

Implementación de metodología de evaluación por desempeño para mezclas asfálticas en Panamá

Implementation of a performance evaluation methodology for asphalt mixtures in Panama

Andrés G. César¹, Max Cedeño¹

¹Departamento de Ensayos de Materiales, Dirección de Inspección, Ministerio de Obras Públicas de Panamá

*Autor de correspondencia: agcesar@mop.gob.pa

RESUMEN. Tradicionalmente, las mezclas asfálticas se basan en diseños volumétricos. A pesar de su accesibilidad y masiva aplicación, esta metodología no es capaz de definir completamente el comportamiento esperado del pavimento en servicio. En este sentido, los conceptos de diseño Superpave consideran la caracterización mecánica del ligante asfáltico, el tráfico y clima como complementos de los parámetros volumétricos. Esto lo convierte en una alternativa atractiva para incrementar el control y confiabilidad del diseño de mezcla. Basado en estos principios de diseño, se han desarrollado métodos de evaluación por desempeño, las cuales permiten determinar la capacidad la mezcla en servicio. Sin embargo, en Panamá aún no se exige cumplir con estos criterios, por lo tanto, no existe un procedimiento de ensayo ni criterios de aceptación. Esto puede producir incertidumbre y deterioros no considerados en el diseño. Por este motivo, el presente estudio revisa métodos desarrollados para evaluar mezclas asfálticas por desempeño. Adicionalmente, se implementa los conceptos de un proceso de evaluación por desempeño en un proyecto nacional. Los resultados indican que es posible implementar conceptos mecanicistas dentro de la evaluación de mezclas asfálticas locales. De hecho, las evaluaciones realizadas satisfacen los umbrales sugeridos por el protocolo. Esto significa que la mezcla asfáltica puede presentar un desempeño satisfactorio durante su vida en servicio. Este enfoque de evaluación representa un cambio de paradigma con respecto al diseño tradicional. De hecho, la evaluación por desempeño puede producir optimizaciones en el diseño que generen ahorros durante el ciclo de vida de la infraestructura.

Palabras clave. *Diseño de mezclas, ensayos de laboratorio, evaluación por desempeño, mezclas asfálticas, Superpave.*

ABSTRACT. Traditionally, asphalt mixes are based on volumetric designs. Despite its accessibility and widespread application, this methodology is not able to fully define the expected behaviour of in-service pavement. In this sense, Superpave design concepts consider the mechanical characterisation of the asphalt binder, traffic, and climate as complements to the volumetric parameters. This makes it an attractive alternative to increase the control and reliability of mix design. Based on these design principles, performance evaluation methods have been developed to determine the in-service capacity of the mix. However, in Panamá there is still no requirement to comply with these criteria, therefore, there is no test procedure or no acceptance criteria. This can lead to uncertainty and deterioration not considered in the design. For this reason, this study reviews methods developed to evaluate the performance of asphalt mixtures. In addition, the concepts of an evaluation process are implemented in a national project. The results indicate that it is possible to implement mechanistic concepts within the evaluation of local asphalt mixtures. In fact, the evaluations performed meet the thresholds suggested by the protocol. This means that the asphalt mix can perform satisfactorily during its service life. This evaluation approach represents a paradigm shift from traditional design. In fact, performance evaluation can lead to design optimisations that generate significant savings over the life cycle of the infrastructure.

Keywords. *Mixture design, laboratory testing, performance evaluation, asphalt mixes, Superpave.*

1. Introducción

En Latinoamérica, las mezclas asfálticas utilizadas tradicionalmente en los proyectos viales se basan en el diseño Marshall [1]–[3].

Esta metodología tiene una base empírica y consiste en definir el contenido óptimo de asfalto que resulte en características volumétricas y respuestas de densidad, estabilidad y flujo determinadas [4]–[6]. Adicionalmente, la metodología Marshall es atractiva ya que requiere equipos accesibles y es razonablemente sencilla de implementar [5].

Sin embargo, a pesar de ser considerado el método estándar de diseño de mezclas asfálticas [7], tiene limitaciones significativas. Principalmente, al ser un método empírico, no es capaz de definir completamente el efecto en el desempeño del pavimento debido a las propiedades de los materiales y las variaciones ambientales y de cargas [5]. Además, presenta dificultad en simular la densificación que ocurre bajo condiciones de tráfico [5], [7], [8].

Este hecho representa un obstáculo para la evaluación del comportamiento en servicio de la obra y la proyección de deterioros por ahuellamiento y agrietamiento.

En este sentido, la metodología de diseño de mezclas asfálticas Superpave (del inglés Superior Performing Asphalt Pavements) propone diseñar mezclas asfálticas mediante un proceso que vincula la selección de agregados y ligante, las características de volumétricas de la mezcla y las solicitaciones de tráfico y clima [5], [6].

Estas consideraciones incrementan el control durante la fase de diseño y aumentan la confiabilidad de la estimación futura del comportamiento de la mezcla.

Además, la metodología toma en cuenta la evaluación de la mezcla por desempeño, es decir la evaluación de la respuesta del pavimento mediante relaciones de las propiedades del material, sus esfuerzos y deformaciones.

En Panamá, a partir del 2015, se han desarrollados los primeros proyectos viales bajo los conceptos de diseño de mezclas asfálticas Superpave [9]. De estas experiencias se ha establecido el procedimiento básico para evaluar el ligante asfáltico a utilizar mediante la clasificación por Grado de Desempeño (PG por sus siglas en Inglés Performance Grade) (figura 1).

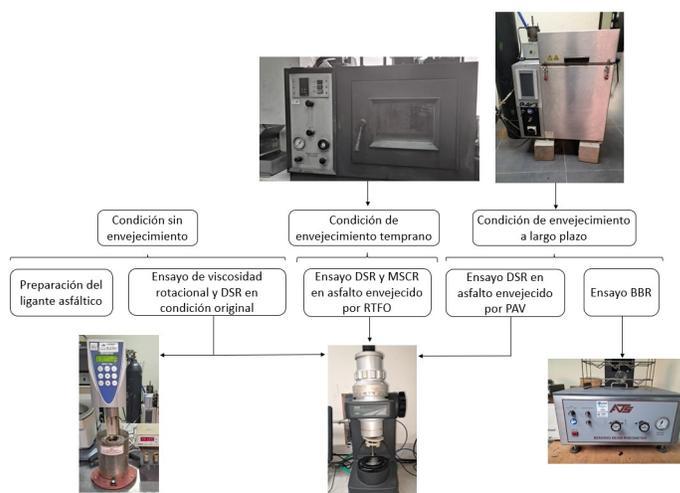


Figura 1. Procedimiento de determinación de grado de desempeño.

