

**Ensayo dinámico axial en probetas  
 cilíndricas entalladas para medir el  
 comportamiento a fatiga en mezclas  
 asfálticas**

Axial dynamic test in notched cylindrical  
 specimen to measure fatigue behavior  
 in asphalt mixtures

Luis Mardones Parra\*

Gonzalo Valdés Vidal\*\*

Elsa Sánchez Alonso\*\*\*

Alejandra Calabi Floody\*\*\*\*

*Universidad de la Frontera, Chile*

\* Ingeniero Constructor de la Universidad de la Frontera, Departamento de Ingeniería de Obras Civiles. *luis.mardones.p@ufrontera.cl*

\*\* Doctor de la Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad de La Frontera, Departamento de Ingeniería de Obras Civiles. *gonzalo.valdes@ufrontera.cl*

\*\*\* Doctor de la Universidad de Cantabria, Universidad de La Frontera, Departamento de Ingeniería de Obras Civiles. *elsa.sanchez@ufrontera.cl*

\*\*\*\* Doctor de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad de La Frontera, Departamento de Ingeniería de Obras Civiles. *alejandra.calabi@ufrontera.cl*

**Correspondencia:** Luis Mardones Parra. Teléfono: 56-45-2325681, Dirección: Av. Francisco Salazar 01145, Temuco, Chile.

Apoyos recibidos por el Proyecto DIUFRO DI18-0053, Evaluación de la resistencia a fisuración de las mezclas asfálticas por medio del desarrollo de un nuevo ensayo de fatiga acelerado. Marzo 5 del 2018.

## Resumen

La fisuración por fatiga es uno de los mecanismos de deterioro más comunes en las estructuras de pavimentos. Este fenómeno se encuentra asociado al deterioro generado como consecuencia de la aplicación de cargas repetitivas cuya magnitud de carga es inferior a la resistencia máxima admisible que puede soportar el material. Por lo mismo, la aplicación continua de las cargas generadas por la acción del tránsito da lugar a un progresivo deterioro de las capas del pavimento. En la actualidad, existen distintas metodologías que permiten predecir la fisuración por fatiga, pero un gran número de estas se caracterizan por ser procedimientos complejos, y en muchas ocasiones no se garantizan la falla de algunos tipos de mezclas, o no relacionan las condiciones de carga aplicadas con las sufridas en el pavimento. Es por esto que el desarrollo de ensayos efectivos es fundamental para comprender el comportamiento frente a la falla por fatiga de las mezclas asfálticas. En este contexto, el artículo presentado tiene como objetivo principal proponer una metodología de ensayo para evaluar la fisuración por fatiga por medio del uso de una probeta cilíndrica entallada. El método propuesto permite la reproducción del estado tensional del pavimento, a fin de evitar la disipación de esfuerzos, de modo que se concentren las tensiones en la zona intermedia de la probeta, previamente entallada. Para este procedimiento propuesto, se evaluaron tres tipos de áridos para una mezcla semidensa usualmente utilizada en capas de rodadura, determinándose las leyes de fatiga para cada mezcla. Además, se presenta un análisis de durabilidad de las mezclas evaluadas.

**Palabras claves:** fatiga, fisuración, mezclas asfálticas, procedimiento de ensayo.

## Abstract

Fatigue cracking is one of the most common damage mechanisms on the pavement structures. This phenomenon is associated to the damage produced by repetitive load application, whose load magnitude is lower than the maximum admissible resistance that the material may resist. Because of this, the continuous application of loads generated by the traffic creates a progressive damage in the pavement layers. Currently, there are different methodologies that allow predicting the fatigue cracking, but most of these methodologies are complex procedures which may not guarantee the failure of some types of mixtures and may not relate the applied load conditions to those suffered in the pavement. For this reason, to understand the fatigue cracking behavior of asphalt mixtures is essential to develop effective fatigue tests. In this context, the main goal of this paper is to propose a test methodology to evaluate fatigue cracking by using a notched cylindrical asphalt concrete specimen. The proposed method allows reproducing the pavement tensional state, avoiding the stress dissipation, and focusing the strains in the middle of the previously groove carved specimen. A semi-dense asphalt mixture gradation, used in asphalt pavement surface layer, was chosen. Three types of aggregates were evaluated, determining their fatigue laws. Besides, an analysis of durability of asphalt mixtures was presented.

**Key words:** asphalt, failure, fatigue, mixture, test method

*Fecha de recepción:* 19 de junio de 2018  
*Fecha de aceptación:* 24 de octubre de 2018

## I. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos flexibles deben estar diseñados para proveer una superficie de rodadura resistente y duradera [1]. A fin de conseguir esto, las metodologías de diseño de pavimento mecanicistas consideran las leyes de fatiga de las mezclas asfálticas un parámetro para evaluar su durabilidad [2].

La fatiga se define como un deterioro donde el material se somete a la aplicación de cargas repetitivas, en el cual los niveles de tensión aplicados son inferiores a la resistencia máxima admisible [3], [4], lo que da como resultado una pérdida de su rigidez [5]. En el pavimento esto conduce a la aparición de grietas y a la disminución de su vida útil [6].

Se pueden identificar tres fases en el proceso de degradación por fatiga de una mezcla asfáltica (Figura 1). La Fase I o fase de adaptación, en la que se inicia la microfisuración junto con una disminución acelerada del módulo de rigidez de la mezcla, fenómeno que se atribuye al efecto viscoelástico no lineal, de tixotropía o calentamiento de la mezcla [7]. La Fase II o fase de fatiga, la cual se caracteriza por la evolución del daño por fatiga con la aparición de las macrofisuras producto de la interconexión de las microfisuras (cuya velocidad de avance dependerá del tipo de carga, del espesor y la rigidez del material). La Fase III o fase de falla, en la que ocurre la interconexión de las macrofisuras, lo cual provoca una superficie de fallo dominante que termina propagándose a través del material, y conlleva a la aparición de una fisura en la superficie de la capa del pavimento [8], [9].

