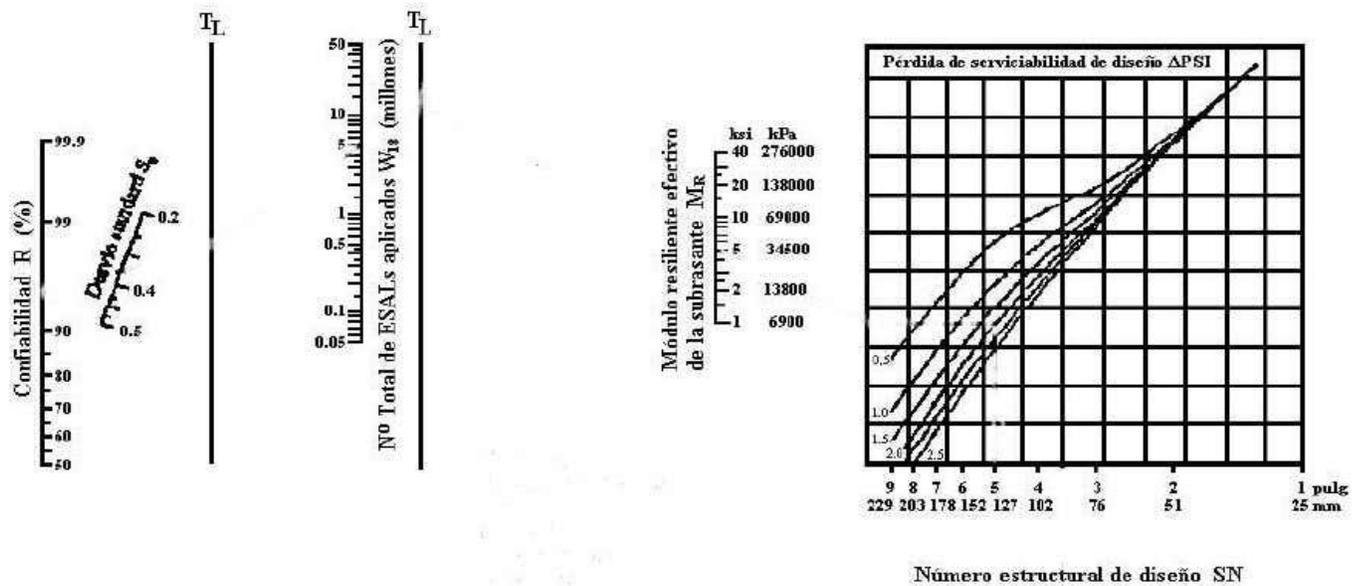


Ilustración 8 Ábaco de diseño AASHTO para pavimentos flexibles
Fuente: AASHTO guide for design of pavement structures

Ahora ya, al evaluar un pavimento existente, el ábaco de diseño de la AASHTO 93 puede utilizarse para determinar si el espesor del pavimento existente es adecuado en función de la condición actual del pavimento y los criterios de diseño seleccionados. Si se identifica que el espesor del pavimento es insuficiente para el tráfico y las condiciones previstas, esto podría indicar la necesidad de un reforzamiento o rehabilitación del pavimento.

Es importante tener en cuenta que el ábaco de diseño es una herramienta empírica y que su uso debe complementarse con otros métodos de evaluación y análisis específicos del proyecto. Además, las consideraciones adicionales, como las condiciones locales, materiales disponibles y factores ambientales, también deben tenerse en cuenta al utilizar el ábaco de diseño para la evaluación de pavimentos.

Lo anteriormente expuesto, es una interpretación propia de la Guía para el diseño de estructuras de pavimento de la AASHTO.

Ahora, de la misma manera, también debemos mencionar que el diseño de pavimentos se ha modernizado conforme avanza la tecnología. Muestra de ello es la implementación de programas computarizados que brindan el apoyo a esta labor.

La herramienta WinPAS es uno de los programas más utilizados para el diseño de pavimentos, ya que ofrece capacidades avanzadas para el análisis y la optimización de estructuras de pavimentos.

WinPAS es una herramienta de software desarrollada por el Centro de Tecnología para Pavimentos y Transporte de la Universidad de Waterloo (CPATT, siglas en inglés) que proporciona una plataforma completa para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos. Esta herramienta se basa en métodos de análisis y diseño estructural de pavimentos para evaluar la capacidad de carga, la vida útil y la seguridad de las carreteras y otras superficies pavimentadas. WinPAS ofrece una amplia gama de funciones y herramientas que ayudan a los ingenieros y diseñadores a realizar análisis detallados y a tomar decisiones fundamentadas en el diseño de pavimentos.

Una de las principales características de WinPAS es su capacidad para realizar análisis tanto estáticos como dinámicos de pavimentos. Esto significa que los ingenieros pueden evaluar cómo diferentes tipos de cargas, incluyendo cargas de tráfico pesado o impactos dinámicos, afectarán al rendimiento del pavimento a lo largo del tiempo. Esta capacidad es crucial para garantizar que los pavimentos sean capaces de soportar las condiciones de carga a las que estarán expuestos durante su vida útil.

Además, WinPAS proporciona herramientas avanzadas para el análisis de materiales de pavimentos, incluyendo la capacidad de modelar la respuesta de diferentes capas de pavimentos a las cargas aplicadas. Esto permite a los ingenieros analizar cómo diferentes combinaciones de materiales y espesores afectarán al rendimiento del pavimento, lo que es esencial para optimizar la estructura del pavimento y minimizar los costos de construcción y mantenimiento.

Otra característica destacada de WinPAS es su capacidad para realizar análisis de fatiga de pavimentos, lo que permite a los ingenieros evaluar cómo el pavimento responderá a los ciclos repetitivos de carga, como los causados por el tráfico pesado. Esto es crucial para prevenir la falla prematura del pavimento y garantizar una vida útil prolongada de la superficie de la carretera.

WinPAS también ofrece capacidades avanzadas de modelado que permiten a los usuarios simular diferentes escenarios de diseño y evaluar el rendimiento del pavimento en condiciones variadas. Esto incluye la capacidad para modelar la interacción suelo-estructura, lo que es fundamental para el diseño de pavimentos en suelos problemáticos o condiciones geotécnicas complejas.

Sin embargo, como cualquier herramienta de software, WinPAS también tiene sus limitaciones y desafíos. Por ejemplo, su uso requiere de conocimientos técnicos sólidos en el diseño de pavimentos y en el manejo de herramientas de software de ingeniería. Además, la precisión de los resultados obtenidos con WinPAS dependerá en gran medida de la precisión de los datos de entrada y de la habilidad y experiencia del usuario en la interpretación de los resultados.

Otro desafío asociado con el uso de WinPAS es la necesidad de mantenerse actualizado con las últimas versiones y mejoras del software, así como de comprender y aplicar las metodologías de diseño y análisis recomendadas por los organismos reguladores y las mejores prácticas de la industria. Además, debido a la complejidad de algunas de sus funciones, el tiempo y la capacitación necesarios para dominar plenamente el uso de WinPAS pueden ser significativos.

3.3. VIBRACIONES

La evaluación de pavimentos, en la actualidad, se realiza más a menudo mediante métodos de vibración. La principal característica de este método es su capacidad para evaluar la calidad y la integridad del subsuelo a través de una variedad de técnicas de medición de vibración, generalmente con el uso de hondas inducidas. Los profesionales de la ingeniería de pavimentos pueden inferir cosas acerca de la condición de la superficie y de los materiales del subsuelo usando el método de vibración.

Uno de los principales métodos de vibración para la evaluación de pavimentos utilizados en la actualidad es llamado medición de resonancia vibratoria. El principio rector de este método es detectar las frecuencias propias de un pavimento haciendo vibrar un dispositivo. Estas frecuencias dependen de la modulación y características del material del subsuelo, lo que permite a los profesionales determinar cualquier variación en la integridad del subsuelo. Otras técnicas comunes de medición de vibración incluyen la medición de velocidad de propagación de las ondas sísmicas, la medición de la respuesta local y la medición de los parámetros de la respuesta del terreno a una vibración.

Los resultados de medición de vibración se pueden aplicar para determinar la condición del pavimento. Se pueden evaluar la estabilidad del pavimento y la resistencia a la fatiga, identificar defectos, progresión potencial de los daños y otras imperfecciones latentes que afecten la calidad del pavimento. Estas mediciones también se pueden comparar con los resultados de otros métodos no invasivos de evaluación para obtener una imagen más completa de la situación.

Los métodos de vibración para la evaluación de pavimentos son una herramienta eléctrica eficaz para determinar la integridad de la superficie y el subsuelo de un pavimento. El método de resonancia vibratoria en particular es ideal para determinar la frecuencia propia del pavimento y proporciona una forma precisa de identificar defectos en la superficie o debajo de ella. Esta

herramienta se puede utilizar en una variedad de usos, desde la construcción nueva hasta la rehabilitación existente.

La prueba de resonancia vibratoria se basa en la excitación de la estructura del pavimento con un martillo neumático, generando ondas de vibración. Estas ondas se propagan a través del pavimento y son captadas por un acelerómetro colocado en la superficie del mismo. La respuesta vibracional se registra y se analiza para obtener información sobre la rigidez y capacidad estructural del pavimento.

La principal ventaja de la prueba de resonancia vibratoria es su capacidad para evaluar grandes áreas en poco tiempo. Esto permite realizar un muestreo representativo del pavimento y obtener resultados confiables de manera rápida y eficiente. Además, al ser una prueba no destructiva, no causa daños en el pavimento, lo cual es particularmente beneficioso en carreteras en funcionamiento.

La interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de resonancia vibratoria se basa en modelos matemáticos y algoritmos específicos. Estos modelos consideran factores como la frecuencia de vibración, la amplitud de la respuesta y la variabilidad de las características del pavimento. A partir de estos datos, se puede determinar la rigidez del pavimento, su capacidad estructural y su nivel de deterioro.

Aunque no es muy común el uso de estas pruebas, es una herramienta óptima para encontrar e identificar puntos específicos donde se presente alguna anomalía en la estructura de pavimento existente.

3.4. IMPACTO

Los métodos de impacto han estado en uso desde hace décadas para evaluar el deterioro de los pavimentos. Estos métodos aplican una fuerza de impacto rápido a una muestra de material de pavimento y miden la estabilidad y la resistencia del material. Estos métodos permiten a los ingenieros evaluar el pavimento con rapidez y precisión sin tener que destruir la sección entera del pavimento.

Los avances tecnológicos han permitido desarrollar métodos cada vez más sofisticados para medir y evaluar los pavimentos. Los resultados han ayudado a optimizar la selección de productos, mejorar el diseño y minimizar la duración de la vida de los pavimentos. Los ensayos de impacto

están entre los métodos más comunes de evaluación de pavimentos. Estos ensayos proporcionan información sobre los efectos de los impactos en la estructura del pavimento. Esta información puede ser útil para ayudar a los responsables de construcción y planificar mejor y determinar el mejor diseño de pavimentos.

Las pruebas de impacto son una forma de evaluar la integridad estructural de pavimentos sin la necesidad de destruir la superficie. Estas pruebas se han convertido en una herramienta importante para comprender la capacidad de los pavimentos para resistir el impacto de la tracción que se produce durante su uso normal.

Las pruebas de impacto generalmente consisten en una forma de medir el esfuerzo en la superficie del pavimento, generalmente se aplicando la fuerza ejercida por la caída de una masa a varios puntos de la superficie. Esto resulta en la generación de deformaciones que se miden usando un dispositivo altamente sensible, las cuales miden impacto y el desgaste que los pavimentos están expuestos durante su uso diario.

La información recopilada a través de estas pruebas puede proporcionar información sobre la resistencia del pavimento, la estabilidad estructural, la consistencia y la resistencia al desgaste.

Las más comunes de estas pruebas van desde el penetrómetro de impacto, la penetración dinámica de cono y el mismo deflectómetro de impacto.

Primeramente, un penetrómetro es un equipo usado para hacer mediciones que caracterizan la estructura de un pavimento. El penetrómetro realiza mediciones específicas sobre la profundidad de penetración, rigidez, resistencia al corte, desplazamiento y poroso. Estas mediciones se usan para evaluar la calidad de los materiales usados en la construcción del pavimento, así como para determinar si es necesario realizar una reparación.

El penetrómetro se basa en el principio de la resistencia al corte. Este principio permite que se mida la fuerza necesaria para penetrar un punto predeterminado en la superficie del pavimento. Esta medición se realiza mediante un anillo de medición equipado con un sistema de sensor, el penetrómetro mide esta fuerza y genera una respuesta para indicar la profundidad de penetración y la rigidez de la superficie. Por lo tanto, el penetrómetro se utiliza para dar una imagen detallada del nivel de rigidez de los materiales que componen el pavimento.