Esto ha permitido introducir los conceptos de análisis mecanicistas dentro de la evaluación del ligante asfáltico, lo cual contribuye a un mejor entendimiento del material utilizado.

Sin embargo, los requerimientos de estos proyectos se limitaron a evaluar las propiedades volumétricas de la mezcla. Por lo tanto, no consideraron su comportamiento por desempeño. Esto significa que actualmente, en el contexto nacional, no están definidos los criterios de evaluación y satisfacción del comportamiento de las mezclas diseñadas bajo este enfoque.

Esto es relevante ya que los ensayos y equipos para la evaluación y diseño de mezclas bajo la metodología Superpave poseen un gasto mayor en tiempo y costo en comparación con los procesos tradicionales [10]. Por lo tanto, establecer los criterios de evaluación de las mezclas asfálticas bajo los principios de diseño Superpave podría facilitar la aplicación completa del enfoque propuesto por la metodología. Es decir, es necesario desarrollar criterios de evaluación que permitan definir el nivel de exigencia requerido de acuerdo con las características de los proyectos.

En este contexto, con el objetivo que contribuir al desarrollo de los criterios de evaluación de mezclas asfálticas para la realidad local, este artículo presenta una revisión de los procedimientos de evaluación de mezclas asfáltica basada en criterios de desempeño. Adicionalmente, se desarrolla un estudio de caso en donde se implementa la propuesta de evaluación por desempeño para un proyecto vial en Panamá.

2. Marco Teórico

Como parte del desarrollo del método de diseño de mezclas asfálticas Superpave, se ha ideado propuestas de evaluación de la mezcla que permitan agilizar la toma de decisiones sin impactar significativamente en la confiabilidad del diseño en servicio.

Cominsky et al. [11] sugieren tres niveles de diseño con relación al volumen de tráfico esperado en el proyecto (tabla 1).

Tabla 1. Niveles de diseño propuestos por Cominsky et al.
Fuente: Cominsky et al. [11]

Nivel de diseño	Tráfico de diseño (en términos de ESAL)
1 (bajo)	$\leq 10^6$
2 (intermedio)	$\leq 10^7$
3 (alto)	$> 10^7$

El nivel 1 es propuesto para tráfico bajo. En este nivel la selección de ligante asfáltico y agregados se determina a partir de especificaciones y características volumétricas obtenidas empíricamente, sin el desarrollo de ensayos basados en desempeño. A pesar de esto, la compactación de los especímenes se realiza por medio del compactador giratorio y se considera los efectos de la humedad y envejecimiento en el diseño final.

Respecto al nivel 2, el proceso de diseño volumétrico es complementado con conceptos para la determinación del contenido de asfalto. Para esto, se elaboran muestras con distintos porcentajes de asfalto y se someten a ensayos a deformación y agrietamiento. Finalmente, el contenido asfalto a utilizar corresponde al porcentaje que satisface eficientemente con los umbrales establecidos para la mezcla.

Similar al nivel 2, el nivel 3 propone, incorporar al proceso de diseño volumétrico, lineamientos para definir el contenido de asfalto óptimo. En este caso, se elaboran muestras con distintos contenidos de asfalto y se someten a ensayos de desempeños desarrollados para condiciones de tráfico alto y climas severos. Este nivel tiene la característica de requerir considerablemente más tiempo y mayores números de especímenes y ensayos en comparación con el nivel 2.

Esta clasificación permite al diseñador identificar la complejidad del proceso de diseño. De hecho, a pesar de que en todos los niveles se consideran aspectos como el efecto del clima y el tráfico, los requerimientos de ensayos y tiempo de ejecución son distintos al pasar de

nivel 1 al 3. En cambio, se obtiene un incremento en la confiabilidad del diseño.

En el 2008, la Asociación Mexicana del Asfalto (AMMAC) desarrolló una metodología de diseño para mezclas asfálticas para obtener carreteras con altos niveles de desempeño. Esta metodología se denomina protocolo AMMAC, se considera una derivación de la metodología Superpave y consiste en evaluar la respuesta de la mezcla asfáltica bajo criterios volumétricos y de desempeño [12], [13].

Dentro de las consideraciones que realiza el protocolo, se incluye la jerarquización de los proyectos viales en cuatro niveles de acuerdo con el tráfico de diseño proyectado y la funcionalidad del camino (tabla 2).

Tabla 2. Niveles de diseño propuestos por AMAAC.
Fuente: AMAAC [12]

Designación del nivel de tránsito	Números de ejes equivalentes	Tipo de carreteras usuales	Ensayos recomendados
Nivel I Tránsito bajo	< 1 000 000	-Carreteras federales tipo D -Carreteras alimentadoras -Carreteras estatales y municipales -Calles urbanas	-Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad
Nivel II Tránsito medio	1 000 000 - 3 000 000	-Carreteras estatales -Carreteras federales tipo B y C -Vialidades urbanas	-Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad -Susceptibilidad a la deformación permanente
Nivel III Tránsito alto	3 000 000 - 30 000 000	-Carreteras federales tipo A -Autopistas de cuota	-Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad -Susceptibilidad a la deformación permanente -Módulo dinámico
Nivel IV Tránsito muy alto	> 30 000 000	-Carreteras federales troncales -Autopistas de cuota importantes -Vialidades suburbanas en ciudades muy grandes	-Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad -Susceptibilidad a la deformación permanente -Módulo dinámico -Fatiga

El protocolo AMAAC vincula la proyección de tráfico esperado con el tipo de servicio que brinda el camino. En este sentido, el nivel de diseño corresponde al criterio que resulte más exigente [12].

En relación con el nivel I, el protocolo indica que el ligante asfáltico debe satisfacer la clase de PG determinado para las solicitudes climáticas y estructurales exigidas en servicio. Esto significa que el asfalto debe ser sometido al proceso presentado en la Figura 1 y cumplir con umbrales específicos de viscosidad, módulo de corte dinámico y módulo de

rigidez, de acuerdo con las normas AASTHO 313-12, AASHTO T 315-12 y AASHTO T 316-13 [14]–[16].

En este nivel, la mezcla asfáltica debe cumplir con criterios volumétricos como el porcentaje de Vacíos de Aire (Va), Vacíos en el Agregado Mineral (VAM) y Vacíos Llenos de Asfalto (VFA) tal como indica la norma AASHTO R 35-12 [17]. Similarmente, se debe evaluar la susceptibilidad de la mezcla a la humedad, por medio del ensayo a la tensión indirecta (TSR por sus siglas en inglés Tensile Strength Ratio), siguiendo la norma AASHTO T 283 – 14 [18]. Para esta prueba se sugiere cumplir con un valor de al menos 80%, el cual es el mínimo utilizado por distintas agencias viales para mezclas Superpave [19].