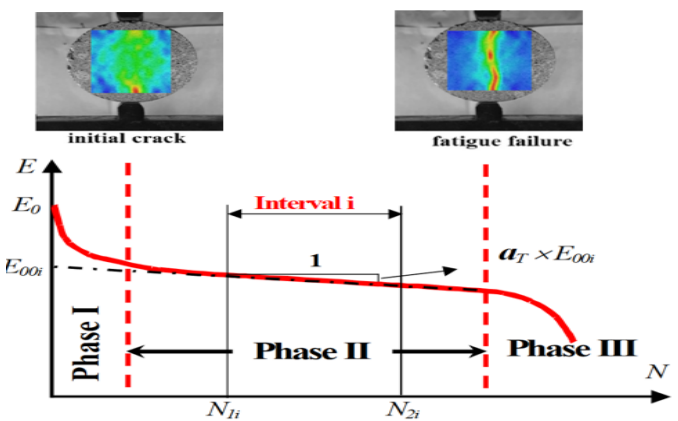
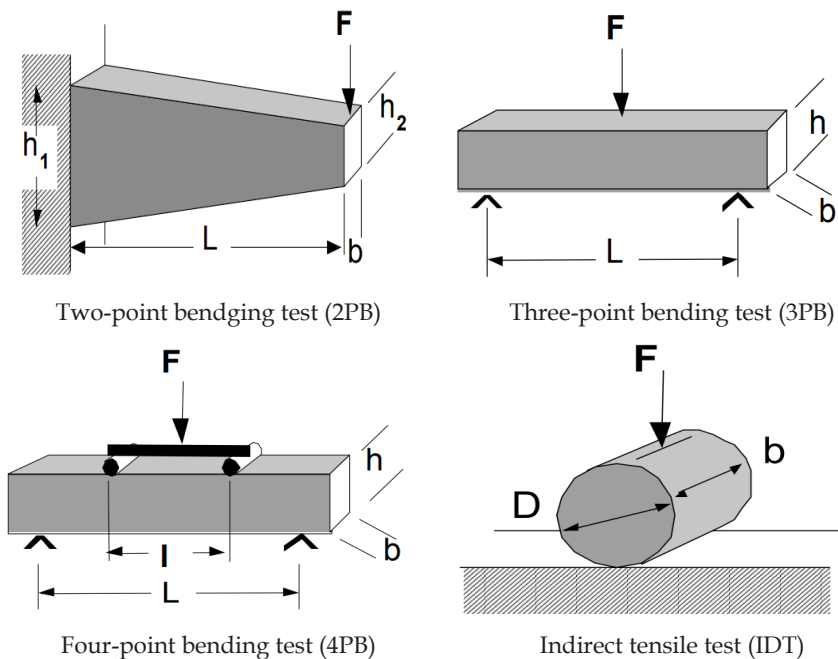


Figura 1. Fases de degradación de las mezclas asfálticas por el fenómeno de la fatiga. Fuente: [8]

Existe un gran número de métodos capaces de evaluar el comportamiento ante la fatiga de las mezclas asfálticas. Sin embargo, ninguno se utiliza de forma generalizada, de manera que no existe un ensayo de referencia para evaluar este tipo de fisuración [10]. También ocurre que muchos de los ensayos que existen no correlacionan las condiciones de carga aplicadas con las sufridas en el pavimento. No obstante, aquellas metodologías que logran reproducir las condiciones de carga reales, por lo general, son muy sofisticadas y de un elevado costo [10]. Las metodologías convencionales (Figura 2) intentan simular los distintos tipos de esfuerzos a los que se ve sometida la estructura de pavimento [4]. Esto lo consiguen tras la aplicación de cargas cíclicas que mantienen constante la deformación o el esfuerzo aplicado, en busca de la falla de la mezcla [4]. Algunos autores sugieren que la metodología de tensión o esfuerzo controlado simula mejor el comportamiento en pavimentos con mayores espesores, mientras que los ensayos a deformación controlada son más apropiados para pavimentos delgados [11]. También existen otros criterios para representar los mecanismos de inicio, desarrollo y propagación de la fisuración por fatiga, entre los que se destacan los criterios de daño continuo y de energía disipada [12].



**Figura 2.** Procedimientos para evaluar el comportamiento a la fatiga de mezclas asfálticas Fuente: [13]

El criterio de fallo tradicional a fatiga define la falla cuando el módulo del material se reduce al 50% de su valor inicial. Para los ensayos a esfuerzo controlado, esto ocurre cuando la deformación aumenta al doble, mientras que en los ensayos a deformación controlada ocurre cuando el esfuerzo o carga aplicada disminuye a la mitad de su valor inicial. Este criterio de fallo se cuestiona en la literatura cuando se analizan mezclas más deformables, como, por ejemplo, aquellas con altos contenidos de ligante, o cuando se utilizan ligantes modificados. Este fenómeno se da a causa de la existencia de una acomodación de los materiales dentro de la mezcla, producto de la dinámica de la carga aplicada (tixotropía), o bien, de un calentamiento interno del material, y no necesariamente refleja la falla de la mezcla [14], [15]. Asimismo, otros autores señalan que el criterio de fallo tradicional no siempre es representativo del daño real en la mezcla, puesto que es reversible [16]. Es decir, una vez que se ha dejado de aplicar la carga, este recupera la capacidad de resistir esfuerzos [11], [17]. En este mismo contexto, se ha señalado que un 50% de la reducción de la rigidez para el enfoque tradicional no siempre indica la falla real de la mezcla, lo cual puede ser un 65% de reducción del módulo, un valor más representativo del fallo [18].

De las metodologías señaladas en la Figura 2, el método de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas es el método más práctico, ya que la muestra proviene de procedimientos conocidos de compactación tales como Marshall y compactación giratoria. No obstante, el método no provee una carga tracción-compresión que se ajuste a la respuesta real de la estructura de pavimento. Tras el paso de una carga se genera una gran concentración de tensiones de tracción en la zona inferior de la capa, traducidas en un esfuerzo de compresión en la parte superior; cuando la carga se aleja del punto de medición, las tensiones se revierten de nuevo, lo que genera un estado continuo de tensiones de tracción y compresión en el material [19], [20].

