

IAG179-08-2013
EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ A LARGO PLAZO DE MEZCLAS
ESTABILIZADAS CON ASFALTO ESPUMADO Y CEMENTO

Felipe Halles A.

Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
fhalles@ing.puc.cl

Guillermo Thenoux Z.

Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería
Santiago, Chile
gthenoux@ing.puc.cl

Álvaro González V.

Universidad del Desarrollo, Facultad de Ingeniería
Santiago, Chile
aagonzalez@ingenieros.udd.cl

Resumen

Tradicionalmente las propiedades mecánicas de mezclas recicladas/estabilizadas con asfalto espumado y cemento han sido evaluadas utilizando ensayos de resistencia máxima, tales como resistencia a la tracción indirecta (ITS) o resistencia a la compresión (UCS). Muy pocos estudios han abordado la problemática de las propiedades mecánicas de largo plazo, particularmente utilizando ensayos que cuantifiquen la fatiga de estos materiales. Esta información resulta ser un elemento clave para realizar el diseño estructural de caminos que poseen capas con materiales estabilizados con asfalto espumado. Este trabajo presenta los resultados de un estudio llevado a cabo para evaluar la evolución de la rigidez de estas mezclas en el largo plazo. Como parte del estudio se elaboró una metodología de ensayo para cuantificar la evolución de la rigidez de estos materiales, la cual luego de validada, fue utilizada para evaluar el efecto que tienen en ésta los distintos contenidos de asfalto y cemento tradicionalmente utilizados. Los resultados indicaron que la rigidez se mantiene relativamente constante o disminuye en el tiempo - producto de los ciclos de carga - de acuerdo al estado de tensiones que se produce en la capa reciclada.

Resumo

Tradicionalmente as propriedades mecânicas das misturas de espuma de betum e cimento estabilizada foram avaliados usando os testes de alta resistência, tais como resistência à tracção (ITS) ou à compressão (UCS). Poucos estudos têm abordado a questão das propriedades mecânicas a longo prazo, principalmente utilizando testes que quantificam a fadiga destes materiais. Esta informação é um elemento-chave para o projeto estrutural de estradas que têm camadas com espuma de asfalto materiais estabilizados. Este documento apresenta os resultados de um estudo realizado para avaliar a evolução da rigidez destas misturas, a longo prazo. Como parte do estudo desenvolveu uma metodologia de ensaio para quantificar a evolução da rigidez dos materiais, que, em seguida, validado, foi utilizado para avaliar o efeito do teor diferente neste asfalto e cimento utilizados tradicionalmente. Os resultados indicaram que a rigidez permanece relativamente constante ou diminui ao longo do tempo - um ciclo de carregamento de produto - de acordo com o estado de tensão é produzida na camada reciclado.

INTRODUCCION

Antecedentes Generales

La estabilización/reciclado de materiales granulares utilizando asfalto espumado (AE) es una técnica de rehabilitación ampliamente utilizada en todo el mundo. Sin embargo, aún existe incertidumbre al momento de realizar el análisis/diseño estructural del pavimento respecto a qué módulo elástico o rigidez desarrollará este material durante su vida útil. Aunque hay varias pruebas de laboratorio que permiten evaluar la rigidez de estas mezclas, no se ha desarrollado una metodología que permita medir la evolución de la rigidez en el tiempo y que permita correlacionar los cambios que se han observado en proyectos reales.

En la actualidad existen dos propuestas respecto a la forma en que evoluciona la rigidez de las mezclas de AE en el tiempo. La primera proviene de estudios realizados por Loizos (2007) que analizaron durante un período de 24 meses la rigidez de la capa estabilizada utilizando deflectometría de impacto (FWD) en un proyecto de reciclado construido en Grecia (Figura 1). Los resultados indicaron que la rigidez aumenta gradualmente desde el día de la construcción hasta alcanzar un valor constante, lo cual en este caso en particular ocurrió después de un período de aproximadamente 12 meses. Un hecho que explica este comportamiento corresponde a la pérdida de humedad que se produce en la mezcla durante los primeros meses, asociado al proceso de curado del material. La pérdida de humedad y su relación con el aumento de la resistencia o rigidez también ha sido observado por Bowering (1976), Jones et al. (2008) y Fu et al. (2010), entre otros. Luego de este período, la rigidez se mantuvo constante a pesar del tráfico permanente de vehículos de gran peso.

Por el contrario, proyectos de investigación llevados a cabo en Sudáfrica (Long, 2001) indicaron que las capas de AE muestran una disminución gradual de la rigidez en el tiempo producto de las cargas de tráfico. La Figura 2, muestra los resultados de un ensayo de carga acelerada realizado en un pavimento reciclado con una capa de AE con dosis de 1,8% de asfalto y 2,0% de cemento. Después de la construcción del pavimento se aplicó una carga 40 kN con el HVS (Heavy Vehicle Simulator) de Sudáfrica (Verhaeghe et al, 2006). Durante este estudio se instalaron deflectómetros en distintos puntos de la estructuras (MDD: Multi-Depth Deflectometer) del

pavimento para medir la deflexión y para calcular la rigidez efectiva de cada capa. Los valores de rigidez medidos durante el período de análisis indicaron que la capa de AE tiene dos fases. La primera fase corresponde a período en el cual la rigidez disminuye gradualmente, mientras que la segunda fase corresponde a un período en el cual la rigidez mantiene un valor constante. Durante el experimento, luego de la aplicación de 1.000.000 de ciclos de carga a 40 kN, la carga se incrementó a 80 kN. En este caso la rigidez de la capa de AE mostró una tendencia similar a la observada durante los primeros ciclos de carga. Los resultados proporcionados por el ensayo acelerado también indicaron que durante la segunda fase el material se comporta como un material granular, acumulando una deformación permanente debido a las aplicaciones de cargas cíclicas.