El nivel II abarca los criterios requeridos por el nivel I junto con la evaluación del desempeño por susceptibilidad a la deformación permanente. El protocolo identifica tres métodos de ensayos con los que se puede realizar esta evaluación. El primero se refiere a la rueda de Hamburgo, el cual está estandarizado por la norma AASHTO T 324-19 [20], y además de medir deformación es capaz de determinar el comienzo de desnudamiento del árido.

El segundo ensayo propuesto es la evaluación mediante el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA). Este ensayo está estandarizado por la norma AASHTO T 340-10 [21], la cual mide la deformación producida en la muestra debido al paso de una rueda cargada de 100 lb a través de una manguera lineal presurizada a 100 psi a 64°C.

La tercera prueba corresponde al ensayo por Pista Española. En este ensayo se determina la velocidad máxima de deformación en mm/min que ocurre en la muestra producto del paso de una rueda cargada en un intervalo de 105 a 120 minutos [22]. La tabla 3 presenta los criterios de aceptación de deformación para cada uno de los niveles del protocolo.

Tabla 3. Criterios de aceptación de ensayos de deformación.
Fuente: AMAAC [12]

	Ensayo de Rueda de Hamburgo	Ensayo APA	Ensayo por Rueda Española
Designación del nivel de tránsito	Pasadas mínimas para la deformación máxima de 10 mm	Rodera máxima (mm)	Velocidad máxima de deformación (mm/min)
Nivel I Tránsito bajo	10 000	7.00	0.20
Nivel II Tránsito medio	15 000	5.50	0.20
Nivel III Tránsito alto	20 000	4.00	0.15
Nivel IV Tránsito muy alto	20 000	3.00	0.12

El nivel III establece cumplir con lo exigido en el nivel II y, además, desarrollar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica. El módulo dinámico es una propiedad presente de los materiales viscosos y representa la rigidez y viscoelasticidad del material sometido a una carga sinusoidal [23], [24]. Esta propiedad evoluciona durante la vida del pavimento debido, entre otros factores, a procesos de envejecimiento del ligante, acumulación de fatiga o disminución progresiva de vacíos por efecto de cargas vehiculares. Por lo que determinar su comportamiento es particularmente relevante en la caracterización de la mezcla asfáltica [25]. De hecho, esta propiedad no solo es utilizada para diseñar mezclas asfálticas, sino también, para determinar el espesor de la capa de pavimento [23], [26].

En laboratorio, el ensayo de módulo dinámico esta estandarizado por la norma AASHTO T 378-17 [27]. Con los resultados, se desarrolla la curva maestra de la mezcla, la cual permite definir el valor de módulo dinámico para las temperaturas y velocidades de cargas esperadas en servicio [28]. De acuerdo con el protocolo, no hay especificaciones de este parámetro sin embargo es necesario reportarlo [12].

Finalmente, el nivel IV integra los requerimientos señalados en los tres niveles anteriores y adiciona la evaluación de la resistencia de la mezcla a la fatiga. Para esto, se recomienda realizar el ensayo de viga de 4 puntos siguiendo el procedimiento indicado en la norma AASHTO T 321-22 [29]. El protocolo no especifica valores requeridos para este parámetro sin embargo es necesario reportarlo [12].

3. Materiales y Metodología

3.1 Proyecto evaluado

La estructura de evaluación propuesta en el protocolo AMAAC presenta una clasificación clara por niveles de tráfico y tipo de camino, junto con ensayos y criterios de laboratorio definidos. Estas características hacen atractivo su uso como primer acercamiento al desarrollo de una metodología de evaluación por desempeño.

En este sentido, se seleccionó el diseño de mezcla asfáltica utilizada en el tramo entre el Puente de las Américas y Arraján, del proyecto de ampliación y rehabilitación de la Carretera Panamericana y se evaluó bajo los parámetros mencionados en el protocolo.

Este proyecto cuenta con una longitud de 11 km y un ESAL proyectado superior a 30,000,000. Adicionalmente, los criterios de diseño consideran

utilizar una mezcla asfáltica desarrollada bajo los conceptos de Superpave.

3.2 Materiales

El ligante asfáltico utilizado en el proyecto se evaluó bajo los parámetros de grados por desempeño (Figura 1). La tabla 4, presenta los resultados de los ensayos realizados.

Tabla 4. Resultados de evaluación PG del ligante asfáltico.

Ensayo	Norma	Resultado	Criterio de diseño
Asfalto Original			
Viscosidad Rotacional (Pa-s) a 135°C	AASHTO T 316	2.88	< 3.0 Pa-s
Viscosidad Rotacional (Pa-s) a 175°C	AASHTO T 316	0.38	reportar
Módulo de Deformabilidad G*/sen(δ) Kpa	AASHTO T 315	1.39	> 1.00 kPa a 82 °C
Asfalto Envejecido por RTFOT			
Cambio de Masa (%)	AASHTO T 240	0.28	1.0% máx.
Módulo de Deformabilidad G*/sen(δ) Kpa	AASHTO T 315	3.26	> 2.2 kPa a 76 °C
Asfalto Envejecido por RTFOT + PAV			
Módulo de Deformabilidad G*/sen(δ) Kpa	AASHTO T 315	4290.00	≤ 5000 kPa a 25 °C
Módulo de Rigidez (Mpa)	AASHTO T 313	198.86	S ≤ 3000 Mpa a -12°C
Módulo de Rigidez (Mpa)	AASHTO T 313	384.31	S ≤ 3000 Mpa a -18°C
Valor m	AASHTO T 313	0.31	≥ 0.300

Los resultados satisfacen los criterios requeridos por el Capítulo 24 “Mezclas Asfálticas” de las Especificaciones Técnicas del Ministerio de Obras Públicas (MOP) de Panamá [30], clasificándolo como un asfalto de PG 76-22.

La combinación de agregados lo conforman dos agregados gruesos y un agregado fino. La tabla 5 presenta la caracterización de los agregados.

Tabla 5. Propiedades de los agregados.