Un deflectómetro de impacto es un equipo utilizado para la realización de una prueba de campo usada para evaluar la calidad de los pavimentos, su rigidez, las potenciales fallas y el grado de desgaste de estos. La prueba utiliza una masa de impacto montada en un vehículo multifuncional,

conocido como Rolling o Roller, en movimiento que se desplaza sobre el pavimento. Al impactar contra la superficie del mismo, la masa genera una fuerza inercial a través de la cual el equipo recoge la información de las señales mecánicas reflejadas en la superficie de la calzada.

La fuerza inercial registra las características proporcionadas por las condiciones a las cuales está inducida, a través del pavimento y penetra a través de la superficie, hasta llegar a la subrasante. Por tanto, el equipo obtiene información detallada acerca de cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento, información que incluye características fundamentales como el espesor y la calidad del material reflejada en la resistencia aportada por la medición de los respectivos módulos de cada una de las capas, desgaste en los agregados, deformaciones reflejadas en cada capa de material, causadas por el mismo impacto de la fuerza anteriormente mencionada, irregularidades de la acomodación del material, principalmente las causadas por una mala compactación del mismo, instalación no homogénea, etc.

Un deflectómetro de impacto es una herramienta de medición que se utiliza para determinar el estado del pavimento. Esta herramienta se usa para determinar si el pavimento está en mal estado, indicando la necesidad de reparación. Esto se logra mediante la medición de la deflexión del pavimento cuando se le aplican cargas de impacto muy breves. Este instrumento es muy útil en el mantenimiento de la infraestructura como carreteras y también para determinar si el pavimento es adecuado para ciertos vehículos. Un deflectómetro de impacto básicamente funciona aplicando una carga a través de una placa de metal o almohadilla equipada con sensores de presión. Esta almohadilla se coloca sobre el pavimento y se pulsa un botón para que se active la placa. Una vez que la placa se ha activado, se leen los datos recogidos por los sensores de presión e interviene el altavoz de la unidad. Estos sensores crean una imagen digital de la deflexión aplicada al pavimento. Entonces, una vez que se tienen los datos, el resultado final se determina en función de la tolerancia permitida para ese pavimento en particular.

CAPÍTULO CUATRO

DEFLEXIÓN COMO PARÁMETRO DE EVALUACIÓN

4.1. MÉTODO DE ANALISIS A PARTIR DE DATOS DE DEFLEXIÓN

Una vez obtenidos los datos de la operación del equipo, éstos se procesan por medio de una técnica analítica conocida como retrocálculo para definir cada uno de los factores que nos ayudaran a comprender las características de cada una de las capas de pavimento que, correspondiente a la respuesta de una carga aplicada y a unas deflexiones producidas, se ven reflejadas. El análisis se puede desarrollar a partir de métodos iterativos, búsqueda en bases de datos, ecuaciones simultáneas, etc.

El método de retrocálculo matemático es una técnica que se utiliza para estimar datos faltantes o estimar patrones relacionados con los datos que se tienen, por lo cual se utiliza para descubrir puntos desconocidos de una relación entre dos variables. El proceso de retrocálculo comienza con el establecimiento de los datos observables presentes en una fuente externa. Esta información luego se aplica a un algoritmo matemático para producir pronósticos sobre el tema en cuestión. Esta información proviene de la realidad, de manera que los resultados obtenidos son más fiables que los estimados basados en teorías diferentes.

El retrocálculo matemático es útil para muchos propósitos, incluyendo determinar los cambios de una característica de un conjunto de datos sobre el tiempo. Por ejemplo, se puede usar para predecir el impacto de una determinada decisión sobre los resultados futuros. Así mismo, este método también permite comparar el comportamiento de un sistema con el de otros sistemas. Esta información se puede usar para entender cómo las variables afectan entre sí en diferentes circunstancias.

El método de retrocálculo matemático es una herramienta útil para las personas que necesitan predecir y comprender el comportamiento de los sistemas o procesos con los que trabajan. Esta herramienta les proporciona una forma de entender la relación entre los datos para tomar decisiones óptimas. Desafortunadamente, cuando no se comprenden completamente los pasos involucrados en el análisis, el proceso de retrocálculo matemático puede producir conclusiones erróneas, por lo cual es importante asegurarse de que se comprendan todos los aspectos del análisis antes de que se tomen decisiones.

Ahora, el método de retrocálculo se ha utilizado desde hace décadas en la evaluación de la calidad de los pavimentos. Esto se debe a que permite no solo determinar el estado actual de los pavimentos, sino también diagnosticar con precisión los daños que han aparecido desde su construcción. Esto es de gran ayuda para tomar decisiones sobre su reparación y mantenimiento. El método de retrocálculo es un proceso de evaluación de los pavimentos que involucra la recopilación de datos históricos y de campo para luego analizarlos con matemáticas para estimar el tiempo de vida útil restante y la necesidad de reparaciones.

El método comienza con un análisis de la información existente para determinar la edad actual del pavimento, el diseño y los materiales utilizados para construirlo, la cual se combina con los datos de histórico de tráfico, clima y mantenimiento para estimar, entre otros factores, la edad del pavimento en diferentes condiciones. Esta información se recopila mediante inspecciones, mediciones de los indicadores de desempeño del pavimento, ensayos de laboratorio y los datos históricos de tráfico y clima.

Para la recopilación de datos, de la cual se habla en el método de retrocálculo, es donde entra a ser importante las pruebas realizadas con los diferentes tipos de deflectómetro de impacto, ya que está debidamente proyectado para que las características de la deformación que este produce, sean variables directas de las ecuaciones matemáticas.

Aplicado a los programas de mantenimiento, producto de la evaluación estructural de los pavimentos existentes, conociendo los valores del esfuerzo vertical aplicado en cada punto, la deformación unitaria, tanto vertical como horizontal, producto de dicho esfuerzo aplicado y la deflexión que este produce, podemos llegar a conocer los datos iniciales que necesitaríamos para garantizar el correcto funcionamiento de la estructura del pavimento como lo son el módulo de elasticidad y de poisson de los materiales de las capas existentes.

Una vez recopilados los datos, se aplicarán los modelos matemáticos para estimar el tiempo de vida útil restante del pavimento y los requisitos necesarios para repararlo. Estos modelos están basados en los análisis de rigidez y pendientes de los pavimentos y en la compresibilidad de los materiales usados para construir el pavimento. Los análisis son completados con métodos de validación para confirmar las estimaciones y así la retrocálculo se puede usar para darle seguimiento a los daños a lo largo del tiempo.

El método de retrocálculo es una herramienta poderosa y eficaz para identificar problemas en los pavimentos y prever su deterioro. Esto permite a los propietarios del pavimento tomar decisiones

informadas sobre su mantenimiento y reparación para extender su servicio con más economía. Este método es una parte importante del abordaje de una evaluación profunda del estado de los pavimentos.

Este procedimiento de análisis involucra la suposición de los valores de módulo elástico para una estructura de pavimento por capas, mediante el cálculo de la deflexión en la superficie a diferentes distancias radiales del punto de aplicación de la carga. Una vez obtenidas las deflexiones calculadas, se comparan con las deflexiones medidas; así, el proceso se repite cambiando el módulo elástico de las capas en cada iteración, hasta que la diferencia entre las deflexiones medidas y las calculadas se encuentren dentro de las tolerancias especificadas, o cuando se haya alcanzado el máximo número de iteraciones. Alternativamente, el procedimiento de análisis puede involucrar investigaciones a bases de datos de cuencas de deflexión calculadas con anterioridad, a partir de módulos de capa y espesores conocidos, hasta que la cuenca se aproxime lo suficiente a la de deflexiones medidas.

Cuando se analiza el comportamiento de un pavimento, se calculan las deflexiones en la superficie y otras respuestas a partir de programas de análisis que utilizan el módulo elástico como insumo. En el retrocálculo se selecciona y ajusta el módulo elástico, de acuerdo con la última deflexión de superficie calculada que mejor se ajustó a las deflexiones conocidas de una superficie.

Sintetizando lo anteriormente dicho, tenemos que, con el método de diseño de la AASHTO fijado en el 1993, tenemos que podemos obtener los factores de medición y, por medio del retrocálculo obtener los valores necesarios para la comprobación de un correcto diseño. Como lo podemos ver en la tabla a continuación, vemos que mediante las variables necesarias para cumplir con el proceso del calculo directo, se pueden obtener por medio del retrocálculo con los datos tomados de las mediciones.

CALCULO DIRECTO		
DATOS		RESULTADOS
E, D_i, μ		$\sigma_z, \epsilon_z, \epsilon_t, d$
CALCULO INVERSO		
RESULTADOS		DATOS
$E, \sigma_z, \epsilon_z, \epsilon_t$		D_i, μ, d

*Tabla 2 Variables de calculo y retrocálculo AASHTO 1993
Fuente: Andrés Giovani Gutiérrez Bayona – UNAL*

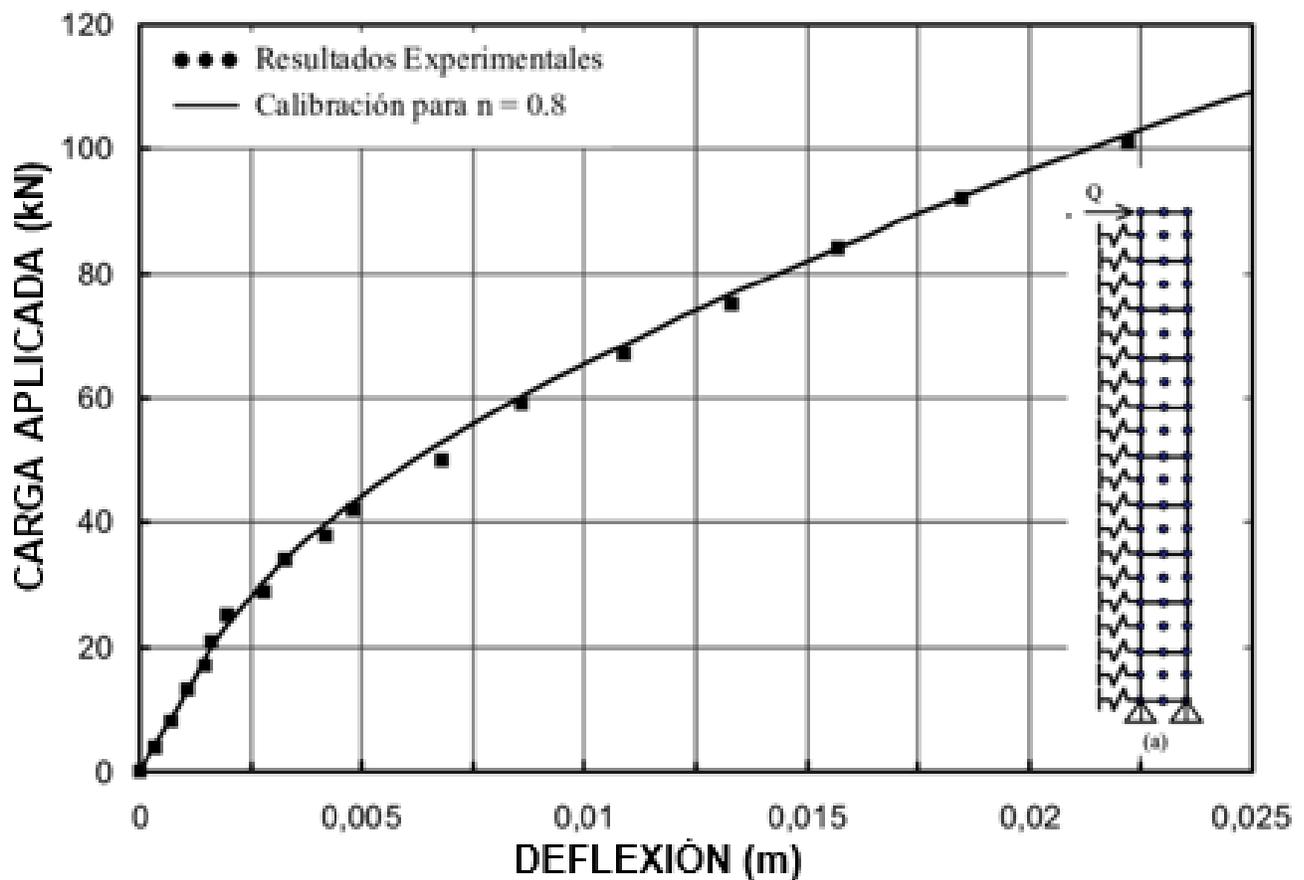
Donde:

- E: Módulo de elasticidad de los materiales.
- D_i : Espesor de cada capa del pavimento
- μ : Modulo de Poisson de los materiales
- σ_z : Esfuerzo vertical en cada punto de la estructura
- ε_z : Deformación unitaria vertical en cada punto de la estructura
- ε_t : Deformación unitaria horizontal en cada punto de la estructura
- d: Deflexión de la estructura de pavimento

4.2. RELACIÓN CARGA – DEFLEXIÓN - TIEMPO

Podemos aplicar la lógica de “entre más carga aplicada, más es la deformación experimentada”, ya que, si graficamos la carga aplicada en uno de los ejes y con resultado, en el otro eje, de la deflexión experimentada, se produce una gráfica con una tendencia ascendente y proporcional entre las dos variables, como lo vemos en la ilustración 9. Por lo cual, lo importante y con mayor relevancia en la gráfica analizada es la dispersión en el tiempo, lo que nos da una idea del rebote de la masa del impacto sabiendo la fuerza de la capa para permitir la deformación, que va directamente relacionado con el concepto de rigidez.