En esta línea de estudio nace la búsqueda y la importancia de proponer nuevos procedimientos que evalúen de mejor forma el comportamiento de las mezclas ante la falla por fatiga [9], [21]. Es por esto que el propósito del presente artículo es realizar una contribución adicional a los estudios mencionados, al proponer un procedimiento de ensayo a fatiga que permita mejorar algunos de los inconvenientes de los actuales procedimientos. La propuesta de ensayo se basa en una metodología sencilla, con la aplicación de un esfuerzo de tracción-compresión en procura que no exista disipación

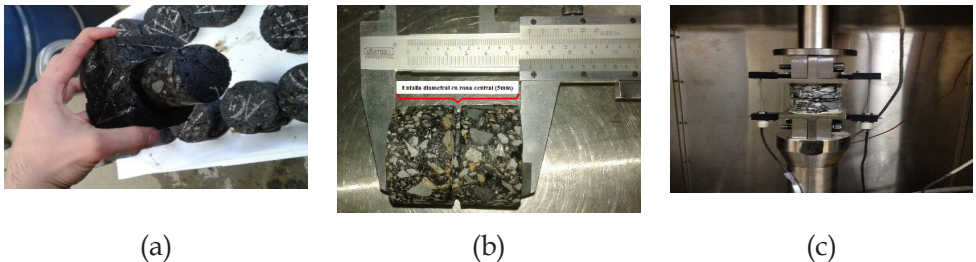
de tensiones, con el uso de una probeta de fácil fabricación y bajo un criterio de fallo que garantice la rotura del material.

## II. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

### Montaje de probeta

Para el desarrollo de este procedimiento se utiliza una probeta cilíndrica proveniente de la extracción de un núcleo de 50mm de diámetro y una altura de 60mm al cuál se le induce una entalla diametral de 5 mm, a fin de estar en capacidad de inducir un plano de falla en el proceso de fisuración (Figura 3a y 3b). Con el propósito de conseguir este núcleo es posible utilizar una probeta cilíndrica fabricada a través del compactador Marshall o del compactador giratorio, así como es posible extraerlo de un testigo de carretera. La particularidad de la metodología es que la extracción de las probetas cilíndricas es perpendicular al sentido de compactación, de manera que represente de forma más adecuada su estado en una estructura de pavimento.

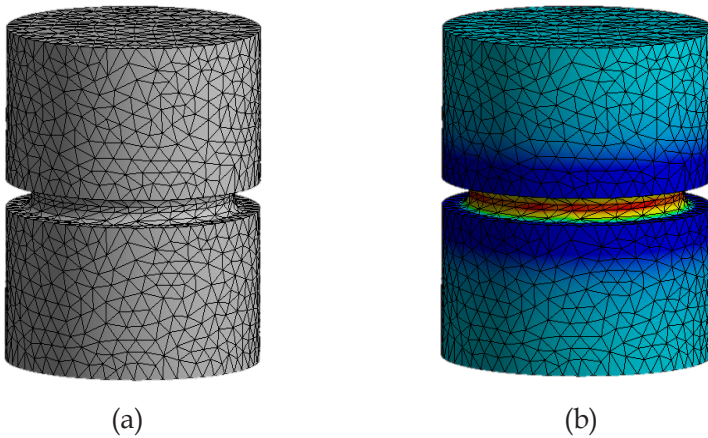
Estas probetas, una vez dimensionadas, se pegan mediante un adhesivo epóxico a unas placas de acero, las cuales permiten fijarla al axial de una prensa multiensayo. A las placas de acero se le fijan los sensores para que midan las deformaciones en el desarrollo del procedimiento. (véase la figura 3c).



**Figura 3.** (a) Núcleo diámetro = 2"; (b) Entalla diametral 5mm; (c) Montaje probeta cilíndrica.

## Procedimiento de ensayo

El método consiste en someter una probeta a un ciclo de tracción-compresión bajo un nivel de tensión constante en el tiempo hasta producir la falla del material. Entre las singularidades del método propuesto, se encuentra que el sentido de aplicación de las cargas es perpendicular al sentido de compactación del material, lo que refleja el estado tensional del material en la estructura de pavimento. Además, la metodología, al llevarse a cabo sobre una probeta cilíndrica en la que la tensión se aplica axialmente mediante cargas sinusoidales (tracción-compresión), logra medir los niveles de deformación en el mismo plano de la aplicación de la carga. Asimismo, se induce el plano de falla mediante una entalla diametral en la zona central, producto de una mayor concentración de tensiones en esa zona (véase la Figura 4).



**Figura 4.** (a) Modelación FEM de la probeta sin la aplicación de tensiones; (b) modelación FEM de la probeta con la aplicación de una tensión a tracción y la visualización de la concentración de los esfuerzos en la zona de la entalla.

El criterio de falla por fatiga se considera adecuado cuando se puede determinar con precisión el punto de transición entre la Fase I y la Fase II en el proceso de degradación de una mezcla asfáltica [22]. Es por esto que para esta metodología se consideró el criterio de fallo llamado “deformación crítica” propuesto por Pérez Jimenez et al.[23], puesto que con este criterio se asegura la falla del material y es posible observar que este se acerca en gran medida, al cambio desde la Fase II a las Fase III, independiente de si la



mezcla es dúctil o rígida (véase la Figura 5<sup>a</sup>). [23]. También se definió como módulo inicial aquel módulo producido en el ciclo 200, debido a que en los ciclos anteriores el material podría encontrarse en la Fase I de adaptación, de acuerdo con lo explicado en el apartado anterior.