Propiedad	Agregado Grueso 1	Agregado Grueso 2	Agregado Fino
Gravedad específica bruta	2.68		2.57
Gravedad específica aparente	2.78		2.72
Porcentaje de absorción (%)	1.20		2.10
Porcentaje de partículas planas y alargadas (%)	0		--
Porcentaje de caras fracturadas (%)	100.00		--
Porcentaje de agularidad en finos (%)	--		47.50
Porcentaje de equivalente de arena (%)	--		74.00
Porcentaje combinado de desgaste por abrasión (%)		14.70	
Porcentaje cambiando de desgaste por solidez (%)		5.27	

Los resultados presentados en la Tabla 5 satisfacen los criterios requeridos por el Capítulo 24 “Mezclas Asfálticas” de las Especificaciones Técnicas del MOP, Panamá [30]. Adicionalmente, por la combinación de agregados la mezcla resultante clasifica como una mezcla asfáltica densa gruesa.

3.3 Programa Experimental

Considerando el nivel de tráfico estimado para el proyecto y al de hecho de que este se desarrolla en unos de los principales ejes de conexión interurbanas del país, se ha definido que el alcance de evaluación corresponde al nivel IV.

Cedeño [31] desarrolló el procedimiento de evaluación, el cual se ejecutó en el Departamento de Ensayos de Materiales (DEM) del MOP de Panamá. Este departamento se caracteriza por ser el primer laboratorio en el país con el equipo adecuado para llevar a cabo evaluaciones por desempeño. Sin embargo, debido a que este tipo de evaluaciones está en una fase inicial aún no se cuenta con los implementos suficientes para realizar evaluaciones por fatiga. Por esta razón, respecto al análisis por fatiga, el presente estudio se limita a explorar las alternativas existentes para su evaluación.

4. Resultados y discusión

4.1 Nivel I de evaluación

El nivel I de evaluación exige cumplir con requerimientos de PG del ligante asfáltico. Además, la mezcla asfáltica debe satisfacer propiedades volumétricas y ensayos de resistencia a la susceptibilidad a la humedad.

En la sección anterior se determinó durante la caracterización de los materiales que el PG de ligante asfáltico es 76-22, el cual satisface los requerimientos exigidos para el proyecto. En cuanto, a la evaluación de la mezcla asfáltica, las propiedades volumétricas (definidas en el diseño) fueron verificadas. La tabla 6 presenta los resultados volumétricos de la mezcla.

Tabla 6. Propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.

Propiedad	Resultados	Valor Objetivo
Rice MSG (Gmm)	2.48	2.48
Avg. Bulk (Gmb)	2.38	2.38
Agg. Sp. Gr. (Gsb)	2.63	Reportar
Hgt. @ N inic.	131.10	Reportar
Hgt. @ N dis.	114.80	Reportar
%Gmm @ Ni	86.00	≤ 89.0
% Gmm @ Nd	95.90	96.00
% Vacíos @ Nd	4.10	2.5%-6.0%
% VMA @ Nd	14.70	13.0% min.
% VFA @ Nd	72.00	65%-75%
Dust/Asfalto	0.90	0.6%-1.2%

Las propiedades presentes en la tabla 6, satisfacen los requerimientos presentes en las Especificaciones Técnicas Generales del MOP [30].

La resistencia a la susceptibilidad térmica fue determinada en el ensayo de TSR, el cual registro un valor de 85%. Este valor satisface el valor de 80%, el cual es el mínimo recomendado por el protocolo AMAAC [12].

4.2 Nivel II de evaluación

El nivel II adiciona a la evaluación la estimación del daño potencial por deformación permanente. Para este objetivo, el DEM cuenta con el equipo Asphalt Pavement Analyzer Jr. Este equipo tiene la capacidad de realizar el ensayo de la Rueda de Hamburgo y el ensayo APA, los cuales son dos de los ensayos propuestos por el Protocolo AMAAC. Con la finalidad de explorar las cualidades de estos ensayos, en el presente estudio se realizaron ambas pruebas (figura 2).

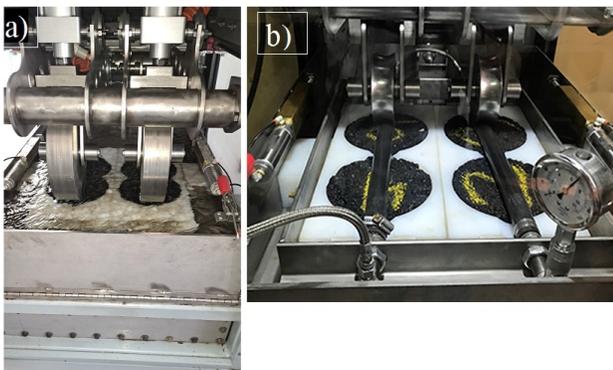


Figura 2. Ensayos de evaluación de deformación: a) Ensayo de Rueda de Hamburgo b) Ensayo APA.

La tabla 7 presenta los resultados obtenidos para ambos ensayos.

Tabla 7. Resultados de daños por deformación permanente.

Ensayo de Rueda de Hamburgo	Ensayo APA
Deformación medida a 20 000 Pasadas	Deformación máxima (mm) a 8 000 pasadas
4.06	2.75

La deformación registrada del ensayo de Rueda de Hamburgo es de 4.06mm. Este valor es menor a 10mm, el cual es la deformación máxima permitida por el protocolo para muestras de mezclas asfálticas empleadas en tráficos muy altos y sometidos a 20,000 pasadas de rueda.

Similarmente, el resultado del ensayo APA indica que la deformación máxima de la muestra después de 8,000 pasadas de rueda es de 2.75mm. Este valor es menor a 3.0mm, el cual es la deformación máxima admisible por el protocolo para mezclas asfálticas de muy alto tráfico.

Ambos ensayos permiten registrar el comportamiento de la mezcla a la deformación. Sin embargo, la selección práctica de uno u otro ensayo está determinada por el alcance requerido de la información.

En el Ensayo de la Rueda de Hamburgo la muestra es sometida a carga cíclica bajo una condición sumergida por agua, la cual es bombeada a través de las muestras por la fuerza de la rueda [32], [33]. Adicionalmente, las condiciones de este ensayo son adecuadas para medir el desnudamiento del agregado [34], [35].

En cuanto al ensayo APA, este mueve una rueda cargada con 100lb de un lado a otro a través de una manguera lineal presurizada a 100psi sobre una muestra de mezcla asfáltica [36]. Por lo tanto, este ensayo también considera condiciones de carga cíclica. El ensayo APA requiere condicionar la muestra a 64°C inyectando aire a la cámara de ensayo. Este hecho hace que no sea posible registrar otros fenómenos de la mezcla como lo es el desarrollo de desnudamiento. Por lo que el ensayo APA tiene un alcance limitado en comparación con la Rueda de Hamburgo.

4.3 Nivel III de evaluación

La evaluación realizada en el nivel III incorpora la caracterización del módulo dinámico de la mezcla asfáltica.