Nos referimos al concepto de rebote de masa, como el tiempo que permanece en contacto la masa con la superficie objetivo del ensayo, donde se produce la deflexión que proporciona los valores referencia para el análisis. Este tiempo depende de varios factores dependiendo de la interacción propia entre la misma masa y la superficie donde se pretende realizar el ensayo, donde el concepto primordial es que la masa rebota en función de la elasticidad y rigidez de la superficie. Lo que quiere decir que, para las mismas condiciones de impacto, entre menor sea el tiempo de rebote de la masa, más rígida y de mejor calidad la capa que se está evaluando.



*Ilustración 9 Curva de Carga aplicada y Deflexión Producida
Fuente: researchgate.net*

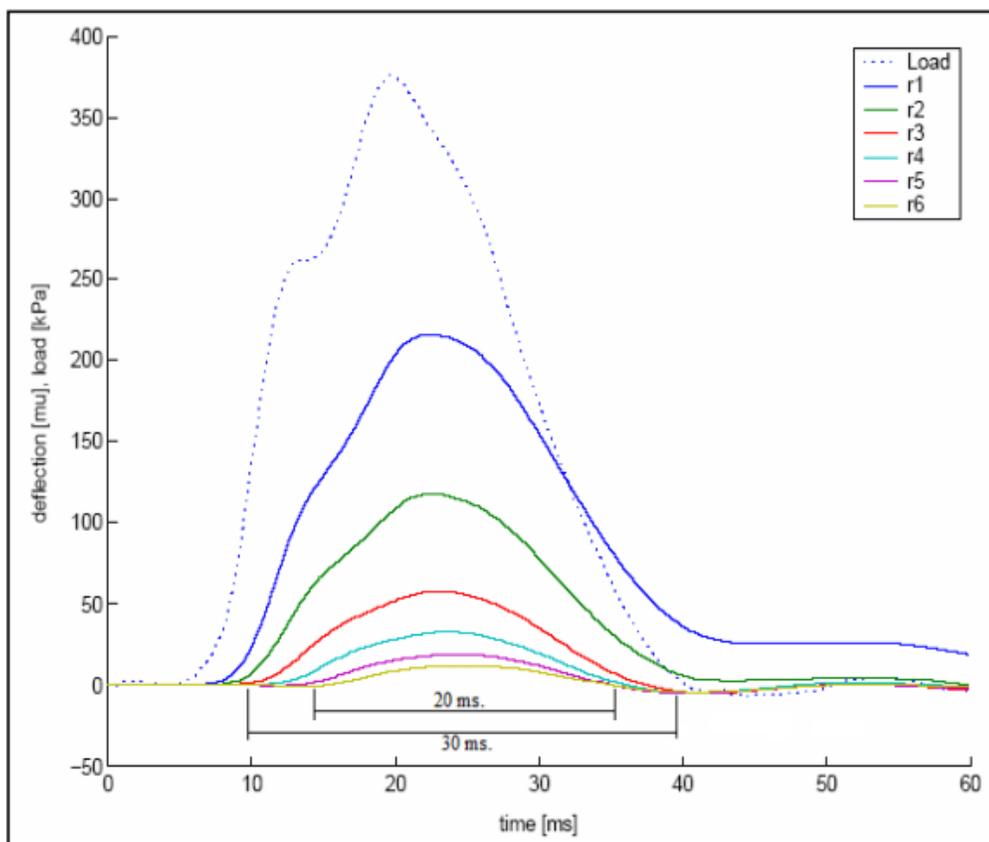
Tres factores a tener en cuenta para visualizar, entender e interpretar de la mejor manera la curva grafica en la ilustración 8: la relación entre la carga aplicada, la deflexión registrada y el tiempo que ha transcurrido en el desarrollo del ensayo, más precisamente el tiempo de contacto entre la masa y la superficie que se está evaluando, mejor detallado como tiempo de rebote.

En general, la gráfica de la relación carga, deflexión y tiempo nos permite tener una visualización clara y precisa de los resultados obtenidos con el deflectómetro de impacto y nos ayuda a identificar posibles problemas en la superficie evaluada. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta gráfica solo nos proporciona una evaluación de la rigidez de la superficie de la capa que se está auscultando y no debe ser la única herramienta utilizada en la evaluación de pavimentos.

Inicialmente, lo primero a notar es la relación directamente proporcional entre la carga aplicada y la magnitud de la deflexión superficial experimentada y, de la misma manera, el tiempo efectivo de la prueba. Visto de otra forma, se aprecia que a medida que aumenta la carga aplicada, la curva

de deflexión se hace más pronunciada y muestra una mayor variación en el tiempo. Por lo cual, como se observa en la gráfica, la carga inicial de la prueba (Load) es la que mayor deflexión produce en las capas del pavimento y, por consiguiente, un mayor tiempo de rebote. Así también, cada una de las cargas aplicadas a continuación (r1, r2, r2...), de menor magnitud, generan menores tiempos de rebote y menores cuencas de deflexión producto de los golpes seguidos.

Ahora, logrando asociar los datos relacionados y las magnitudes de cada uno de ellos, se podría concluir que esta curva puede ser útil para determinar la rigidez de la superficie en estudio, una curva de deflexión más pronunciada y con una menor variación en el tiempo efectivo del impacto o tiempo de rebote, se traduce en una mayor rigidez de la capa objetivo.



*Ilustración 10 Relación Carga – Deflexión – Tiempo
Fuente: Velásquez Rojas 2006*

4.3. CUENCA DE LA DEFLEXIÓN COMO PARÁMETRO DE MEDICIÓN

En geografía, una cuenca es una región delimitada por altitudes en la que las aguas se vierten y circulan por un sistema de drenaje natural hacia un mismo río o lago. Esta área es drenada por un único sistema de drenaje, lo que significa que todas las aguas superficiales, subterráneas y

subterráneas de la zona fluyen hacia el mismo lugar de desagüe. En física, una cuenca, o cuenco, es un espacio limitado por tres o más lados de pendiente descendente y diseñado para recoger y contener líquidos o sólidos.

Apoyándonos en esta definición, una cuenca de deflexión es una deformación geológica delimitada por tres o más lados de pendiente descendente, que se caracteriza por tener una serie de fracturas en su parte inferior, que han provocado el hundimiento del terreno. Estas fracturas pueden ser causadas por diferentes factores, como movimientos tectónicos, erosión o la presión del peso de los sedimentos; en nuestro caso, provocada por la ejecución de una fuerza, producida por el peso que se deja caer sobre la superficie plana del terreno.

Este peso es soltado desde una cierta altura sobre la superficie de la carretera, generando una carga puntual que simula el paso de un vehículo pesado. A medida que se desplaza por la carretera, el deflectómetro de impacto mide la deformación del pavimento, con los datos físicos característicos de esta cuenca.

El proceso de evaluación estructural de pavimentos tiene como objetivo principal determinar la capacidad de carga del pavimento y su resistencia ante diferentes cargas y factores ambientales.

La medición de la cuenca de deflexión de impacto es una de las técnicas más utilizadas en la evaluación estructural de pavimentos debido a que proporciona información útil y fiable sobre el desempeño del pavimento bajo cargas dinámicas. Luego, se registra la relación entre la carga aplicada y la deflexión, lo que se traduce en la cuenca de deflexión de impacto.

Uno de los principales beneficios de utilizar la cuenca de deflexión de impacto como parámetro de medición es que permite evaluar el comportamiento del pavimento en condiciones reales. Esto significa que se pueden simular diferentes tipos de cargas, velocidades y temperaturas para obtener resultados más precisos y representativos de la vida útil del pavimento.

Además, la cuenca de deflexión de impacto proporciona información valiosa sobre la distribución de las deformaciones en diferentes capas del pavimento. Esto es especialmente importante para determinar la presencia de posibles áreas o puntos de falla, lo que permite identificar los posibles lugares en los que se podrían presentar problemas en el futuro.

Otro aspecto a destacar es que la medición de la cuenca de deflexión de impacto es una técnica no destructiva, lo que significa que no se requiere romper ni dañar la superficie del pavimento para obtener datos. Esto reduce considerablemente los costos y el tiempo de evaluación, en comparación con otras técnicas que requieren la extracción de núcleos de pavimento.

Sin embargo, también es importante reconocer las limitaciones de la cuenca de deflexión de impacto como parámetro de medición. Por un lado, esta técnica no proporciona información detallada sobre la estructura interna del pavimento, lo que limita su capacidad para evaluar la calidad de los materiales utilizados en la construcción del pavimento. Además, es necesaria una cuidadosa calibración y toma de datos para garantizar la precisión de los resultados.

Se debe mencionar que para que las características físicas y medidas de dicha cuenca sea utilizadas como parámetro principal de los métodos matemáticos se debe normalizar. La normalización consiste en analizar los datos registrados por el deflectómetro y aplicar un conjunto de técnicas y métodos matemáticos para obtener un perfil uniforme de la cuenca producida. Esto permite obtener mediciones más precisas y confiables de la condición del pavimento en diferentes puntos de la carretera.

Otra razón por la que se debe normalizar la cuenca producida por un deflectómetro es para garantizar la comparabilidad de datos entre diferentes equipos y mediciones. Cada deflectómetro puede tener sus propias características técnicas y métodos de medición, lo que puede afectar la precisión de los datos obtenidos. La normalización permite igualar estas diferencias y obtener mediciones estandarizadas que pueden ser comparadas entre diferentes equipos y a lo largo del tiempo. Esto es especialmente importante en proyectos de mantenimiento y rehabilitación de larga duración, donde se necesitan mediciones precisas y comparables para evaluar la evolución de la condición del pavimento.

Por tal motivo, todas las deflexiones medidas en campo, sin importar las características climáticas en las que se hagan, deben ser corregidas y ser llevadas a una temperatura referencia estandarizada de veinte grados Celsius (20°C), por lo cual se ajusta la deflexión medida con un factor estándar, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$D_{20} = D_T * F_T$$

Ecuación 1

Donde:

- D_{20} : Deflexión normalizada a temperatura de referencia de 20°C
- D_T : Deflexión medida a cualquier temperatura
- F_T : Factor de corrección por temperatura

La Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos (Guide for design of pavement structures, 1993) de la AASHTO, describe el método de corrección por temperatura de deflexiones medidas con deflectómetro, determinando el factor de corrección que debe ser aplicado a la deflexión medida en campo, a un entorno de temperaturas entre 30 °F y 120 °F (0 °C y 50 °C), basándose en los siguientes parámetros.

- La temperatura de referencia se establece en 68 °F (20 °C).
- La medición de la temperatura se puede hacer midiendo directamente la temperatura interna del pavimento, o estimándola a partir de la temperatura superficial del mismo y de la temperatura ambiente.
- Los factores de ajuste de las deflexiones están en función de la temperatura, la composición del firme y el espesor total de las capas asfálticas. Se elaboraron dos gráficas, uno para pavimentos flexibles con base granular y otro para pavimentos semirrígidos con base tratada con cemento portland, como se ven en las siguientes imágenes.