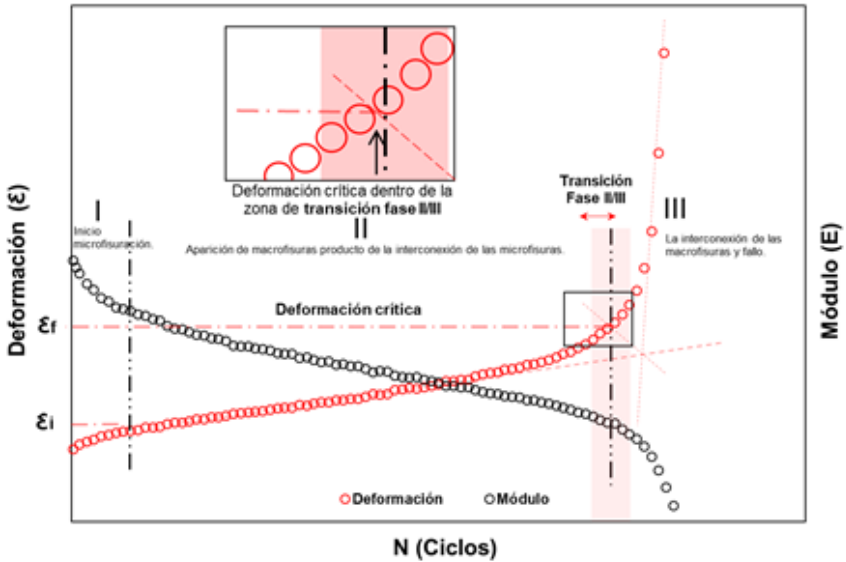


Figura 5. Fases de degradación vs criterio de fallo deformación crítica.

El módulo dinámico queda definido por el cociente entre la deformación y la tensión generada sobre el espécimen. Ahora bien, la deformación está determinada según el área de las distintas secciones de la probeta, por lo que para este procedimiento se define el módulo dinámico en función de la geometría de la probeta, calculado mediante la siguiente expresión (Ecuación 1):

$$MD = \frac{0,032 P}{\Delta L} \quad (1)$$

Donde:

MD = Módulo dinámico, (MPa).

P = Carga aplicada sobre el espécimen, (N).

ΔL = Variación de la altura de la probeta entre el ciclo (tracción- compresión), (mm).



En cuanto a la deformación, esta se determina en la zona de la entalla y queda definida en la siguiente expresión (Ecuación 2):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{40,2} \cdot 10^6 \quad (2)$$

Donde:

$\varepsilon$  = Amplitud de la deformación en la sección de la entalla, (Micro e).

$\Delta L$  = Variación de la altura de la probeta entre el ciclo (tracción-compresión),(mm).

Los parámetros de amplitud de carga, frecuencia y periodos de descanso, así como las condiciones de ensayo (temperatura de ensayo y humedad), pueden variar según las propiedades del material.

### Fase experimental

Se utilizó una mezcla semidensa tipo IV-A-12 usualmente utilizada en Chile para capas de rodadura, cumpliendo con los estándares exigidos de acuerdo con la normativa chilena (véase la Figura 7). Se utilizó un ligante tipo CA-24 (especificación chilena) y tres tipos de áridos (véase la Figura 6).

Con la finalidad de observar la sensibilidad del ensayo, se utilizó un árido de cantera (AC) y dos áridos de origen fluvial (AF-1 Y AF-2). Los áridos utilizados se diferencian por su mineralogía y su procedimiento de trituración (Tabla 1). El árido AC se caracterizó por tener un contenido mayor de sílice junto con una forma más angulosa, incluso mayor que el árido AF-1 que fue sometido al mismo proceso de trituración (triturador de cono). Mientras que el árido AF-2 se caracterizó por tener una forma más cúbica (triturador de impacto). El contenido óptimo de ligante asfáltico fue de un 5,2% sobre el peso de los áridos para las tres mezclas evaluadas.

**Tabla 1.** Propiedades físicas de los áridos

Ensayo	AC	AF-1	AF-2	Especificación
Desgaste de los ángeles (%)	25	16	15	Máx. 25%-35%
Partículas chancadas(%)	100	92	90	Min. 90%-70%
Partículas lajeadas (%)	8	2,5	0	Máx. 10%-15%
Peso específico (kg/m3)	2360	2630	2640	-

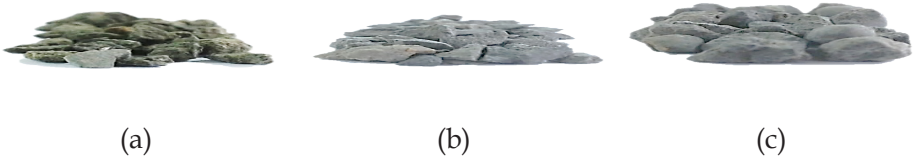


Figura 6. (a) Árido Cantera; (b) Árido Fluvial 1; (c) Árido Fluvial 2

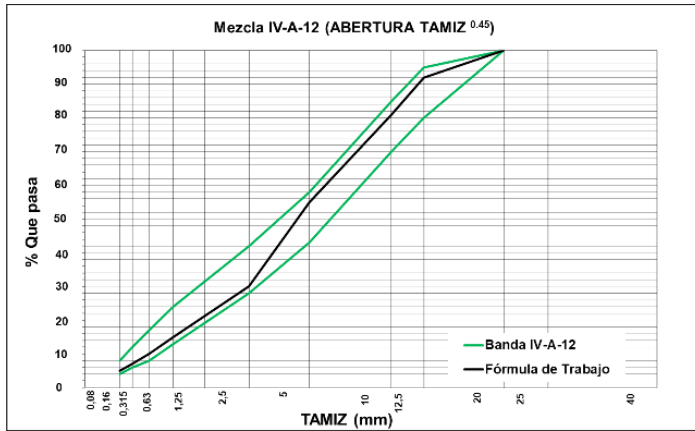


Figura 7. Granulometría de las mezclas en estudio.

Las mezclas se fabricaron por medio del compactador de impacto, bajo la metodología Marshall. Con el fin de conseguir leyes de fatiga representativas, se evaluaron distintos niveles de tensión en función del tipo de árido que se utilizó, con tres probetas por variable. Para las mezclas fabricadas con el árido AC se aplicaron amplitudes de tensión a tracción iguales a 400, 500 y 600 kPa. Para las mezclas fabricadas con los áridos AF-1 y AF-2, las amplitudes de tensión a tracción fueron de 500, 600 y 650 kPa.