Esta prueba es realizada con la máquina AMPT (por sus siglas en inglés Asphalt Mixture Performance Tester) (figura 3). En el aparato se coloca una muestra de aproximadamente 100mm de diámetro, 150mm de altura y 7.0% de vacíos de aire. Seguido, la muestra es sometida a carga cíclica a distintas combinaciones de frecuencia y temperatura [37].



Figura 3. Máquina de ensayos AMPT.

Las deformaciones generadas son registradas por transductores o LVDT (por sus siglas en inglés Lineal Variable Differential Transformer) y utilizadas para calcular el módulo dinámico y ángulo de fase.

Con los resultados se elabora la curva maestra de la mezcla, la cual integra la respuesta viscoelástica del material tomando como base una temperatura de referencia [38]. Esta herramienta extiende el rango de temperaturas posibles de análisis, lo que incrementa la comprensión del comportamiento de la mezcla (figura 4).

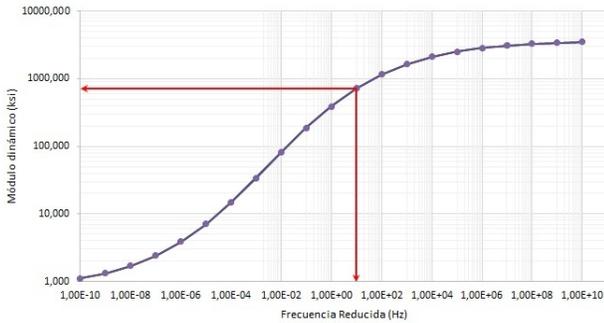


Figura 4. Curva maestra de la mezcla del proyecto para temperatura de 21.1°C

De acuerdo con los criterios planteados por el protocolo AMAAC, el módulo dinámico no tiene un umbral requerido como criterio de aceptación. Sin embargo, conocer la respuesta del módulo para las condiciones de servicio es relevante para estimar el desempeño de la mezcla. De hecho, el módulo dinámico es una propiedad fundamental para definir el modo de respuesta a la deformación de una mezcla asfáltica en función de la temperatura y la velocidad de los vehículos [39].

Para determinar el módulo dinámico asociado a un caso de interés, se debe determinar la temperatura a la que estará expuesta la mezcla y calcular el tiempo de carga (t) a partir del espesor de carpeta asfáltica (h) y la velocidad de los vehículos (V) (ecuación 1) [40]. Posteriormente, con la ecuación (2), se define la frecuencia de carga (F) a la que está expuesta la mezcla.

$$\text{Log } t = 0.005h - 0.2 - 0.94 \log (V) \quad (1)$$

$$F = \frac{1}{2 \pi t} \quad (2)$$

Conociendo la temperatura y frecuencia se vincula el valor de módulo dinámico objetivo.

4.4 Nivel IV de evaluación

El nivel IV de evaluación incluye, en la secuencia de ensayos, la respuesta de la mezcla a la fatiga.

Actualmente, el DEM no cuenta con el equipo para realizar este tipo de evaluación. A pesar de esto, si dispone de una prensa universal dinámica. Esta máquina es capaz de aplicar carga cíclica en mezclas condicionadas a temperaturas entre -50°C a 100°C (figura 5) [41].



Figura 5. Prensa universal dinámica.

La prensa universal tiene la capacidad de acoplarse con diversos accesorios para la ejecución de distintos tipos de ensayos, entre ellos pruebas de fatiga. Considerando esto, se decidió explorar ensayos de fatiga comúnmente aplicados en laboratorios de mezclas asfálticas a fin de identificar las posibles alternativas de evaluación para el contexto local.

El protocolo AMAAC propone, como método de verificación de fatiga, el ensayo de viga de 4 puntos. Este ensayo aplica carga cíclica en los tercios medios de una viga simplemente apoyada y condicionada a 20°C [42], lo cual simula el paso vehicular sobre la carpeta asfáltica. Los ciclos de cargas se realizan hasta que el producto de la rigidez y el número de ciclos haya disminuido en un 15% del valor máximo registrado durante el ensayo [43]. De los resultados obtenidos se puede definir el punto de falla y generar leyes de fatiga para el material de estudio [44].

Este ensayo es uno de los más populares para la evaluación de la resistencia al agrietamiento por fatiga [45]. Sin embargo, los accesorios de montaje no son económicos y el procedimiento de ensayo consume un

tiempo significativo, por lo que su aplicación no necesariamente es adecuada para procesos de control de calidad [46]. Además, estudios reportan que el ensayo de viga sometida a flexión en 4 puntos puede presentar una variabilidad importante [42], [46]. Este hecho puede generar situaciones en donde los resultados sean cuestionados.

Otra alternativa de ensayo a fatiga es la prueba de flexión semicircular o SCB (por sus siglas en inglés Semi Circular Bending Test). Este ensayo originalmente fue desarrollado para evaluar la mecánica de fractura en rocas [47]. La evaluación caracteriza la resistencia de la mezcla a la fractura en términos de tasa crítica de liberación de energía de deformación o valor crítico de J integral (J_c) [48].

La prueba SCB esta estandarizada por la norma ASTM D8044-16 y emplea muestras semicirculares condicionadas a una temperatura prestablecida [49]. Las muestras son separadas en tres grupos, a las cuales se les realizan muescas de 25mm, 32mm y 38mm respectivamente. Esto induce el plano de fallo durante la aplicación del ensayo.

La carga es aplicada diametralmente, de forma monotónica y paralela a la muesca conformada. Adicionalmente, durante la ejecución del ensayo, el desplazamiento de carga es registrado [48]. Sin embargo, este mecanismo de carga no representa totalmente el comportamiento de fatiga en condiciones de servicio [50], por lo que sus resultados son considerados adecuados para conclusiones preliminares de la falla final y de resistencia a la fractura [51].

Basado en los principios del trabajo de fractura, la prueba I-FIT (de sus siglas en inglés Illinois Flexibility Index Test) fue desarrollada para evaluar la resistencia de las mezclas asfálticas al agrietamiento. Este ensayo está estandarizado por la norma AASHTO TP 124 [52]. Consiste en condicionar, a una temperatura determinada, muestras utilizadas para ensayo a flexión semicircular de 150 mm de diámetro y 50 mm de espesor. Las muestras son ensayadas a flexión a una tasa de desplazamiento constante de 50 mm/min [53].