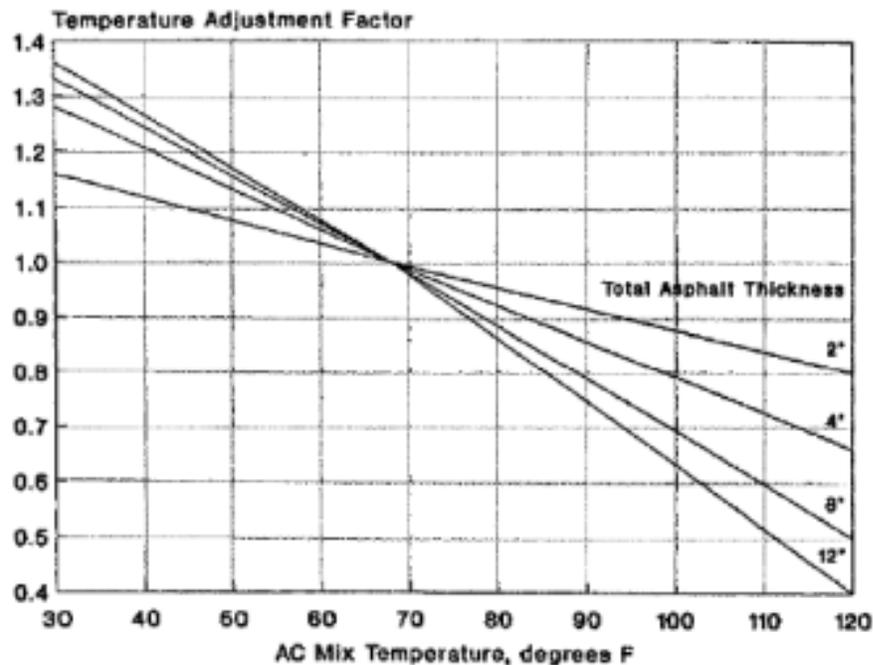


Ilustración 11 Coeficiente ajuste por temperatura, para pavimento flexible con base granular
Fuente: Guide for design of pavement structures, AASHTO, 1993

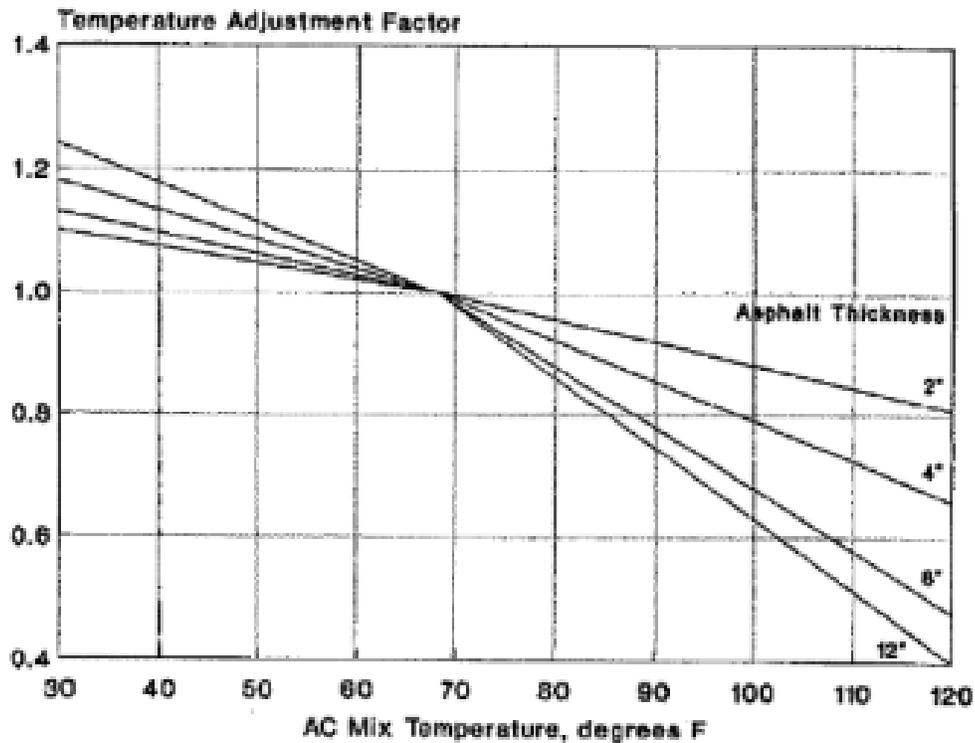


Ilustración 12 Coeficiente ajuste por temperatura, para pavimento semirrígido con base tratada
 Fuente: Guide for design of pavement structures, AASHTO, 1993

De la misma forma, así como se hace con la temperatura, se debe normalizar las deflexiones por el motivo de la carga aplicada para obtener una cuenca de la cual se puedan obtener los datos para el procedimiento de retrocálculo. En este caso, la carga referencia serán cuarenta kilo newtons (40 kN), lo cual es equivalente a un semieje estándar de cuatro punto (4.1) un toneladas. Para tal motivo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_{40} = \frac{P_{40} * D_0}{P_{ensayo}}$$

Ecuación 2

Dónde:

- D_{40} : Deflexión normalizada a carga de referencia de 40 kN, μm
- P_{40} : Carga de referencia
- D_0 : Deflexión medida debajo de la placa de carga, deflexión máxima, μm
- P_{ensayo} : Carga aplicada en el ensayo de campo

CAPÍTULO CINCO

ESTIMACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS CAPAS PARA DETERMINAR ÍNDICES DE CALIDAD, NORMALIZADOS ACTUALMENTE.

5.1. MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE

El módulo resiliente es una propiedad mecánica fundamental utilizada en el campo de la ingeniería de pavimentos para evaluar la capacidad de soporte de la subrasante de una vialidad. Este parámetro es crucial para determinar el diseño y dimensionamiento de una estructura de pavimento, ya que está directamente relacionado con la capacidad de soporte y resistencia al deterioro de la subrasante, la cual es la capa en la que se apoyan todas las demás.

Una vez obtenido el perfil de deflexiones, se procede a realizar el análisis de datos para determinar el módulo resiliente de la subrasante. El análisis se basa en el método de retrocálculo, el cual utiliza algoritmos matemáticos para determinar el módulo resiliente a partir de las deflexiones medidas y los parámetros de la estructura de pavimento.

El cálculo del módulo resiliente a través de deflectometría presenta varias ventajas en comparación con otros métodos tradicionales. En primer lugar, es una técnica rápida y eficiente, ya que permite obtener resultados en tiempo real y realizar evaluaciones en diferentes puntos a lo largo de una vía terrestre. Además, es no destructiva, lo que significa que no se requiere de la excavación de la subrasante para realizar la medición.

Otra ventaja importante es que la deflectometría permite evaluar la variabilidad del módulo resiliente a lo largo de la subrasante, lo que proporciona información adicional sobre la homogeneidad y calidad del material. Esto es especialmente útil en casos donde se presentan heterogeneidades o cambios en las condiciones del suelo a lo largo del tramo proyectado.

Este parámetro se utiliza en modelos de análisis y simulación de pavimentos, permitiendo evaluar la capacidad de soporte de la subrasante y predecir el comportamiento del pavimento frente a cargas y condiciones de tráfico.

Dicho modulo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$M_{rr} = \frac{P (1 - \mu^2)}{\pi D_r r}$$

Donde:

- M_{rr} : Módulo resiliente de subrasante por medio de retrocalculo
- P : Carga aplicada, libras
- μ : relación de Poisson de la subrasante
- D_r : Deflexión medida a una distancia r del centro del plato de carga, pulgadas
- r : Distancia desde el centro del plato, pulgadas

Ahora, para una relación de Poisson estandarizada de 0.5, se simplifica a la siguiente ecuación:

$$M_{rr} = \frac{0.24 P}{D_r r}$$

Ecuación 4

“Para la determinación del módulo M_{rr} se utiliza una deflexión medida a cierta distancia tal, la cual debe estar lo suficientemente lejos para que proporcione una buena estimación del valor de dicho parámetro, pero también lo suficientemente cerca para evitar una deflexión muy pequeña la cual no sería significativa”. (AASHTO, 1993, pág. 220).

Según la metodología de AASHTO la mínima distancia a la que se debe considerar la deflexión, se expresa como:

$$r \geq 0.7 * a_e$$

Ecuación 5

$$a_e = \sqrt{\left[a^2 + \left(H_T^2 \sqrt{\frac{E_p}{M_{rr}}} \right)^2 \right]}$$

Ecuación 6

Donde:

- a : Radio de la placa de carga del equipo dinámico
- H_T : Espesor de la estructura del pavimento, pulgadas
- E_p : Módulo elástico de la estructura del pavimento, psi

La ecuación 6, se utiliza como comprobación para verificar que la distancia a la que se realizó el ensayo es la adecuada y que el resultado obtenido es correcto.

Sin embargo, dicho módulo obtenido por retrocálculo no es el real y, por lo cual, se debe ajustar. Como lo expresa la siguiente ecuación, se debe utilizar un factor C para dicho propósito:

$$M_r = C * M_{rr}$$

Ecuación 7

Donde:

- M_r : Módulo resiliente de la subrasante
- M_{rr} : Módulo resiliente de subrasante por medio de retrocálculo
- C : Factor de ajuste

El factor C, es un coeficiente definido para correlacionar los datos obtenidos de las pruebas no destructivas en campo y los ensayos de laboratorio de módulo resiliente. En la AASHTO 93, la selección de dicho valor se dejaba a la potencial ejecución de ensayos de verificación y en los casos donde no existía ningún tipo de certidumbre acerca del tipo de subrasante presente, se usaba de forma generalizada un factor de 0.33. Ahora el factor de corrección para subrasantes de pavimentos con bases o subbases granulares, según recomendaciones de dicho organismo, varía entre 0.3 y 0.4.

Una vez conocido el Módulo Resiliente MR, y el espesor total de la estructura del pavimento HT, la cual se asienta sobre la subrasante; se puede calcular el módulo elástico del pavimento (E_p).

5.2. MÓDULO ELÁSTICO

El Módulo Elástico es una medida de la rigidez del pavimento y se utiliza como indicador de su resistencia y capacidad para soportar cargas. Es uno de los parámetros más utilizados en el diseño y el mantenimiento de las carreteras.

Dicho módulo se obtiene a partir de las mediciones de la deflexión vertical y las características geométricas del pavimento. Las mediciones de deflexión se realizan a diferentes distancias desde la carga aplicada, lo que permite obtener una distribución de deflexión a lo largo de la sección transversal del pavimento. Estos datos se utilizan para calcular el módulo de deformación del pavimento en diferentes profundidades.

Este Módulo Elástico es un parámetro importante utilizado en el diseño y mantenimiento de las carreteras. Permite evaluar la capacidad estructural del pavimento y determinar su vida útil restante. Además, el módulo dicho se utiliza para determinar la necesidad de rehabilitación o refuerzo del pavimento y para evaluar los efectos de las cargas de tráfico en la vida útil del pavimento.

El cálculo para la determinación de este módulo se realiza utilizando modelos matemáticos desarrollados a partir de estudios y experimentos. Estos modelos tienen en cuenta la relación entre la deflexión y el módulo de deformación para obtener el módulo elástico. Los modelos también consideran el número de ejes equivalentes que pasa por el pavimento y la velocidad de diseño. Lo anterior, sintetizado en la siguiente ecuación:

$$d_0 = 1.5 * p * a * \left[\frac{1}{M_r \sqrt{1 + \left(\frac{D^3}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_r}} \right)^2}} + \left(\frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{E_p} \right) \right]$$

Ecuación 8

Donde:

- d_0 : Deflexión central corregida por carga y temperatura, μm o mm
- p : Presión del plato de carga, psi o Mpa

- a: Radio del plato de carga, pulgadas o mm
- D: Espesor total de las capas de pavimento, pulgadas o mm
- Mr: Modulo resiliente corregido de la subrasante, psi o Mpa
- Ep: Modulo elástico de las capas que componen el pavimento, psi o Mpa

Nota: se debe acarrar una concordancia según el sistema de unidades con el que se pretenda trabajar, ya que si se elige evaluar la presión del plato en psi se deben utilizar los módulos con el mismo sistema y los factores de distancia deben ser referenciados en pulgadas. Ahora, si por el contrario, la presión y los módulos se calculan en unidades de Mpa, los factores de distancia se deben utilizar en milímetros.

5.3. NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO

El Número Estructural Efectivo (SN) es un parámetro importante en la evaluación de pavimentos de carretera de acuerdo con las especificaciones de la AASHTO. El SN es un indicador de la resistencia estructural de un pavimento y se utiliza para estimar la vida útil y el rendimiento del mismo.

La evaluación del pavimento basada en el SN es una herramienta clave para determinar la capacidad de carga del pavimento y predecir su deterioro a lo largo del tiempo. Se utiliza para evaluar la resistencia de un pavimento a la fatiga por cargas repetidas, lo que es fundamental para garantizar la seguridad y durabilidad de la infraestructura vial.

La evaluación de pavimentos basada en el SN se utiliza para tomar decisiones informadas sobre la reparación, rehabilitación o reconstrucción de carreteras, lo que puede ayudar a maximizar la eficiencia de los recursos y prolongar la vida útil de la infraestructura vial. Además, el SN es una herramienta importante para la planificación a largo plazo de la red de carreteras, ya que permite identificar los tramos de pavimento que requieren atención prioritaria y asignar recursos de forma estratégica.

La AASHTO especifica tres formas diferentes de calcular este parámetro donde se tiene en cuenta, de formas diferentes, datos de diseño, materiales, tráfico y condiciones ambientales y, según la manera de calcularlo, los factores que influyen en el SN incluyen el espesor de las capas de pavimento, las propiedades de los materiales utilizados, el tipo y volumen de tráfico, y la temperatura ambiental.

Para nuestro caso, tratando específicamente en el desarrollo del tema mismo, vamos a ilustrar el que muestra propiamente la deflectometría aplicada al caso. Teniendo esto en cuenta, los principales parámetros que tiene en cuenta es el módulo resiliente de la subrasante, el módulo elástico, y el espesor total de la estructura de pavimento. Siendo así, se determina mediante la siguiente expresión:

$$SN_{eff} = 0.0045D^3\sqrt{E_p}$$

Ecuación 9

Donde:

- SN_{eff} : Número Estructural Efectivo
- D: Espesor total del pavimento, pulg
- E_p : Modulo elástico del pavimento, psi

5.4. ANÁLISIS DE SERVICIO

Después de la obtención de cada uno de los factores anteriormente descritos y con el conocimiento de como se deben calcular, debemos aplicarlos para plantear las soluciones de mantenimiento recomendado, dependiendo de cada una de las situaciones particulares presentadas en la vialidad estudiada.