También se realizó un estudio de tráfico [24] en el cual se definió el vehículo pesado N° 11 clase FWHA (camión con remolque con  $\leq 5$  ejes) adaptado según clasificación de la normativa chilena y considerado en el diseño de pavimentos como el que más transita por las vías de Chile. A este tipo de vehículo se le determinó la distancia media entre los ejes, con base en los intervalos de distancias entre las ruedas. Una vez determinado este parámetro (5,395 m), tras utilizar la Ecuación 3 se determinó como frecuencia

más representativa de las aplicaciones de carga para el procedimiento propuesto la de 5Hz (véase en la Tabla 2).

$$Frecuencia = \frac{V}{D} \quad (3)$$

Donde:

F = Frecuencia. (Hz)

D = Distancia entre ejes. (m)

V = Velocidad del vehículo. (m/s)

**Tabla 2.** Parámetros para definir frecuencia de estudio

Distancia entre ejes (m)	Parámetros de velocidad (km/h)	Parámetros de velocidad (m/s)	Frecuencia representativa (Hz)	Frecuencia de estudio (Hz)
5,395	100	27,8	5,15	5
5,395	60	16,7	3,09	3
5,395	30	8,3	1,54	1,5

Por otra parte, con el propósito de definir la temperatura de ensayo a fatiga, se determina las temperaturas promedio máximas y mínimas así como los rangos entre los que fluctúan las temperaturas en Chile, definiéndose tres condiciones térmicas: fría, cálida y templada. Se concluyó que el rango de temperatura en Chile fluctúa entre los -2 y 35°C por lo que se adoptó una condición templada equivalente aproximadamente a 20 °C.

Adicionalmente, se realizó un análisis de durabilidad de las mezclas evaluadas. Para esto se llevó a cabo un análisis multicapa elástico de una estructura de pavimento establecida, con espesores usualmente utilizados en Chile para altos niveles de tráfico. Se consideró una estructura de pavimento compuesta de una mezcla asfáltica de espesor variable de 20 a 25 cm, una base granular de 15 cm, una subbase granular de 15 cm y subrasante con un suelo que presenta un CBR de 10%.

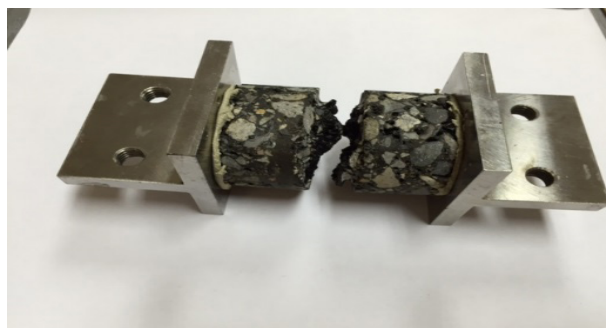
El análisis consideró las siguientes dos situaciones de carga:

- Un eje estándar de 80 kN, aquel utilizado en métodos mecanicistas para el diseño de pavimentos.

- Un eje simple de rodado doble 110 kN, aquel que representa el peso máximo permitido para un eje simple en Chile.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados entregados por la metodología propuesta se muestran a través de la evolución del módulo dinámico y la evolución de la deformación de las mezclas. La probeta utilizada en este ensayo de laboratorio garantiza que las mayores tensiones generadas se concentren en la zona de la entalla, de manera que induce en esta zona la falla de la mezcla (véase la Figura 8).



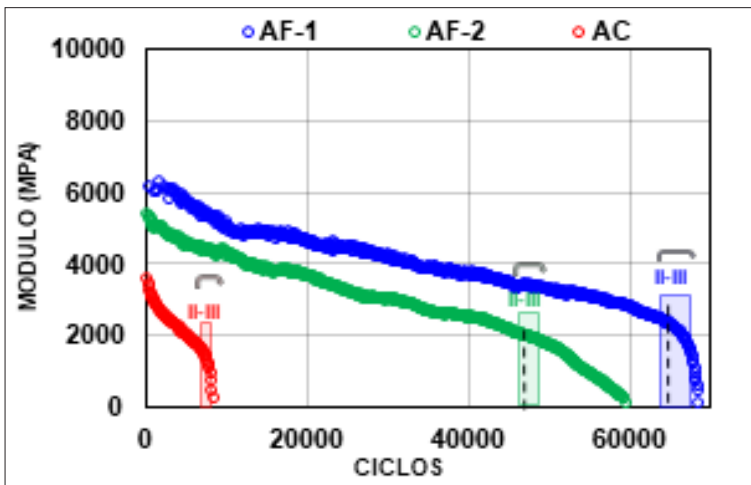
**Figura 8.** Probeta ensayada con falla en la zona inducida.

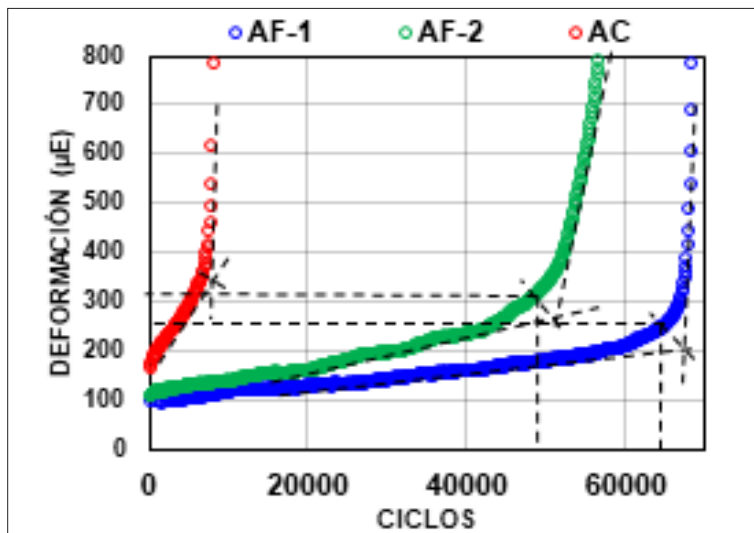
En la Figura 9 se puede observar cómo las mezclas evaluadas presentan distinto desempeño según el tipo de árido, así como se determinó en estudios anteriores existe una diferencia en el desempeño de las mezclas al utilizar áridos de distinto origen y con diferentes propiedades físicas [25]. Los procedimientos de ensayos que evalúan el comportamiento a la fatiga, a partir del ciclo  $10^3$ , muestran que la evolución del módulo del material comienza a disminuir de forma gradual hasta que falla [26] including the study of their linear viscoelastic (LVE). También se observa este comportamiento en la metodología propuesta, pues las tres mezclas evaluadas, muestran una disminución progresiva de su módulo.