Como respuesta del ensayo se obtiene la energía de fractura, la cual representa la energía disipada por la propagación de la grieta, y la pendiente post-pico, la cual corresponde a la pendiente en el punto de inflexión posterior al punto de carga máxima [53]. La relación de

estos dos parámetros define el índice de flexibilidad (FI por sus siglas en inglés, Flexibility Index).

Los valores de FI sirven como indicador de resistencia correlacionado al mecanismo de crecimiento de grietas durante el proceso de fractura. En ese sentido, valores elevados de FI indican mayor resistencia a la propagación de grietas [54]. Adicionalmente, distintos estudios indican que esta prueba tiene la ventaja de distinguir diferencias en las propiedades de las mezclas asfálticas [53]–[55].

La prueba de IDEAL-CT (de sus siglas en inglés Indirect Tension Asphalt Cracking Test) evalúa el potencial de agrietamiento en una muestra aplicando carga diametral. Su principal característica consiste en que la muestra evaluada corresponde a una probeta cilíndrica [56]. Esto significa que las muestras utilizadas se obtienen directamente del compactador giratorio sin requerir manipulación adicional.

Con los valores registrados del ensayo se determina el índice de tolerancia al agrietamiento. Este parámetro se emplea como indicador de la calidad del material, considerando que mientras mayor sea su valor, mayor es la resistencia al agrietamiento.

Zhou et al. indican que esta prueba ha mostrado buena correlación en campo [57]. Además, estudios reportan buena correlación con otros ensayos de fatiga, como por ejemplo en ensayo de viga de 4 puntos [46], [58].

Actualmente, el ensayo de IDEAL-CT se considera un ensayo emergente y su uso se ha enfocado en la investigación [59]. Por lo tanto, la aplicación de la prueba como parte de la secuencia estándar de evaluación de mezclas asfálticas aún no está masificada. Al respecto, diversos autores están enfocados en evaluar su potencial como ensayo viable para diseño y control de calidad de mezclas asfálticas [46], [59]–[62].

Desde una perspectiva de laboratorio de materiales, los ensayos considerados como parte de una metodología de evaluación, no solo deben satisfacer los requerimientos técnicos, sino que deben ser aplicables dentro del contexto local. En este caso, por lo general en una carpeta asfáltica las fallas por fatiga se originan por cambios volumétricos significativos en la mezcla generados por las solicitaciones climáticas y de carga [63]. Por lo tanto, es importante contar con un método de ensayo capaz de reproducir en laboratorio el comportamiento presentado en servicio sin limitar su accesibilidad.

Si esto se cumple, entonces, los resultados obtenidos en laboratorio pueden ser aplicables masivamente para el diseño y control de calidad de las mezclas asfálticas.

4.5 Discusión

La implementación del protocolo AMAAC, enfocado en el proyecto de estudio, demuestra que es posible aplicar los lineamientos de evaluación por desempeño dentro del contexto local. De hecho, los resultados obtenidos de la mezcla asfáltica fueron positivos en los tres niveles de evaluación a los que se sometió. Este hecho es relevante ya que la mezcla fue originalmente diseñada a partir de conceptos de caracterización del PG del ligante asfáltico y relaciones volumétricas de la combinación de asfalto y agregados.

A pesar de esto, no necesariamente otras mezclas diseñadas bajo los principios aplicados en la actualidad tienen la capacidad de satisfacer los requerimientos de los criterios mecanicistas. Por lo tanto, la implementación de una metodología de evaluación por desempeño fortalecería la confiabilidad del diseño y el rendimiento del pavimento en servicio. En este sentido, introducir ensayos por desempeño representa una alternativa de optimización y reducción de costos en el ciclo de vida de la infraestructura.

Respecto al nivel IV de evaluación, se ha explorado algunas alternativas que podrían ser aplicadas para evaluar el desempeño de fatiga en las mezclas asfálticas. Como indicadores de la resistencia al agrietamiento por fatiga, los ensayos de viga de 4 puntos, SCB, I-FIT e IDEAL CT pueden ser considerados como posibles candidatos para ser parte de la secuencia de evaluación desempeño. Sin embargo, para que un ensayo sea adecuado no solo debe representar las condiciones en servicio, sino que también debe ser práctico y accesibles para la realidad local. En este aspecto, se requieren mayores investigaciones para determinar la metodología de ensayo que brinde la información suficiente optimizando los recursos disponibles.

5. Conclusiones

El trabajo presenta el desarrollo de la implementación de un procedimiento de evaluación por desempeño para las mezclas asfálticas en Panamá. En relación con esto, se toma como base el procedimiento propuesto por el protocolo AMAAC.

La metodología propuesta fue aplicada para un proyecto desarrollado en Panamá, en donde se demostró que es posible incorporar conceptos mecanicistas dentro de la evaluación de mezclas asfálticas locales.

Los resultados indican que las evaluaciones realizadas en los niveles I, II y III satisfacen los umbrales sugeridos por el protocolo. Esto significa que la mezcla asfáltica puede presentar un desempeño satisfactorio durante su vida en servicio.

Desde una perspectiva de diseño, este hecho tiene un gran impacto en el entendimiento del comportamiento de la mezcla asfáltica. En efecto, la verificación por desempeño representa un cambio de paradigma con respecto al diseño tradicional enfocado en caracterización volumétrica. Si se define desde la etapa de diseño la capacidad de desempeño de la mezcla en servicio, es posible lograr optimizaciones durante el ciclo de vida del proyecto, lo cual puede significar ahorros económicos.

Con respecto al nivel IV, a pesar de que no fue posible evaluar la mezcla bajo parámetros de fatiga, se realizó una revisión de ensayos enfocados a evaluar esta condición.

Los ensayos revisados pueden ser adaptados si se cuenta con una prensa universal, lo cual los convierte en alternativas atractivas para integrar el método de evaluación por desempeño. De hecho, para que sea factible la implementación de una metodología de evaluación por desempeño, es necesario que los ensayos no solo sean adecuados para medir las condiciones requeridas, sino que también sea viable su acceso para los laboratorios locales.

Sin embargo, es recomendable realizar mayor investigación sobre los ensayos a fatiga antes de definir una prueba estándar dentro del proceso de análisis.