Para lo cual, primero se debe realizar el estudio de transito soportado y, así mismo, teniendo en mente la realización de un mantenimiento que se quiere proyectar para su correcto funcionamiento. De este concepto recientemente expuesto, sale la designación de vida útil de la vía, lo cual se profundizará más adelante.

Entonces así, utilizando la ecuación general de diseño propuesta por la AASHTO, se puede obtener el tránsito representado en la equivalencia de ejes de 8.2 toneladas en el carril analizado o, de la misma ecuación, el número estructural (SN) para el diseño del respectivo refuerzo de la estructura con una sobrecapa, generalmente, de material asfáltico. Lo anterior, apoyados en la ecuación siguiente:

$$\text{Log } N_{8.2t} = Z_r * S_o + 9.36 \text{ Log } (SN + 1) - 0.2 + \left[\frac{\log \left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} \right] + 2.32 \text{ Log } Mr - 8.07$$

Ecuación 10

Donde:

- N 8.2t: Transito equivalente de 8.2 toneladas en carril analizado durante un periodo definido
- Zr: Parámetro estadístico asociado al nivel de confianza
- So: Error estándar combinado de la predicción del tráfico y de la predicción del comportamiento estructural
- SN: Número Estructural
- ΔPSI: diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial y final
- Mr: Modulo resiliente de la subrasante, lb/pulg²

5.5. ESPESOR DE LA SOBRECARPETA

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de aplicar una sobrecarpeta asfáltica es mejorar la superficie de una estructura de un pavimento existente. Esto es necesario cuando se presenta un deterioro en el pavimento y este tratamiento ayudar a restaurar la integridad estructural y funcional del pavimento. Como se da a entender, este tratamiento cumple con el objetivo de mejorar la superficie que se nota deteriorada, comparándola con el estado inicial de la misma.

Partiendo del concepto de comparación expuesta anteriormente, la finalidad de esto es recuperar la capacidad estructural y funcional de la vialidad. Para lo cual, basándonos en datos previos de la puesta en operación inicial de la vía, tenemos que ayudarnos de la siguiente ecuación para definir un espesor de sobrecarpeta para lograr la misma capacidad instalada inicial de la vía.

$$D_{ol} = \frac{SN_f - SN_{eff}}{a_{ol}}$$

Ecuación 11

Donde:

- D_{ol} : Espesor de la sobrecapa, pulgadas

- SNf: Número estructural requerido
- S_{Neff}: Número estructural efectivo del pavimento existente
- a_{ol} : Coeficiente estructural del material del refuerzo

5.6. VIDA RESIDUAL DEL PAVIMENTO

La AASHTO proporciona directrices y estándares ampliamente reconocidos en la industria para el diseño, construcción y mantenimiento de infraestructura vial, incluidos los pavimentos. En términos de vida residual de pavimentos, la AASHTO aborda el tema en términos de la condición del pavimento y la predicción del tiempo que prestará el servicio eficientemente, antes de requerir una reparación significativa o reemplazo total del mismo.

Para llegar a hablar de vida residual, se tiene que tener en cuenta los factores desarrollados anteriormente, dentro de los cuales está la evaluación de la condición presente del pavimento, el análisis de carga y tráfico anteriormente mencionado, el historial de previos mantenimientos y reparaciones e, implícitamente incluido, factores influyentes como son los proporcionados por el clima y el ambiente.

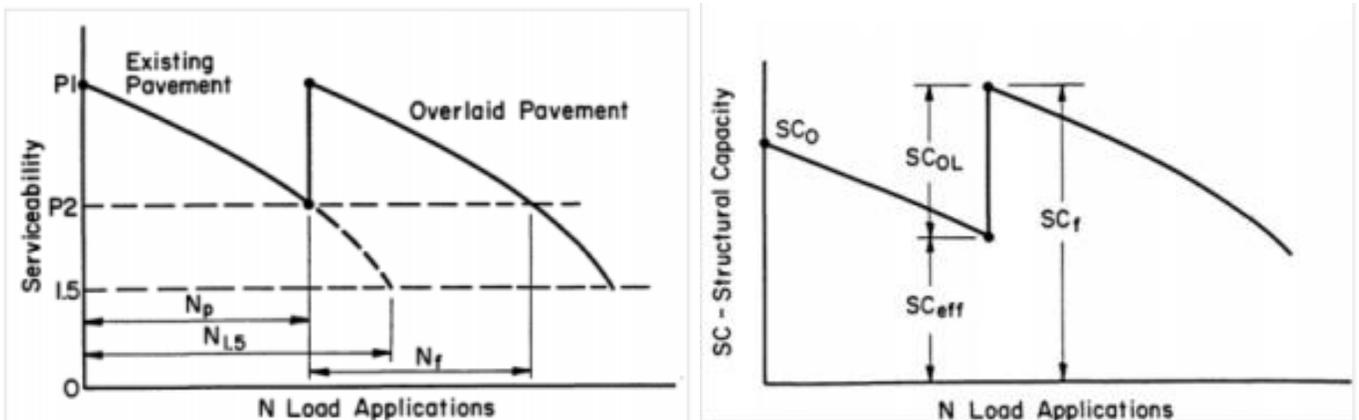


Ilustración 13 Deterioro de la Capacidad Estructural y Nivel de Servicio, según carga aplicada
Fuente: Guide for design of pavement structures, AASHTO, 1993

Como lo vemos en la grafica anterior, conforme se repite la aplicación de carga al pavimento, disminuye significativamente tanto la capacidad estructural como el índice de servicio del mismo. De la misma manera, se logra observar que la única forma de recuperarlo es con intervenciones de conservación y mantenimiento y demás actuaciones en función del mismo objetivo.

De allí, surge el concepto de vida residual, en porcentaje, que se puede entender mejor con la siguiente ecuación:

$$Vr = \left[1 - \frac{n}{N} \right] * 100$$

Ecuación 12

Donde:

- Vr: Vida Residual del pavimento, %
- n: Número de aplicaciones de carga hasta el momento de rehabilitación
- N: Número de aplicaciones de carga que puede soportar el pavimento existente, desde su construcción o su última rehabilitación, hasta alcanzar la falla.

CAPÍTULO SEIS

ESTIMACIÓN PARA DETERMINAR CBR – CALIFORNIA BEARING RATIO MEDIANTE CORRELACIONES BASADAS EN MEDIDAS DE DEFLECTOMETRÍA.

6.1. ESTIMACIÓN DEL CBR – CALIFORNIA BEARING RATIO

El Índice de Soporte de California (California Bearing Ratio, CBR) es un parámetro utilizado para determinar la capacidad de soporte relativa de un suelo para el diseño de pavimentos y la evaluación de su capacidad de carga. El CBR se define como la relación de la presión necesaria para penetrar un suelo con una muestra controlada a una cierta profundidad a la presión necesaria para penetrar el mismo suelo a la misma profundidad con una muestra estándar de material granular compactado. Este índice se utiliza para evaluar la calidad del suelo, lo que permite determinar la capacidad de soporte del suelo en función de su densidad y humedad relativa.

El ensayo de CBR, de la manera tradicional, implica la aplicación de cargas a una muestra de suelo de tamaño estándar en condiciones de humedad controlada. La muestra de suelo se coloca en un molde cilíndrico y se compacta en capas, utilizando un martillo normalizado. Luego, se aplica una carga a la muestra a una velocidad especificada y se registra la penetración. La relación entre la carga aplicada y la penetración resultante se utiliza para calcular el valor del CBR.

El valor del CBR se expresa como un porcentaje, donde un suelo con un CBR del 100% se considera que tiene una capacidad de soporte muy alta, mientras que un suelo con un CBR del

0% se considera que tiene una capacidad de soporte muy baja. Los suelos con valores de CBR entre estos extremos se consideran tener capacidades de soporte intermedias. En la práctica, el CBR puede variar significativamente según el tipo de suelo, la densidad, la humedad y otros factores ambientales. Por lo tanto, es crucial realizar ensayos de CBR en el laboratorio para determinar las propiedades del suelo y calcular con precisión el valor del CBR para un sitio específico.

El valor del CBR también puede utilizarse para clasificar los suelos y predecir su comportamiento bajo carga. Los suelos con valores de CBR más altos suelen ser más adecuados para el diseño de pavimentos, mientras que los suelos con valores de CBR más bajos pueden requerir medidas adicionales, como el refuerzo del suelo o el aumento del espesor del pavimento, para satisfacer los requisitos de capacidad de carga.

Además, el CBR se puede utilizar para evaluar la idoneidad de los suelos en la construcción de terraplenes y cimientos, así como para determinar la necesidad de mejoras en el suelo, como la estabilización química o mecánica, para satisfacer los requisitos de capacidad de carga.

Centrándolo para lo que nos compete, arraigándolo al tema principal del presente documento, el método de ensayo CBR es una herramienta crucial para los ingenieros civiles y geotécnicos, ya que proporciona información importante para el diseño de carreteras, pavimentos, aeropuertos, entre otras, para nuestro caso, brinda la misma aplicabilidad a la inversa. Este índice se utiliza para estimar la capacidad que tiene el suelo para soportar cargas, lo que resulta fundamental para garantizar la seguridad y durabilidad de las estructuras de pavimentos.

El CBR se utiliza en el diseño de pavimentos para determinar el espesor adecuado y la cantidad de refuerzo necesario para soportar las cargas esperadas durante la vida útil de la estructura. Teniendo en cuenta el desgaste y pérdida de capacidad de la misma estructura durante su vida útil, el concepto de soporte de las cargas de servicio se hace aplicable a la recuperación de esta misma capacidad. Es decir, se aplica para retomar niveles de calidad con el apoyo al diseño de una sobrecapa, en el caso que sea necesario para la recuperación del buen funcionamiento del pavimento y del servicio que el mismo brinda.

Para sintetizar esto último con el objeto del desarrollo del presente documento, tenemos que decir que el Deflectómetro de Impacto tiene la capacidad de obtener dicho índice, igual que para otros índices anteriormente descritos, por medio de correlaciones que, principalmente, se han encontrado luego de realizar miles de mediciones e interacciones y llegando a resultados en base

a la experiencia y la practica del ensayo. Sin embargo, el uso del deflectómetro para determinar el CBR no ha sido objetivo de la redacción de una norma específica, desde mi punto de vista, por varias razones:

De las cosas más relevantes es que el CBR se determina típicamente a través de ensayos de laboratorio que siguen estándares y procesos específicos, basados en procedimientos que han sido estudiados y ampliamente comprobados y que se han establecido a lo largo de los años para garantizar la consistencia y la precisión de los resultados, por lo cual el uso de herramientas de campo, como las propias de la deflectometría, para determinar el CBR pueden no llegar a cumplir con los requisitos de precisión y control de calidad que se establecen en los métodos de laboratorio.

Otra razón para la falta de normas institucionales frente al uso del deflectómetro para determinar el CBR es la diversidad de equipos y procedimientos utilizados en la realización de las pruebas de campo. Existen múltiples fabricantes de equipo, cada uno con sus propias especificaciones y metodologías de prueba. Esta diversidad dificulta la estandarización de los procedimientos y los criterios de aceptación para el uso del deflectómetro en la determinación del CBR. Así mismo, la interpretación de los datos para estimar el CBR puede requerir métodos empíricos o correlaciones específicas para cada tipo de suelo y condición del sitio, lo que dificulta la formulación de un enfoque estandarizado que se aplique universalmente.

Además de lo anterior, el deflectómetro se utiliza principalmente para evaluar las propiedades dinámicas de un pavimento o suelo, teniendo como factor principal de medición la deflexión bajo carga. Si bien la deflexión medida puede correlacionarse con la resistencia del suelo, existen numerosas variables que pueden influir en esta relación, como la humedad del suelo, la compactación, la heterogeneidad del terreno, entre otros. Estas variables pueden dificultar la estandarización del uso del deflectómetro para determinar el CBR, ya que su efecto en la relación entre la deflexión y el CBR puede variar según las condiciones específicas del sitio.

No obstante, si es posible la obtención del índice de CBR mediante el uso directo de la deflectometría, de dos maneras distintas. La primera basada en la obtención inicial del Módulo Resiliente (MR), de forma numérica como se describió en las ecuaciones anteriores, de donde sale una correlación directa.

Vale mencionar que el uso de correlaciones para la determinación de este parámetro no es completamente recomendable, ya que es un aproximado que está basado en la comparación de miles de pruebas y resultados dados por la practica del mismo, donde han influido muchas

variables no uniformes. Su uso es recomendable teniendo en cuenta una experiencia alta frente al tema y una verificación de factibilidad frente a una serie de factores que pueden alterar directamente la asertividad y veracidad de los resultados producto de las correspondientes operaciones matemáticas.