No obstante, para las mezclas fabricadas con los áridos de origen fluvial AF-1 y AF-2 se observa un mayor grado de rigidez inicial y su deterioro es más paulatino que la mezcla fabricada con el árido de cantera AC. Esto se manifiesta al observar la pendiente de las curvas de evolución del módulo

dinámico. Asimismo, las curvas de evolución de deformación muestran un deterioro más rápido en la mezcla fabricada con el árido AC, lo que indica una menor durabilidad a fatiga. Una causa de este comportamiento puede ser la menor afinidad árido ligante por la mayor acidez del árido AC, con mayor contenido de sílice en su composición [25]. También es posible observar que las mezclas con los áridos de origen fluvial presentan bajas deformaciones iniciales, y es mayor la de la mezcla con el árido AF-1.

Cabe señalar, que las curvas de evolución del módulo para las tres mezclas evaluadas, describen un rápido descenso a partir del ciclo en el que la probeta alcanza el valor de deformación crítica. Al realizar el análisis según las fases de degradación por fatiga de las mezclas asfálticas, es posible observar que la falla (según criterio de fallo propuesto en el procedimiento) ocurre un poco antes del punto de transición de la Fase II a la Fase III. No obstante, esta falla se encuentra en la zona de transición, lo que significa que el criterio de fallo propuesto asemeja la falla real ocurrida en el material representado por la unión de las macrofisuras.





**Figura 9.** Evolución del módulo dinámico y de la deformación ( $\sigma = 600$  kPa).

Con respecto a los módulos dinámicos determinados en el ciclo 200, estos siguieron una tendencia similar independiente del nivel de tensión impuesto, y es el de AF-1 el mayor, seguido por AF-2 y AC, con valores promedios de 6480 MPa, 6271 MPa y 4021 MPa, respectivamente.

En la Figura 10 se puede observar que los módulos dinámicos están relacionados de forma directa con los módulos de rigidez determinados de acuerdo con la norma europea. Sin embargo, el procedimiento muestra una mayor diferencia para los módulos de las mezclas fabricadas con áridos de origen fluvial que para la mezcla fabricada con el árido de cantera, pues los módulos determinados para el ciclo 200 son mayores en torno al 45% y 22%, respectivamente. Según Zaumanis et al. [27] el parámetro de la rigidez queda definido como la relación entre la tensión impuesta y la amplitud de la deformación. Este valor depende de la frecuencia utilizada y la temperatura de ensayo. Es por esto, que las diferencias observadas pueden asociarse a la utilización de distintas frecuencias de ensayo, geometría de la probeta y distinto procedimiento de aplicación de carga y lectura de deformación [28].

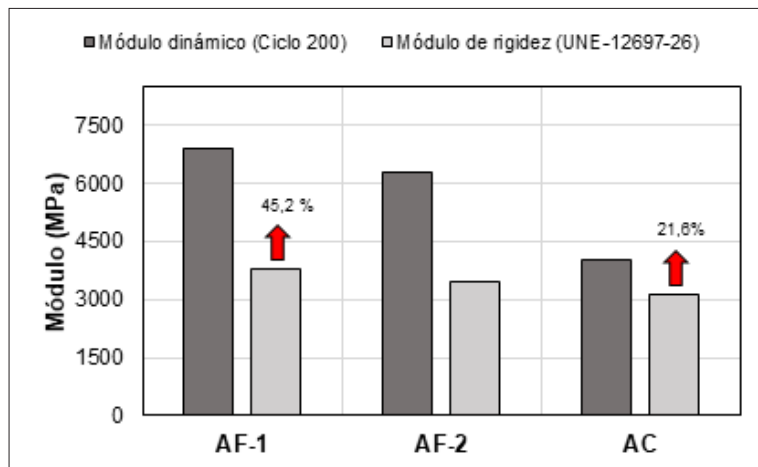


Figura 10. Módulo de rigidez y módulo dinámico.

Las leyes de fatiga de las tres mezclas evaluadas fueron se obtuvieron al relacionar la deformación inicial y el número de ciclos necesarios hasta alcanzar esta deformación crítica. Con este criterio, se obtuvieron pares de valores correspondientes a tres amplitudes de tensión, los cuales permitieron trazar una línea de tendencia y así obtener una ley de fatiga para cada mezcla (véase la Figura 11).

Al analizar las leyes de fatiga, es posible notar que las mezclas asfálticas con áridos de origen fluvial (AF-1 y AF-2) presentan una menor pendiente que la mezcla con árido de cantera. Esto se debe a la condición mineralógica del árido de cantera. Sin embargo, entre las leyes de fatiga de las mezclas con el árido AF-1 y AF-2 igual se percibe una diferencia entre sus pendientes, lo cual posiblemente está asociado a una mayor trabazón interna en la matriz de áridos por parte de la mezcla con AF-1, de manera que es más susceptible en su vida a la fatiga bajo una pequeña variación de la deformación. También, es posible observar que la ley de fatiga de la mezcla con el árido AF-1 se posiciona sobre las leyes de las mezclas con el árido AF-2 y AC, debido a que esta mezcla admite una menor deformación inicial debido a su mayor grado de rigidez.

El valor de  $R^2$  observado en la Figura 11 indica que la línea de regresión se ajusta de forma adecuada a los datos obtenidos en la fase experimental.



También, es posible observar que, para las mezclas evaluadas, la pendiente está relacionada con el módulo dinámico, puesto que a mayor módulo se obtiene una menor pendiente en la ley de fatiga.

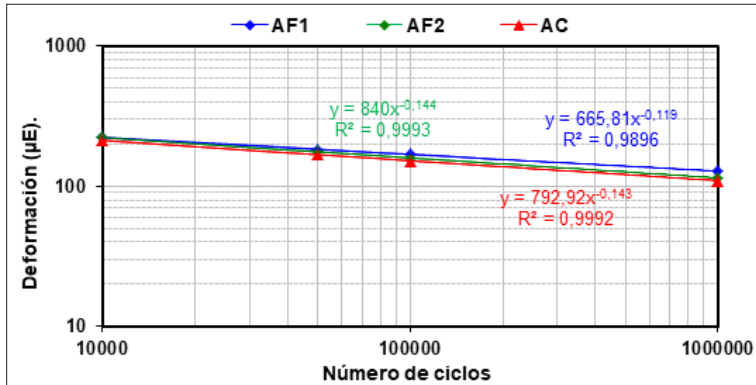


Figura 11. Leyes de fatigas de las mezclas evaluadas.