Finalmente, se recomienda realizar jornadas de campo en donde se inspeccione el desempeño del pavimento en servicio. Esto puede incrementar la comprensión de la capacidad de las vías locales y contribuir a la regionalización de los umbrales tolerables de desempeño.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Obras Públicas de Panamá por la asistencia y soporte de los equipos técnicos.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, A.C. y M.C.; metodología, A.C. y M.C.; recolección y análisis de datos A.C. y M.C.; redacción: A.C.; revisión y edición, A.C. y M.C.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] F. J. Sánchez-Leal, P. G. Anguas, M. Larreal, and D. B. López Valdés, "Polyvoids: Analytical Tool for Superpave HMA Design," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, no. 8, pp. 1129–1137, Aug. 2011, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000275.
- [2] R. A. Montoya Morales and J. L. Quispe García, "Aplicación de la Metodología MEPDG-AASHTO 2008; en el Eje de Integración Vial Norte-Yura," Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú, 2020.
- [3] J. G. Maldonado Hidrobo and J. F. Pozo Constante, "Comparación entre Parámetros Marshall de Mezclas Asfálticas en Caliente, Obtenidos sobre Muestras Taladradas y Briquetas Compactadas en Sitio," Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Ecuador, 2022.
- [4] F. L. Roberts, M. Asce, L. N. Mohammad, and L. B. Wang, "History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 279–293, 2002, doi: 10.1061/ASCE0899-1561200214:4279.
- [5] H. M. Radzi, R. Muniandy, S. Hassim, T. H. Law, and F. M. Jakarni, "An overview of asphalt mix designs using various compactors," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Apr. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/512/1/012031.
- [6] S. M. Omar, B. M. Sharif, H. U. Ahmed, and W. A. Abdullah, "Comparison Study between Marshall and Superpave Mix Design Methods," *Halabja University Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 348–365, 2021, [Online]. Available: www.huj.uoh.edu.iq/www.huj.uoh.edu.iq
- [7] J. Lv, X. Zhancheng, Y. Yingmei, Z. Jiantong, S. Xiaolong, and W. Chuanhai, "Comparison of Asphalt Mixtures Designed Using the Marshall and Improved GTM Methods," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/7328791.
- [8] I. M. Asi, "Performance evaluation of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions," *Constr Build Mater*, vol. 21, no. 8, pp. 1732–1740, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.036.
- [9] Y. G. Mojica, "Asfalto modificado para Darién," La Prensa, Panamá, Mar. 19, 2015. Accessed: Sep. 09, 2023. [Online]. Available: https://www.prensa.com/sociedad/Asfalto-modificado-Darién_0_4166583443.html
- [10] I. Boz, G. P. Coffey, J. Habbouche, S. D. Diefenderfer, and O. E. Ozbulut, "A critical review of monotonic loading tests to evaluate rutting potential of asphalt mixtures.," *Constr Build Mater*, vol. 335, p. 127484, 2022.
- [11] R. J. Cominsky, G. A. Huber, T. W. Kennedy, and M. Anderson, *The Superpave mix design manual for new construction and overlays (No. SHRP-A-407)*. Washington: Strategic Highway Research Program, 1994.
- [12] A. C. Asociación Mexicana del Asfalto, "Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013 Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño," México, Jul. 2013.
- [13] M. Madrigal Magaña, "Efecto de la Utilización de Hule Molido de Llanta en Mezclas Asfálticas de Acuerdo al Protocolo AMAAC," Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México, 2015.
- [14] American Association of State and Highway Transportation Officials, "AASHTO T 313–12. 2012c: Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)," Washington, DC, 2012.
- [15] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "AASHTO, T 315 Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)," Washington, DC, USA, 2012.
- [16] American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO T. 316-13: Standard method of test for viscosity determination of asphalt binder using rotational viscometer," Washington, D.C., USA, 2013.
- [17] American Association of State and Highway Transportation Officials., "AASHTO R 35-12: Standard practice for superpave volumetric design for hot-mix asphalt (HMA)," Washington, DC, USA, 2012.
- [18] American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO), "AASHTO T 283: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage," Washington, DC, USA, 2014.
- [19] R. Y. Liang, "Refine AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave," Jan. 2008.
- [20] American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO), "AASHTO T 324: Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures." Washington, D.C., USA, 2019.
- [21] American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO), "AASHTO T340: Determining Rutting Susceptibility of Asphalt Paving Mixtures Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA)," Washington, D.C., U.S.A., 2010.
- [22] Asociación Mexicana del Asfalto A.C., "Recomendación AMAAC RA 03/2011. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista española de ensayo de laboratorio.," México, 2011.