De esta manera, las correlaciones más reconocidas y que nos aportan una alta asertividad, comparándola con los valores obtenidos de laboratorio, son las siguientes:

- Correlación de Shell

$$MR (MPa) = 10 CBR$$

Ecuación 13

- Correlación Powell Et Al

$$MR (MPa) = 17.6 CBR^{0.64}$$

Ecuación 14

- Correlación AASHTO

$$MR (MPa) = 10.34 CBR$$

Ecuación 15

Generalmente, en un proyecto, son aplicadas las tres numéricamente y, para evitar el error producido, son promediados los resultados para tener un valor más correcto del ejercicio.

Por el otro lado, también es posible estimar el CBR directamente con los valores de deflexión. Como se menciona en los textos de Chai et al. (2013), las deflexiones registradas en el sensor D900 del deflectómetro, ubicadas a 900 mm del centro de la placa de carga, son las que generalmente se emplean en los modelos de correlación. Estos modelos mencionados, utilizados principalmente en países asiáticos y de Oceanía, fueron desarrollados por Jameson (1993), Roberts et al (2006) y Queensland Department of Main Roads (QDMR, 1992), y son citados en el

texto anteriormente dicho. Particularmente, estos tres métodos nos dan un concepto de independencia en la respuesta que presenta la estructura de pavimento en general con lo experimentado por la capa subrasante respecto a lo leído en el sensor D900 teniendo en cuenta el cuenco de deflexión que experimenta la capa de rodadura. Las expresiones propias de estos métodos, son las siguientes:

- Correlación de Jameson

$$CBR_{subrasante} = 1836 (D_{900})^{-1.018}$$

Ecuación 16

- Correlación de Roberts

$$CBR_{subrasante} = 850 (D_{900})^{-1}$$

Ecuación 17

- Correlación de Jameson

$$CBR_{subrasante} = 0.5996 (D_{900})^{-1.4543}$$

Ecuación 18

El uso del deflectómetro de impacto para determinar el California Bearing Ratio (CBR) conlleva varias ventajas significativas. En primer lugar, el deflectómetro de impacto es una herramienta rápida y eficiente para evaluar la capacidad de soporte de un suelo, ya que puede realizar mediciones directamente en el terreno, lo que permite obtener resultados inmediatos. Esto es especialmente útil para proyectos de construcción y mantenimiento de carreteras, donde la rapidez y la precisión son fundamentales.

Otra ventaja importante es la capacidad del deflectómetro de impacto para proporcionar mediciones en tiempo real. Esto permite que los ingenieros y técnicos obtengan datos instantáneos sobre la capacidad de soporte del suelo, lo que les permite tomar decisiones informadas de forma rápida durante la fase de diseño o construcción. Además, el uso del deflectómetro de impacto

ofrece la ventaja de ser un método no destructivo, lo que hace que no requiere la extracción de muestras de suelo, lo que reduce los costos y el tiempo asociados con los métodos tradicionales de evaluación del CBR.

El deflectómetro de impacto también es una herramienta versátil que puede utilizarse en una amplia variedad de condiciones de suelos y situaciones topográficas. Puede proporcionar mediciones precisas en suelos cohesivos y granulares, así como en diferentes tipos de superficies de pavimento, lo que lo hace adecuado para proyectos en diversos entornos geográficos y climáticos.

Otra ventaja clave es la capacidad del deflectómetro de impacto para evaluar la uniformidad del suelo. Al proporcionar mediciones en múltiples ubicaciones a lo largo de una carretera o sitio de construcción, puede identificar variaciones en la capacidad de soporte del suelo que pueden influir en el diseño y la construcción de la infraestructura.

CAPÍTULO SIETE

COMPARACIÓN DEL DEFLECTOMETRO DE IMPACTO Y DEL DENSIMETRO NUCLEAR, ALTERNATIVA DE USO

7.1. DENSIMETRO NUCLEAR

El estudio y evaluación de la densidad de los pavimentos son aspectos fundamentales en la ingeniería civil y la construcción de carreteras. Para llevar a cabo esta tarea, el densímetro nuclear se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada debido a su capacidad para medir la densidad in situ de manera rápida y precisa. Este ensayo proporciona información crucial para garantizar la durabilidad y el rendimiento estructural de las capas de pavimento. El densímetro nuclear es un instrumento utilizado en la industria de la construcción para medir la densidad y la humedad de los suelos y materiales de construcción. Este dispositivo utiliza fuentes radiactivas para determinar la densidad de los materiales de una manera rápida y precisa.

Una de las aplicaciones más comunes del densímetro nuclear es la determinación de la densidad del suelo durante las actividades de construcción. La compactación adecuada del suelo es esencial para garantizar la estabilidad y durabilidad de las estructuras, y el densímetro nuclear permite a los ingenieros y contratistas realizar mediciones precisas de la densidad del suelo en el lugar de

trabajo. Esto les brinda la capacidad de ajustar y controlar el proceso de compactación para cumplir con los estándares requeridos.

El principio de funcionamiento de un densímetro nuclear se basa en la emisión de radiación gamma a partir de una fuente radiactiva, que penetra en el material que se está probando. La radiación gamma se atenúa a medida que atraviesa el material, y la cantidad de atenuación está directamente relacionada con la densidad del material. El densímetro nuclear opera mediante la emisión de radiación a través de una fuente radiactiva, generalmente Cesio-137 o Americio-241, la cual interactúa con los átomos del material en el que incide, y parte de ella es absorbida en proporción a la densidad del material. Un detector mide la radiación que es absorbida y utiliza esta información para determinar la densidad del material, al medir la tasa de atenuación de la radiación gamma, el densímetro nuclear puede determinar la densidad del material de forma precisa.

En el caso de proyectos de ingeniería vial, el densímetro nuclear se utiliza para verificar la densidad del suelo de cada una de las capas previas a la colocación de la capa de rodadura del pavimento. Esta información es crucial para garantizar que la carretera tenga la resistencia necesaria y pueda soportar el tráfico y las cargas previstas. Además, la capacidad del densímetro nuclear para medir la humedad del suelo es fundamental, ya que la cantidad de humedad en el suelo influye en su capacidad de soporte y en la efectividad de la compactación. Otra área en la que el densímetro nuclear es de gran importancia es en la evaluación de la calidad de los suelos utilizados en la construcción de cimientos. La capacidad de medir la densidad y la humedad del suelo permite garantizar la idoneidad del suelo para soportar cargas estructurales y prevenir problemas como asentamientos diferenciales.

Además de su uso en suelos, el densímetro nuclear también se aplica en la evaluación de la densidad y humedad de materiales de construcción como bases granulares, mezclas asfálticas y concretos, lo que contribuye a garantizar la calidad y durabilidad de las estructuras y pavimentos; de este modo, se hace importante a la hora de la realización de trabajos y procedimientos para encontrar factores para la identificación de la vida útil restante de los pavimentos y, si es necesario, el apoyo a brindar los datos necesarios para la elaboración de planes para la recuperación de la misma.

Es importante destacar que el uso del densímetro nuclear también está regulado por normativas específicas que establecen requisitos para la seguridad radiológica y la capacitación de los operadores. Estas regulaciones buscan garantizar que el uso de fuentes radiactivas se realice de manera segura y que los riesgos asociados con la radiación ionizante sean controlados de manera

efectiva. Antes de usar un densímetro nuclear, es importante recibir la formación y la certificación necesarias para su manipulación segura y adecuada. La persona que lo utilice debe seguir todas las regulaciones y normativas locales relacionadas con la radiación y la seguridad.

En relación con la precisión de las mediciones, el uso adecuado del densímetro nuclear y la interpretación cuidadosa de los resultados son fundamentales para obtener datos confiables. Factores como la calibración del equipo, la corrección por influencias externas y la comprensión de las limitaciones del método son cruciales para garantizar la precisión de las mediciones.

Sin embargo, no es lo mismo evaluar un pavimento que se pretende construir nuevo a evaluar uno ya existente y que ha tenido operación donde, en este último caso, aunque no se considera un método destructivo, se debe “alterar” la naturalidad del pavimento y de su estructura para poder ser intervenido con este equipo.

En este punto, vale mencionar que este es el equipo más utilizado para la identificación de densidad y compactación de los materiales utilizados en las obras viales en Colombia; desde hace un tiempo se ha presentado como la primer alternativa tenida en cuenta para la realización de este trabajo.

7.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS COMPARATIVAS

Las ventajas comparativas del uso del densímetro nuclear en la industria de la construcción son numerosas y significativas. En primer lugar, el densímetro nuclear ofrece una medida rápida y precisa de la densidad y la humedad de los materiales granulares utilizados en la construcción de nuestros pavimentos. A diferencia de otros métodos tradicionales de medición, que pueden ser laboriosos y propensos a errores, el densímetro nuclear proporciona resultados en cuestión de minutos con una alta precisión. Esto mejora la eficiencia de los procesos de construcción y reduce los costos asociados con la supervisión y el control de calidad.

Además, el uso del densímetro nuclear permite realizar mediciones no destructivas, esto significa que se pueden obtener datos precisos sin dañar el material en cuestión, lo que resulta fundamental en la industria de la construcción, principalmente en las vías, donde la integridad de los materiales es crucial para la seguridad y la durabilidad de las estructuras. Otra ventaja importante es la capacidad del densímetro nuclear para proporcionar mediciones en puntos específicos, lo que permite identificar variaciones en la densidad y la humedad a lo largo del tramo objetivo de estudio.

Esto es esencial para garantizar uniformidad en la densidad del suelo, la calidad del asfalto y el concreto, así como de los materiales que componen las otras capas y para detectar posibles problemas que puedan surgir durante la construcción.

El densímetro nuclear también es altamente resistente y puede utilizarse en una variedad de condiciones ambientales, lo que lo convierte en una herramienta versátil que puede emplearse en diferentes tipos de proyectos de construcción, desde carreteras de menor tamaño hasta en proyectos de gran envergadura como autopista interestatales, grandes superficies industriales o pistas para aeronaves de grandes especificaciones.

Por otro lado, es importante mencionar que el uso del densímetro nuclear está sujeto a regulaciones estrictas debido a la naturaleza radiactiva de la fuente de utilizada en este instrumento; así mismo, el manejo, almacenamiento y transporte de los densímetros nucleares debe cumplir con rigurosas normas de seguridad.

Conforme a lo anterior, a pesar de sus numerosas ventajas, el uso del densímetro nuclear también presenta desventajas comparativas que deben ser consideradas al evaluar su aplicabilidad en diferentes contextos. Una de las principales desventajas es su potencial impacto en la salud y el medio ambiente. Dado que este utiliza fuentes radiactivas para realizar mediciones, existe el riesgo de exposición a la radiación para los operadores y otras personas en el entorno de trabajo. Si no se maneja adecuadamente, la radiación emitida por el densímetro nuclear puede tener consecuencias negativas para la salud a corto y largo plazo.

Otra desventaja comparativa del densímetro nuclear es la necesidad de expertos calificados y capacitados en seguridad radiológica para operar el equipo, ya que el uso inadecuado del densímetro nuclear por personal no capacitado puede aumentar el riesgo de exposición a la radiación y la posibilidad de errores en las mediciones. La capacitación y la certificación en seguridad radiológica son requisitos fundamentales, exigidos por las entidades reguladoras competentes, para el uso responsable del densímetro nuclear, lo que agrega una capa adicional de complejidad y costo al empleo de este equipo.

Además, el costo inicial y los gastos continuos asociados con el densímetro nuclear representan otra desventaja comparativa significativa. El equipo en sí puede ser costoso de adquirir, y se requiere un mantenimiento regular, calibración y pruebas de rendimiento para garantizar su precisión y fiabilidad. Además, los requisitos normativos y de seguridad pueden generar costos adicionales en términos de capacitación, licencias y cumplimiento de regulaciones.

Otro aspecto a considerar es la movilidad y la logística asociadas con el uso del densímetro nuclear. Dado que el equipo es radiactivo, su transporte y manipulación deben cumplir con regulaciones estrictas, lo que puede generar limitaciones en términos de movilidad y acceso a sitios de trabajo remotos o de difícil acceso. La logística para el transporte seguro de equipos radiactivos agrega complejidad operativa y puede afectar la eficiencia de las mediciones en proyectos de construcción en ubicaciones remotas.

Ahora, que en muchas ocasiones no se tiene en cuenta, en términos de aceptación social y percepción pública, el uso de equipos radiactivos como el densímetro nuclear también puede generar desconfianza y preocupación entre las comunidades cercanas a los sitios de trabajo. La falta de comprensión sobre la seguridad y los beneficios de este tipo de tecnología puede generar resistencia por parte de las comunidades locales, lo que puede complicar la implementación de proyectos de construcción que dependen del uso del densímetro nuclear.