La durabilidad de los pavimentos frente a la fisuración por fatiga, queda definida por la cantidad de aplicaciones de carga que puede soportar el material. Sin embargo, este tipo de falla depende de la magnitud de la carga aplicada. Es por esto que, al realizar un análisis de durabilidad del fallo por fatiga, el valor máximo que se puede utilizar es de un eje equivalente de 150KN, puesto que la durabilidad de las mezclas asfálticas frente a la fisuración por fatiga disminuye de forma considerable con el aumento de la carga [1].

En la Figura 12 se puede observar que la mezcla con el árido AF-1 tiene una mayor durabilidad con respecto a las mezclas con el árido AF-2 y AC. Esta característica se observa indistintamente de la configuración de carga establecida (80KN y 110KN) y del espesor de pavimento evaluado. La durabilidad de las mezclas depende de los módulos dinámicos junto con las respectivas pendientes de las leyes de fatiga. A mayor módulo y a menor pendiente en la ley de fatiga, existe mayor durabilidad de la mezcla frente a la fisuración por fatiga.

Para las estructuras de pavimento evaluadas en una configuración de carga de 80 KN, es posible notar que la durabilidad de las mezclas fue entre 8,8 a 15 veces más con respecto a la configuración de carga de 110 KN, lo que

muestra la sensibilidad de las estructuras de pavimento frente al aumento de cargas puntuales de los pesos por eje.

Con relación al tipo de árido, se observa que la menor durabilidad fue la de la mezcla fabricada por el árido AC. Por otra parte, la mayor durabilidad de las estructuras de pavimentos analizadas fue para la mezcla fabricada el árido AF-1, aquel árido de origen fluvial y triturado por chancador de cono que entrega una forma más irregular. Estos resultados indican la importancia en el comportamiento a fatiga de la mineralogía y la forma de las partículas del árido utilizado. Un aspecto importante a notar es la sensibilidad del procedimiento para utilizarse como herramienta que permita evaluar la durabilidad a fatiga de las estructuras de pavimento.

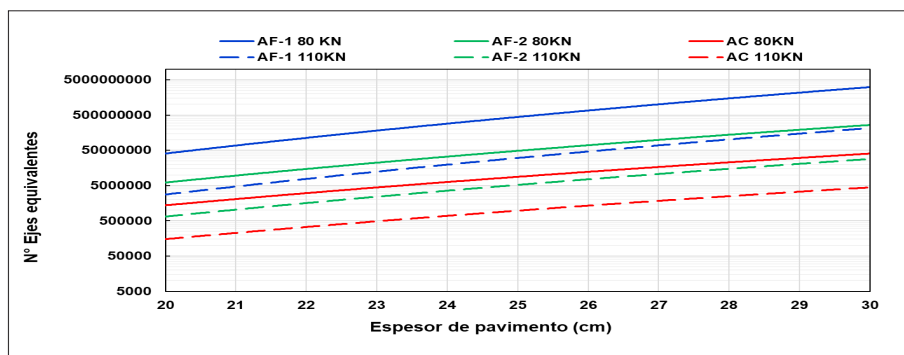


Figura 12. Durabilidad de las mezclas evaluadas bajo dos configuraciones de cargas.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo, se propone un procedimiento de ensayo en el que se aplica un criterio de fallo más representativo para evaluar el desempeño a fatiga de las mezclas asfálticas. El procedimiento se caracteriza por la utilización de una probeta de fácil fabricación, que concentra las tensiones y su rotura en una zona preestablecida por medio de una fisura inducida.

También es posible destacar, que la probeta utilizada se puede obtener de procedimientos estandarizados de compactación, tales como el compactador Marshall y el compactador giratorio, así como de testigos extraídos de campo. Cabe indicar que la probeta de ensayo se extrae perpendicularmente al

sentido de compactación, de modo que refleja el sentido del material en la capa del pavimento. También es posible mencionar que el criterio de fallo utilizado asegura la falla de la mezcla por fisuración del material.

Por otra parte, se destaca la existencia de una buena sensibilidad de la metodología, ya que puede utilizarse para evaluar la fisuración por fatiga de diferentes materiales. Además, fue posible observar que, al utilizar la metodología propuesta, el módulo dinámico presenta una tendencia similar a las del módulo de rigidez.

En resumen, los resultados entregados en este artículo permiten concluir que el procedimiento propuesto es promisorio. Sin embargo, se requiere seguir estudiando otras variables, tales como el tipo de ligante, la temperatura y la frecuencia, entre otras.

## AGRADECIMIENTOS

El presente artículo es el resultado de la investigación respaldada por el Proyecto DIUFRO DI18-0053, financiado a través de la Dirección de Investigación de la Universidad de La Frontera de Chile.

## REFERENCIAS

- [1] A. E. A. E. M. Behiry, "Fatigue and rutting lives in flexible pavement". *Ain Shams Eng. J.*, vol. 3, n. ° 4, pp. 367-374, 2012. doi: [http:// dx.doi.org/10.1016/j.asej.2012.04.008](http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2012.04.008).
- [2] Z. Luo, F. Xiao y R. Sharma, "Efficient reliability-based approach for mechanistic-empirical asphalt pavement design". *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 157-165, 2014. doi: [http:// dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.071](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.071).
- [3] G. G. Al-Khateeb y K. A. Ghuzlan, "The combined effect of loading frequency, temperature, and stress level on the fatigue life of asphalt paving mixtures using the IDT test configuration". *Int. J. Fatigue*, vol. 59, pp. 254-261, 2014. doi: [http:// dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.08.011](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.08.011).
- [4] F. Perez-Jimenez, G. Valdés, R. Botella, R. Miró, y A. Martínez, "Evaluación del proceso de fatiga de mezclas asfálticas mediante un nuevo procedimiento cíclico de barrido de deformaciones EBADE". *Rev. la Constr.*, vol. 10, n. ° 2, pp. 55-65, 2011. doi: [10.4067/S0718-915X2011000200006](https://doi.org/10.4067/S0718-915X2011000200006).
- [5] N. Tapsoba, C. Sauzéat, y H. Benedetto, "Analysis of fatigue test for bituminous mixtures," *J. Mater. Civ.*, pp. 701-710, junio 2012. doi: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000636](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000636).