- [23] F. Leiva, "Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas," Sep. 2004.
- [24] T. H. Nguyen, J. Ahn, J. Lee, and J. H. Kim, "Dynamic modulus of porous asphalt and the effect of moisture conditioning," *Materials*, vol. 12, no. 8, pp. 1–11, Apr. 2019, doi: 10.3390/ma12081230.
- [25] J. J. Lara R., "Ajuste Ecuación de Predicción Witczak Moelo NCHRP 1-37A DEL Módulo Dinámico (E*) de Mezclas Asfálticas," Universidad EAFIT, Colombia, 2021.
- [26] M. Zhang, H. Zhao, L. Fan, and J. Yi, "Dynamic modulus prediction model and analysis of factors influencing asphalt mixtures using gray relational analysis methods," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 19, pp. 1312–1321, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.05.120.
- [27] American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO), "AASHTO T 378: Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)," Washington, DC, USA, 2017.
- [28] American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO), "AASHTO R 62-13: Standard practice for developing dynamic modulus master curves for asphalt mixtures," Washington, D.C., U.S.A., 2017.
- [29] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "AASHTO T 321: Determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending," Washington, D.C., U.S.A., 2007.
- [30] Ministerio de Obras Públicas de Panamá, "Especificaciones Técnicas Generales del MOP Panamá," Panamá, 2017.
- [31] M. Cedeño, "Implementación de Ensayos de Desempeño en el proyecto: Rehabilitación y ensanche de la carretera Panamericana," in 1er Congreso Panameño del Asfalto, Panamá, Panamá, 2023.
- [32] W. Chen et al., "Study on the optimum steel slag content of sma-13 asphalt mixes based on road performance," *Coatings*, vol. 11, no. 12, Dec. 2021, doi: 10.3390/coatings11121436.
- [33] H. A. Omar, N. I. Md. Yusoff, M. Mubarak, and H. Ceylan, "Effects of moisture damage on asphalt mixtures," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 7, no. 5, pp. 600–628, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jtte.2020.07.001.
- [34] T. A. Tedla, D. Singh, and B. Showkat, "Effects of air voids on comprehensive laboratory performance of cold mix containing recycled asphalt pavement," *Construction and Building Materials*, vol. 368, no. 130416, 2023.
- [35] P. Tavassoti and H. Baaj, "Moisture Damage in Asphalt Concrete Mixtures: State of the Art and Critical Review of the Test Methods," In Transportation Association of Canada 2020 Conference and Exhibition-The Journey to Safer Roads, 2020.
- [36] A. J. Taylor, J. Moore, and N. Moore, "NCAT Performance Testing Round Robin," Alabama, Jan. 2022.
- [37] K. L. Ng Puga, "Rheology and performance evaluation of Polyoctenamer as Asphalt Rubber modifier in Hot Mix Asphalt," Iowa State University, Iowa, 2013.
- [38] F. Zhang, L. Wang, C. Li, and Y. Xing, "Predict the phase angle master curve and study the viscoelastic properties of warm mix crumb rubber-modified asphalt mixture," *Materials*, vol. 13, no. 21, pp. 1–26, Nov. 2020, doi: 10.3390/ma13215051.
- [39] H. Alimohammadi, J. Zheng, A. Buss, V. R. Schaefer, C. Williams, and G. Zheng, "Finite element viscoelastic simulations of rutting behavior of hot mix and warm mix asphalt overlay on flexible pavements," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 14, no. 6, pp. 708–719, Nov. 2021, doi: 10.1007/s42947-020-0057-5.
- [40] Ministerio de Transporte, *Manual de diseño de pavimentos asfálticos con medios y altos volúmenes de tránsito*. Segunda versión, Bogotá, 2018.
- [41] Pavetest, "Servo-hydraulic Dynamic Testing System (DTS-30)." Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.matest.com/en/product/b230-dynamic-testing-system-dts-30>
- [42] M. K. Mora Valverde, J. P. Aguiar Moya, M. Jiménez Acuña, and W. Sequeira Rojas, "Análisis de la variabilidad asociada a ensayos de fatiga en mezclas asfálticas," *Revista Infraestructura Vial*, vol. 23, no. 41, pp. 20–30, Feb. 2021, doi: 10.15517/iv.v23i41.44420.
- [43] G. Corazzari Herrera, "Correlación de los resultados de ensayo de flexión en 4 puntos con distintos parámetros del ensayo de flexión semicircular," Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2021.
- [44] I. Kröger and C. Pfeiff, "Ensayos ágiles en DSR para estimar el desempeño de mezclas asfálticas," México, Dec. 2019.
- [45] T. Rosales Navarro, "Mezcla Asfáltica Altamente Modificada con Polímeros Elastómero Termoplástica Sintético para Mejorar sus Propiedades Física y Mecánicas," Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú, 2022.
- [46] L. Jiao, J. Harvey, R. Wu, M. Elkashef, D. Jones, and Y. Liang, "Preliminary Study on Developing a Surrogate Performance-Related Test for Fatigue Cracking of Asphalt Pavements," 2023. doi: 10.7922/G2TM78D9.
- [47] I. L. Lim, I. W. Johnston, and S. K. Choi, "Stress Intensity Factors for Semi-Circular Specimens Under Three-Point Bending," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 44, no. 3, pp. 363–382, 1993.
- [48] L. N. Mohammad, M. Kim, and M. Elseifi, "Characterization of Asphalt Mixture's Fracture Resistance Using the Semi-Circular Bending (SCB) Test," in 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: Mechanisms, Modeling, Testing, Detection and Prevention Case Histories , Netherlands.: Springer , 2012, pp. 1–10.
- [49] American Society for Testing and Materials (ASTM), "ASTM D8044-16: Standard Test Method for Evaluation of Asphalt

- Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures,” West Conshohocken, Pennsylvania, 2016.
- [50] Y. Meng et al., “A review on evaluation of crack resistance of asphalt mixture by semi-circular bending test,” *Journal of Road Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 87–97, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jreng.2022.07.003.
- [51] H. L. Delbono and N. E. Gullino, “Ensayo a fatiga, implementando la Semi probeta (SCB), sobre mezclas asfálticas con diferentes modificadores del cemento asfáltico,” *Ingenio Tecnológico*, vol. 2, pp. 1–28, 2020, Accessed: Sep. 16, 2023. [Online]. Available: <http://portal.amelica.org/amei/journal/266/2661113010/>
- [52] American Association of State Highway and Transportation Officials, “Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Illinois Flexibility Index Test (I-FIT),” Washington, DC, USA, 2020. [Online]. Available: www.matest.ru
- [53] D. Batioja-Alvarez, J. Lee, and J. E. Haddock, “Understanding the Illinois Flexibility Index Test (I-FIT) using Indiana Asphalt Mixtures,” *Transp Res Rec*, vol. 2673, no. 6, pp. 337–346, Jun. 2019, doi: 10.1177/0361198119841282.
- [54] Z. Zhu, “Asphalt Concrete Long-term Aging Characterization Using I-FIT Specimens,” *Constr Build Mater*, vol. 200, pp. 181–187, 2019.
- [55] I. L. Al-Qadi et al., “Development of Long-Term Aging Protocol for Implementation of the Illinois Flexibility Index Test (I-FIT),” Illinois, Aug. 2019.
- [56] American Society for Testing and Materials (ASTM), “ASTM-D8225: Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature,” West Conshohocken, Pennsylvania, 2019. doi: <https://doi.org/10.1520/D8225-19>.
- [57] F. Zhou, R. Steger, and W. Mogawer, “Development of a coherent framework for balanced mix design and production quality control and quality acceptance,” *Constr Build Mater*, vol. 287, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123020.
- [58] W. G. Buttlar, L. Urrea-Contreras, B. Jahangiri, P. Rath, and H. Majidifard, “Support for Balanced Asphalt Mixture Design Specification Development in Missouri,” Missouri, Jul. 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.17441.84322.
- [59] P. S. Chowdhury, S. L. A. Noojilla, and M. A. Reddy, “Evaluation of fatigue characteristics of asphalt mixtures using Cracking Tolerance index (CTIndex),” *Constr Build Mater*, vol. 342, no. 128030, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128030>.
- [60] C. Yan, Y. Zhang, and H. U. Bahia, “Comparison between SCB-IFIT, un-notched SCB-IFIT and IDEAL-CT for measuring cracking resistance of asphalt mixtures,” *Constr Build Mater*, vol. 252, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119060.
- [61] F. Yin, A. J. Taylor, and N. Tran, “Performance Testing for Quality Control and Acceptance of Balanced Mix Design,” Auburn, Alabama, May 2020.
- [62] K. D. Hall, E. Castillo-Camarena, A. F. Braham, N. Parnell, and A. Richey, “Performance-Based Asphalt Mixture Design (PBD) for Arkansas,” Dec. 2022.
- [63] B. Jackson Porras, “Análisis del Comportamiento de las Propiedades Físico-Mecánicas de la Mezcla Asfáltica Modificada con Resin8,” Universidad Latina de Costa Rica, Costa Rica, 2022.