7.3. ALTERNATIVA QUE PRESENTA EL USO DEL DEFLECTOMETRO DE IMPACTO FRENTE AL USO DEL DENSIMETRO NUCLEAR

Como ya se hizo mención anteriormente, el densímetro nuclear es el primer equipo que se presenta como alternativa viable para la realización de trabajos de auscultación para el tema de la densificación y valor de humedad del material que hace parte de las capas granulares que componen las estructuras de pavimento en Colombia. En principio, más que valores de densidad propios del suelo y de humedad presente en el mismo, no está diseñado para alguna otra finalidad.

Sin embargo, utilizando expresiones matemáticas, brinda la opción de proponer un valor para la estimación del grado de compactación del suelo en la sección donde se realiza el ensayo. Que, a su vez, se puede proponer como una estimación de la rigidez propia de la capa en las características presentadas.

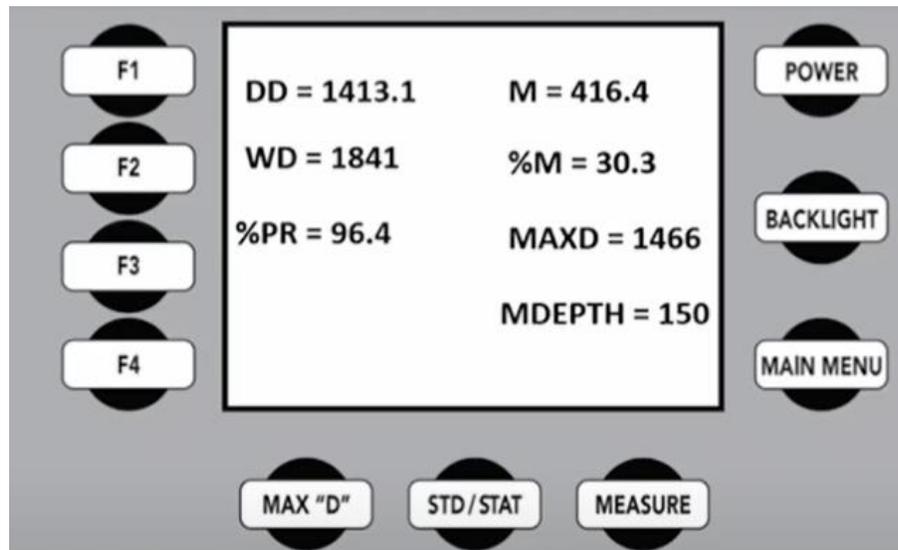


Ilustración 14 Resultados prueba con Densímetro Nuclear
Fuente: Humboldtmgf.com

Teóricamente, conociendo las medidas de densidad seca, la densidad máxima y la humedad óptima, los cuales son tres valores directos que mide un densímetro nuclear, se pueden relacionar para la obtención del grado de compactación.

$$\% PR = \frac{DD}{D_{max}} * 100$$

Ecuación 19

Donde:

- % PR: Grado de Compactación, %
- DD: Densidad seca, kg/m³
- Dmax: Densidad máxima, kg/m³

Para convalidar esta medida, con los mismos valores medidos directamente con el densímetro, se puede obtener el valor del contenido de humedad, apoyados en la siguiente ecuación:

$$M = WD - DD$$

Ecuación 20

Donde:

- M: Humedad, kg/m³
- WD: Densidad húmeda, kg/m³
- DD: Densidad seca, kg/m³

De la misma manera y con el uso del mismo principio, se puede lograr la obtención del porcentaje de humedad, representado con la siguiente ecuación:

$$\%M = \frac{WD - DD}{DD} * 100$$

Ecuación 21

Donde:

- %M: Porcentaje de humedad, %
- WD: Densidad húmeda, kg/m³
- DD: Densidad seca, kg/m³

La importancia del contenido de agua en la compactación de capas de suelo en la estructura de pavimento es fundamental para lograr la densidad óptima y la resistencia adecuada del pavimento. El contenido de agua afecta directamente la capacidad del suelo para compactarse de manera eficiente, lo que influye en la calidad y durabilidad del pavimento.

El proceso de compactación de suelos en la construcción de pavimentos tiene como objetivo reducir los espacios vacíos entre las partículas del suelo, aumentando así la densidad y la resistencia a la compresión. El contenido de agua en el suelo juega un papel crucial en este proceso, ya que afecta la plasticidad, la cohesión y la capacidad de compactación del material.

El rango óptimo de contenido de agua para la compactación del suelo en la estructura de pavimento varía según el tipo de suelo y las condiciones específicas del sitio. Para lograr una compactación eficaz, es importante encontrar el equilibrio adecuado en el contenido de agua. Un exceso de agua puede hacer que el suelo sea demasiado blando y difícil de compactar, lo que resulta en una densidad insuficiente y una resistencia inadecuada. Por otro lado, la falta de agua también puede dificultar la compactación, ya que el suelo se vuelve demasiado rígido, lo que dificulta la manipulación y la compactación efectiva.

Ahora bien, la importancia de una buena compactación en las capas de suelo de una estructura de pavimento es fundamental para garantizar la durabilidad, la resistencia y la estabilidad del pavimento a lo largo de su vida útil. En la construcción de pavimentos, la compactación eficiente de las capas de suelo es un paso crítico que afecta directamente la capacidad del pavimento para soportar cargas, resistir la deformación y mantener su integridad estructural en el tiempo.

Los tipos más frecuentes de falla de un pavimento asfáltico, asociados a la aplicación repetida de las cargas del tránsito, son el agrietamiento de las capas asfálticas y la acumulación de deformaciones permanentes en todas las capas del pavimento y la subrasante. Estas deformaciones permanentes se van traduciendo en ahuellamientos que afectan la comodidad y la seguridad de los usuarios de la vía. (INV-756-13)

Basándonos en la premisa anterior, tenemos que decir que la compactación eficiente de las capas de suelo en la estructura de pavimento es esencial por varias razones fundamentales. En primer lugar, mejora la resistencia y la estabilidad del pavimento al reducir la cantidad de espacios vacíos entre las partículas de suelo, lo que aumenta la densidad del material. Esta mayor densidad del suelo contribuye significativamente a la capacidad del pavimento para soportar cargas sin deformarse, lo que es fundamental para la durabilidad y la seguridad de la estructura. Además, la compactación adecuada ayuda a reducir la plasticidad y la compresibilidad del suelo, disminuyendo la posibilidad de asentamientos diferenciales y deformaciones bajo cargas de tráfico, lo que a su vez previene la formación de baches y grietas en la superficie del pavimento.

La capacidad portante del suelo también se ve incrementada por la compactación adecuada, lo que significa que el pavimento tendrá una mayor capacidad para soportar las cargas del tráfico sin sufrir daños estructurales. Esta mejora en la capacidad portante no solo garantiza un rendimiento óptimo del pavimento durante su vida útil, sino que también reduce la necesidad de reparaciones y mantenimiento costosos.

Por tal motivo, la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) nos especifica valores mínimos de compactación que debemos cumplir para garantizar el desempeño de la estructura de pavimento.

CAPA PAVIMENTO	GRADO DE COMPACTACIÓN
TERRAPLEN	90 ± 2 %
SUBYACENTE	95 ± 2 %
SUBRASANTE	100 ± 2 %
BASE	100 ± 2 %
SUBBASE	100 ± 2 %

*Tabla 3 Grado de compactación mínimo según capa
Fuente: Notas de clase,*

En el método de diseño AASHTO, la compactación de las capas del pavimento se considera en varios aspectos clave del proceso de diseño. La compactación afecta directamente la capacidad portante del pavimento, la resistencia a la fatiga y a la deformación permanente, así como la resistencia al deslizamiento y la capacidad para soportar cargas de tráfico. Por lo tanto, un adecuado control de la compactación es esencial para cumplir con los requisitos de diseño establecidos por AASHTO. De este modo y con base en el método de diseño de la AASHTO, previamente mencionado, en el cual es uno de los insumos principales para la designación del ancho de cada una de las capas, se utiliza, indirectamente, con la connotación de medida de evaluación estructural del pavimento.

Comprobándolo, si disminuye la compactación del material, aumenta el grosor necesario de la capa para lograr los índices necesarios.

Los densímetros nucleares informan directamente la densidad y el contenido de humedad (cuando corresponda) si el dispositivo está calibrado adecuadamente para el material de prueba. Los valores precisos se logran únicamente aplicando los procedimientos de calibración en muestras conocidas en el laboratorio y una verificación de campo en una tira reactiva.

No se es conocido en Colombia a un nivel tan avanzado, más bien es intuitivo, pero según la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos (FHWA, por sus siglas en inglés), es posible interferir los siguientes factores con las mediciones de densidad, Densidad del material subyacente, especialmente cuando se miden superposiciones de HMA (más significativa en el modo de retrodispersión).

- Presencia de acero de refuerzo.
- Heterogeneidad muestral.
- Composición química del material de prueba.
- Sesgo espacial; el medidor es más sensible al material más cercano a la fuente.
- Rugosidad de la superficie.
- Partículas agregadas de gran tamaño en la trayectoria del detector de origen.

Por otro lado, el deflectómetro de impacto es un dispositivo utilizado para evaluar la capacidad de carga de carreteras, pavimentos, aeropuertos y otras estructuras de pavimento, y opera midiendo la deflexión vertical de una estructura bajo la aplicación de un impulso de carga. Consta de una masa que, mediante caída libre, aplica un impulso de carga a la superficie del pavimento o

estructura. A medida que se realiza la acción de impactar la superficie, un transductor de señales registra la deflexión vertical resultante.

Esta información se utiliza para evaluar la capacidad estructural del pavimento o la carretera. Con base en las mediciones de deflexión, los ingenieros y planificadores pueden determinar la resistencia y durabilidad del pavimento, identificar áreas de fatiga o debilidad, y planificar futuras reparaciones o mantenimiento, ya que la información recopilada es crítica para la gestión de activos de infraestructura y para garantizar la seguridad y eficiencia de las carreteras y pavimentos. Además, el uso de deflectómetros de impacto puede ayudar a prevenir daños costosos y a optimizar la programación de mantenimiento para extender la vida útil de las estructuras de pavimento.

En el contexto de Colombia, la elección entre el deflectómetro de impacto y el densímetro nuclear puede depender de varios factores. Por ejemplo, el tipo de proyecto, el presupuesto disponible, la disponibilidad de equipos y la precisión requerida de las mediciones pueden influir en la selección de la técnica adecuada. Además, los requisitos regulatorios y las normativas locales también pueden desempeñar un papel importante en la elección de la herramienta de evaluación más apropiada para un proyecto de pavimentación específico.

Ahora así, en Colombia, donde la infraestructura vial es crucial para el desarrollo económico y social, la selección de la técnica de evaluación adecuada puede tener un impacto significativo en la calidad y durabilidad de las carreteras. Considerando la variedad de factores que pueden influir en esta elección, es importante realizar un análisis detallado de las necesidades del proyecto, los requisitos regulatorios y las capacidades técnicas y financieras disponibles para seleccionar la alternativa más adecuada.

En primer lugar, el Deflectómetro de Impacto ofrece la ventaja de proporcionar mediciones inmediatas de la deformación en una amplia gama de condiciones de carga. Esto es especialmente relevante en el contexto colombiano, como también es el caso de la mayoría de países, donde las fluctuaciones en las cargas vehiculares pueden ser significativas debido a factores como el transporte de carga y el tráfico pesado. Al obtener mediciones inmediatas de la deflexión del pavimento en respuesta a estas cargas, los ingenieros pueden realizar evaluaciones rápidas y precisas de la condición del pavimento, lo que resulta en una toma de decisiones más ágil y efectiva en términos de mantenimiento y reparación de carreteras.

En segundo lugar, el deflectómetro permite la evaluación de la estructura del pavimento a diferentes profundidades, lo que proporciona una comprensión más completa de su comportamiento estructural. En contraste, el Densímetro Nuclear se limita a proporcionar mediciones de densidad y humedad del material en la capa superior del pavimento. En el contexto colombiano, donde las condiciones geotécnicas y la composición del pavimento pueden variar considerablemente, esta capacidad del deflectómetro de evaluar la estructura a distintas profundidades resulta fundamental para realizar una evaluación exhaustiva y precisa de la condición del pavimento.

Otra ventaja significativa del deflectómetro es su capacidad para identificar de manera rápida y efectiva las deficiencias en el pavimento y áreas debilitadas, lo que permite realizar intervenciones de mantenimiento específicas y focalizadas. Esta capacidad resulta especialmente relevante en un país como Colombia, donde las condiciones climáticas y geológicas pueden influir en la degradación del pavimento de manera considerable. Al poder identificar con precisión las áreas problemáticas, se puede implementar estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo de manera más eficiente, optimizando los recursos disponibles.

Además, el deflectómetro ofrece la ventaja de ser no intrusivo; en contraste, el Densímetro Nuclear requiere el uso de fuentes radiactivas para realizar las mediciones de densidad y humedad. En el contexto colombiano, donde la seguridad y la preservación del medio ambiente son preocupaciones fundamentales, el enfoque no intrusivo resulta en una opción más segura y sostenible para la evaluación de pavimentos. Considero que esta es una de las principales razones de peso para poder decantarse en la toma de decisiones cuando se tienen a los dos equipos como alternativas viables frente al mismo problema.