- [6] F. Moreno-Navarro y M. C. Rubio-Gámez, "A review of fatigue damage in bituminous mixtures: understanding the phenomenon from a new perspective". *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 927-938, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.126>.
- [7] H. Di Benedetto, Q. T. Nguyen, y C. Sauzéat, "Nonlinearity, Heating, Fatigue and Thixotropy during Cyclic Loading of Asphalt Mixtures," *Road Mater. Pavement Des.*, vol 12, n. ° 1, pp.129-158, 2011. doi: 10.3166/RMPD.12.
- [8] H. Baaj, H. Di Benedetto, y P. Chaverot, "Effect of binder characteristics on fatigue of asphalt pavement using an intrinsic damage approach". *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 6, n. ° 2, pp. 147-174, 2005. doi: 10.1080/14680629.2005.9690003.
- [9] F. Moreno-Navarro y M. C. Rubio-Gámez, "Método de Ensayo UGR-FACT para el estudio del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas," *Asf. y pav.*, n.° 12., vol. IV, pp. 29-39, 2014.
- [10] F. Moreno-Navarro y M. C. Rubio-Gámez, "UGR-FACT test for the study of fatigue cracking in bituminous mixes". *Constr. Build. Mater.*, vol. 43, pp. 184-190, 2013. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.024
- [11] N. Saboo, B. P. Das y P. Kumar, "New phenomenological approach for modeling fatigue life of asphalt mixes". *Constr. Build. Mater.*, vol. 121, pp. 134-142, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.147>
- [12] K. A. Ghuzlan y S. H. Carpenter, "Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures using the dissipated energy approach". *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 33, n.° 7, pp. 890-901, 2006. doi: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/l06-032>
- [13] H. Di Benedetto, C. Roche de La, H. Baaj, A. Pronk y R. Lundström, "Fatigue of Bituminous Mixtures : Different Approaches and Rilem Group contribution". *6th RILEM Symp. PTEBM'03, Zurich*, vol. 3, pp. 15-38, 2003.
- [14] F. Pérez-Jiménez, R. Miro, A. Martinez, R. Botella, O. Reyes, y G. Valdes, "False Failure in Flexural Fatigue Tests," en: *2nd Workshop on four point bending. 24-25th September 2009, 2009*.
- [15] J. Zhang, M. Sabouri, M. N. Guddati y Y. R. Kim, "Development of a failure criterion for asphalt mixtures under fatigue loading," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 14, Junio 2014, pp. 1-15, 2013. DOI: 10.1080/14680629.2013.812843
- [16] F. Pérez-Jiménez, R. Botella, T. López-Montero, R. Miró y A. H. Martínez, "Complexity of the behaviour of asphalt materials in cyclic testing," *Int. J. Fatigue*, vol. 98, pp. 111-120, 2017. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.01.026
- [17] Q. T. Nguyen, H. Di Benedetto y C. Sauzeat, "Effect of Fatigue Cyclic Loading on the Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Mixtures". *J. Mater.*

- Civ. Eng.*, vol. 4014003, n.º 7, pp. 1-7, 2015. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000996.
- [18] A. K. Khiavi y M. Ameri, "Laboratory evaluation of strain controlled fatigue criteria in hot mix asphalt," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1497-1502, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.062>
- [19] H. Wang y I. L. Al-Qadi, "Combined Effect of Moving Wheel Loading and Three-Dimensional Contact Stresses on Perpetual Pavement Responses". *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2095, pp. 53-61, 2009. doi: 10.3141/2095-06
- [20] Z. Ge, H. Wang, Y. Wang y X. Hu, "Evaluating fatigue behavior of asphalt mixtures under alternate tension-compression loading model using new alternate biaxial splitting method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 54, pp. 106-112, 2014. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.042>
- [21] L. D. Poulidakos, M. Pittet, A. G. Dumont y M. N. Partl, "Comparison of the two point bending and four point bending test methods for aged asphalt concrete field samples". *Mater. Struct. Constr.*, vol. 48, n.º 9, pp. 2901-2913, 2015. doi : <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-014-0366-8>
- [22] D. Perraton, R. Touhara, H. Di Benedetto y A. Carter, "Ability of the classical fatigue criterion to be associated with macro-crack growth". *Mater. Struct. Constr.*, vol. 48, n.º 8, pp. 2383-2395, 2015. doi: 10.1617/s11527-014-0321-8
- [23] F. Pérez Jimenez, R. Miró, A. Martínez, J. Alonso Mota, J. Cepeda, y M. Rodríguez, *Desarrollo de un nuevo procedimiento para la evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas a partir de su caracterización en un ensayo a tracción*, Madrid, 2005.
- [24] F. Moreno-Navarro, "Design of a Laboratory Test Method for the Analysis of Asphalt Mix Response to Fatigue Cracking," Universidad de Granada, 2013.
- [25] G. Valdés-Vidal, A. Calabi-Floody, R. Miró-Recasens y J. Norambuena-Contreras, "Mechanical behavior of asphalt mixtures with different aggregate type". *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 474-481, 2015. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.050
- [26] N. Tapsoba, C. Sauzéat, H. Di Benedetto, H. Baaj y M. Ech, "Behaviour of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and asphalt shingle" *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 15, n.º 2, pp. 330-347, 2014. doi: 10.1080/14680629.2013.871091
- [27] M. Zaumanis, L. D. Poulidakos y M. N. Partl, "Performance-based design of asphalt mixtures and review of key parameters". *Mater. Des.*, vol. 141, pp. 185-201, 2018. doi: 10.1016/j.matdes.2017.12.035

- [28] L. P. Specht, L. F. d. A. L. Babadopulos, H. Di Benedetto, C. Sauzéat y J. B. Soares, "Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 648-658, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.037>