Otra ventaja importante del deflectómetro sobre el Densímetro Nuclear es su capacidad para proporcionar datos dinámicos que permiten la evaluación de la capacidad de carga estructural del pavimento. Estos datos dinámicos son fundamentales para comprender cómo el pavimento responde a las cargas vehiculares en movimiento, lo que resulta crucial en un país como Colombia, donde el transporte de carga es una actividad económica significativa y las carreteras están sujetas a cargas variables. Al comprender la capacidad de carga estructural del pavimento, los ingenieros pueden diseñar soluciones de infraestructura vial que sean capaces de soportar las demandas de tráfico de manera más efectiva y duradera.

Además, el deflectómetro ofrece la posibilidad de evaluar la uniformidad de la superficie del pavimento, lo que resulta crucial para la seguridad vial y la comodidad del usuario. En un país

como Colombia, donde las carreteras atraviesan terrenos variados y enfrentan condiciones climáticas extremas, la capacidad de evaluar y mantener la uniformidad de la superficie del pavimento es fundamental para garantizar la seguridad y el confort de los usuarios de la carretera. El deflectómetro permite identificar áreas con problemas de irregularidad o deflexión excesiva, lo que permite implementar medidas correctivas que contribuyan a mejorar la experiencia de conducción y reducir el riesgo de accidentes.

Otra ventaja adicional del deflectómetro es su capacidad para proporcionar datos que permiten realizar análisis de vida útil del pavimento y modelado de deterioro, lo que resulta esencial en la planificación a largo plazo de proyectos de mantenimiento y rehabilitación de carreteras. En un país como Colombia, donde la inversión en infraestructura vial requiere una cuidadosa planificación y gestión de recursos, el uso del deflectómetro para evaluar la vida útil del pavimento y predecir su comportamiento futuro resulta fundamental para optimizar la asignación de recursos y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la red vial.

Si queremos concluir un poco esta comparación, el uso del Deflectómetro de Impacto frente al Densímetro Nuclear presenta una serie de ventajas significativas en el contexto colombiano. Su capacidad para proporcionar mediciones inmediatas, evaluar la estructura a diferentes profundidades, identificar deficiencias, ser no intrusivo, proporcionar datos dinámicos, evaluar la uniformidad de la superficie y realizar análisis de vida útil y modelado de deterioro, lo posiciona como una herramienta fundamental para la evaluación y gestión de pavimentos en el país. Considerando las condiciones geotécnicas, climáticas y de tráfico en Colombia, el FWD emerge como una opción superior para la evaluación de pavimentos, ofreciendo una combinación única de rapidez, precisión y capacidad para informar decisiones estratégicas en materia de mantenimiento y desarrollo de infraestructura vial.

CONCLUSIONES

Completando un exhaustivo análisis sobre el uso del Deflectómetro de Impacto en la evaluación de pavimentos, se han obtenido conclusiones significativas que, considero, contribuyen al avance de la información y la puesta en conocimiento en este campo crucial de la ingeniería de infraestructuras viales. Este estudio ha arrojado luces sustanciales sobre las capacidades, limitaciones y oportunidades de mejora asociadas al empleo de este equipo, así como sobre su impacto en la optimización del diseño, mantenimiento y gestión de pavimentos. Las siguientes conclusiones destacan los hallazgos y observaciones clave derivados de este trabajo de investigación.

En primer lugar, se ha corroborado que, en general, el Deflectómetro de Impacto es una herramienta altamente efectiva y confiable para la evaluación estructural de pavimentos. Mediante la literatura y análisis de datos, se ha podido constatar que proporciona mediciones precisas de la respuesta de los pavimentos a cargas dinámicas, lo que facilita la caracterización de las capas de pavimento, la determinación de espesores y la evaluación de la condición estructural. Esta capacidad para ofrecer información detallada y cuantitativa sobre la estructura de los pavimentos es crucial para la toma de decisiones informadas en el diseño, mantenimiento y rehabilitación de infraestructuras viales.

Además, se ha observado que el avance tecnológico ha potenciado significativamente las capacidades de la Deflectometría en términos de recolección y análisis de datos. El desarrollo de sistemas de adquisición de datos más sofisticados, el uso de algoritmos avanzados para el procesamiento de datos, y la integración de tecnologías de posicionamiento y mapeo, han mejorado la precisión, eficiencia y versatilidad de los equipos utilizados. Estos avances tecnológicos han posibilitado la generación de modelos de comportamiento estructural más robustos, que permiten una evaluación más precisa de la condición de los pavimentos, así como una estimación más fidedigna de su vida útil restante.

Así mismo, se ha constatado que los equipos desempeñan un papel crucial en la optimización del diseño y rehabilitación de pavimentos. La información detallada proporcionada por el deflectómetro permite la identificación de defectos y deficiencias estructurales, lo que facilita la toma de decisiones fundamentadas para la mejora de la infraestructura vial. Al aprovechar los datos recopilados, los ingenieros podemos optimizar el diseño de nuevos pavimentos, así como planificar estrategias efectivas para la rehabilitación y mantenimiento de pavimentos existentes, lo que resulta en una gestión más eficiente de los activos viales.

Por otro lado, se ha evidenciado que su uso tiene un impacto positivo en la seguridad vial y la reducción de costos a largo plazo. Al proporcionar una evaluación precisa de la condición estructural de los pavimentos, contribuye a la identificación temprana de problemas potenciales, lo que permite la implementación oportuna de medidas correctivas para preservar la integridad de la infraestructura vial. Esta anticipación de problemas estructurales conlleva a una disminución del riesgo de accidentes viales asociados a fallas en los pavimentos, además de reducir los costos derivados de reparaciones mayores no planificadas.

De la misma manera, se ha podido plantear el concepto de que el Deflectómetro de Impacto presenta ventajas significativas sobre el Densímetro Nuclear como herramienta para la evaluación estructural de pavimentos. La capacidad de la deflectometría para proporcionar una evaluación rápida, no destructiva y precisa de la capacidad portante y la integridad estructural de los pavimentos lo posiciona como una alternativa superior al Densímetro Nuclear. Sus capacidades avanzadas de modelado, análisis de datos y caracterización de capas, así como su capacidad para estimar la vida útil restante y optimizar el diseño y rehabilitación de pavimentos, lo hacen una herramienta invaluable para ingenieros y profesionales de la gestión de activos viales.

Finalmente, considero que se ha logrado dejar planteado la necesidad continua de establecer estándares y metodologías específicas para la evaluación de pavimentos con el uso de cada uno de los equipos propios de la deflectometría. La uniformidad en los procedimientos de ensayo, la interpretación de resultados y la elaboración de informes, es fundamental para garantizar la consistencia y fiabilidad de los datos recopilados mediante el FWD, el LWD y el HDW. En este sentido, el desarrollo de estándares y lineamientos específicos para la aplicación de cada uno de estos equipos en la evaluación de pavimentos es crucial para fomentar su uso efectivo y generalizado en la industria de la ingeniería vial.

BIBLIOGRAFÍA

- – I. (s/f). DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO Y DEL SUELO-AGREGADO EN EL TERRENO EMPLEANDO MEDIDORES NUCLEARES. Da-lab.co. Recuperado el 11 de noviembre de 2023, de <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-164-13.pdf>
- IMT (s/f) USO Y CALIBRACIÓN DE DEFLECTÓMETROS DE IMPACTO EN LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS Recuperado el 05 de junio de 2023, de <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt252.pdf>
- Norma ASTM D6938. (2017). "Métodos de prueba estándar para la densidad in situ y el contenido de agua del suelo y los agregados del suelo mediante métodos nucleares (poca profundidad)". Libro de normas 04.09 , ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ANDRES GIOVANI GUTIERREZ BAYONA. (s/f). . EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE USANDO TECNICAS NO DESTRUCTIVAS UTILIZANDO EL DEFLECTOMETRO DE IMPACTO Ó FWD (FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER) Unal.edu. Recuperado el 15 de diciembre de 2023, de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21088/300163.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- INGRID ADRIANA RODRIGUEZ TORRES. (s/f). . CORRELACIONES ENTRE EL CBR DE LA SUBRASANTE Y DEFLEXIONES MEDIDAS CON FWD EN COLOMBIA Recuperado el 19 de septiembre de 2023, de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1254/Rodr%C3%ADguez%20Torres%2C%20Ingrid%20Adriana%20-%202020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- – I. (s/f). RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO EN EL TERRENO (CBR IN– SITU). Da-lab.co. Recuperado el 2 de noviembre de 2023, de <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-169-13.pdf>
- – I. (s/f). RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO. Da-lab.co. Recuperado el 15 de octubre de 2023, de <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-756-13.pdf>
- Barrera, J. D. A. (s/f). ANÁLISIS DE DATOS EN LA AUSCULTACIÓN DE PAVIMENTOS EMPLEANDO EQUIPOS DE PRUEBA NO DESTRUCTIVA. Edu.co. Recuperado el 25 de noviembre de 2023, de

https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/handle/001/3766/Analisis_de_datos_pavimentos.pdf;jsessionid=7B19E91B8EACE637E09007FF0D6AD921?sequence=1

- PABLO ANDRÉS FORERO R. (s/f). . GUÍA PARA EL USO DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD) EN EL DIAGNOSTICO Y DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE Uniminuto.edu. Recuperado el 30 de agosto de 2023, de https://repository.uniminuto.edu/bitstream/10656/13648/2/T.IC_ForeroPablo_2021.pdf
- Cabrera, G. H. H., & Rodriguez, F. R. (s/f). COMO INFLUYE EL GRADO DE COMPACTACIÓN A UNA CAPA DE PAVIMENTO FLEXIBLE. Edu.co. Recuperado el 12 de enero de 2024, de <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/4a26502f-deeb-4091-9a38-bddb0a315caa/content#:~:text=Resumen%3A%20La%20compactaci%C3%B3n%20es%20un,de%20la%20estructura%20del%20pavimento.>
- (s/f). Procedimiento para medida de deflexiones en pavimentos mediante el deflectómetro de impacto (FWD). Edu.uy. Recuperado el 3 de noviembre de 2023, de <https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2022-03/Procedimiento%20FWD.pdf>
- (s/f). SECCIÓN 6– ESTABILIZACIÓN DE SUELOS. Gov.co. Recuperado el 16 de octubre de 2023, de https://www.umv.gov.co/sisgestion2019/Documentos/APOYO/GLAB/GLAB-DE-202_V1_SECCION_600_NORMAS_INV_2013.pdf
- Materiales Para Terracerías, 1. Suelos. (s/f). LIBRO: MMP. MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES. Imt.mx. Recuperado el 23 de septiembre de 2023, de <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-16-20.pdf>
- Pavements – FHWA InfoTechnology. (s/f). Dot.gov. Recuperado el 24 de enero de 2024, de <https://infotechnology.fhwa.dot.gov/nuclear-density-gauge/>
- Sierra, J. D. B. (s/f). VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE DCP APLICADO EN CAMPO EN RELACIÓN AL ENSAYO CBR EN LABORATORIO. Laccei.org. Recuperado el 15 de enero de 2024, de <https://laccei.org/LACCEI2016-SanJose/StudentPapers/SP61.pdf>
- Vega, D. V., Clemente, M. J. M., de Jesús Fabela Gallegos, M., Centeno, O. F., Jiménez, J. R. H., & Salazar, A. P. (s/f). CARACTERIZACIÓN DE UN SENSOR DE VELOCIDAD DE REFERENCIA PARA VERIFICAR DEFLECTÓMETROS DE PAVIMENTOS. Org.mx. Recuperado el 2 de noviembre de 2023, de https://somim.org.mx/memorias/memorias2011/pdfs/A4/A4_112.pdf

- Vista de Programa informático para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos por el método AASHTO. (s/f). Edu.co. Recuperado el 12 de enero de 2024, de <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/1395/1291>
- Zhang, W., Raza Khan, A., Yoon, S., Lee, J., Zhang, R., & Zeng, K. (2021). Investigation of the correlations between the field pavement in-place density and the intelligent compaction measure value (ICMV) of asphalt layers. *Construction and Building Materials*, 292(123439), 123439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123439>

Sector al que va dirigido el trabajo terminal:

Privado ()

Público (x)

¿A qué empresa u órgano puede ir dirigido el trabajo terminal?:

Al público en general e interesados en diseño, conservación y control de calidad de pavimentos

Me comprometo a leer y seguir los estatutos mencionados por el código de ética en la liga <http://www.eticaacademica.unam.mx/> y no cometer ningún tipo de plagio.



ING. JUAN CAMILO BUSTAMANTE VEGA

Nombre y firma del alumno.



ING. MANUEL ZARATE AQUINO

Nombre y firma del tutor y director de la tesina.