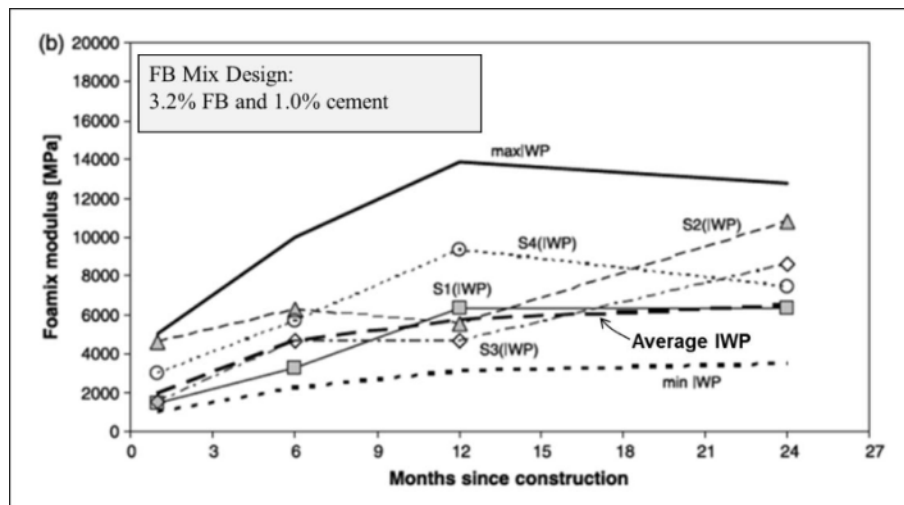


Figura 1: Módulo elástico retro-calculado en proyecto de Grecia.

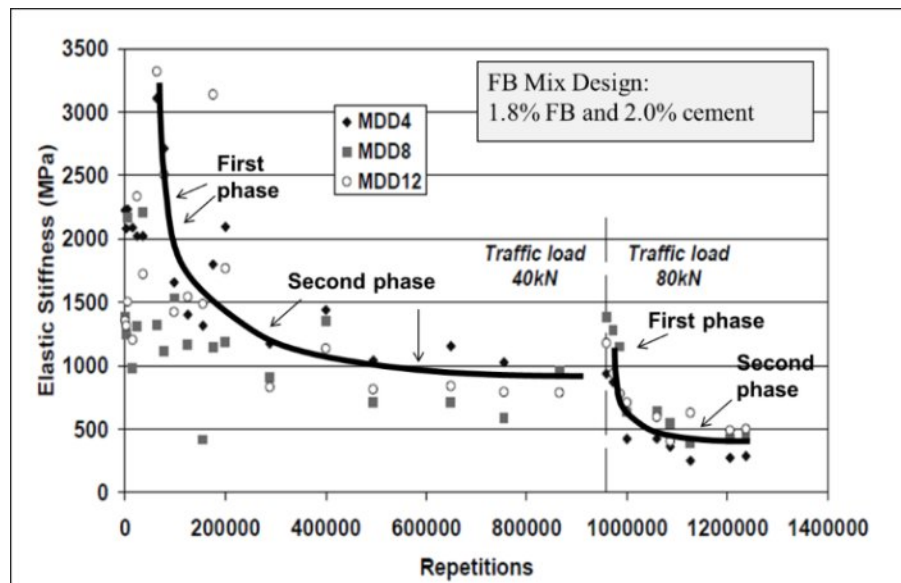


Figura 2: Evolución de la rigidez de la mezcla en proyecto de Sudáfrica

Análisis de la Rigidez de las Mezclas con AE y Cemento

La evolución de la rigidez observada en estructuras de pavimentos que utilizan capas de AE puede ser explicada mediante el estudio de la microestructura de la mezcla de AE. Las partículas de asfalto y de cemento se dispersan por toda la matriz del material granular, adhiriéndose con las partículas más finas de este (arena fina y más pequeños) y formando un mortero que aglomera a las partículas de mayor tamaño. Los enlaces formados por los agentes estabilizadores (asfalto y cemento) no son continuos a lo largo de la microestructura de la matriz, debido a la pequeña proporción relativa utilizada entre los agentes estabilizadores y el material granular. De esta forma, los materiales granulares se estabilizan a través de pequeños enlaces puntuales e independientes.

Cuando las cargas de tráfico aplican cargas sobre la estructura del pavimento, se producen deformaciones y tensiones en la microestructura de la mezcla de AE, las cuales podrían romper algunos de los enlaces según la magnitud, la orientación y la concentración de estas tensiones, produciendo una disminución de la cohesión y por lo tanto una disminución en la rigidez. Si las tensiones o esfuerzos son más pequeñas que la tensión admisible de los enlaces, la mezcla de AE mantendrá su cohesión original y por lo tanto su rigidez.

En base a estas observaciones, es posible afirmar que las diferentes tendencias respecto de la evolución de la rigidez de estas mezclas podrían explicarse por el estado de tensiones que se produce en la capa de AE. Para respaldar esta hipótesis, se utilizó un modelo elástico lineal simple para calcular las tensiones y deformaciones en las capas de AE en los proyectos de Sudáfrica (Long, 2001) y Grecia (Loizos, 2007). En ambos proyectos, las tensiones y deformaciones se calcularon en una profundidad correspondiente a $\frac{1}{4}$ del espesor de la capa de AE, medida desde la parte inferior de la capa de AE. La Tabla 1 muestra los detalles de las propiedades elásticas de los materiales y espesores para cada estructura de pavimento evaluado, así como las tensiones y deformaciones calculadas. La resistencia a la tracción indirecta (ITS) de la mezcla de AE se supuso igual a 300 kPa en ambos proyectos, valor representativo para mezclas de AE con contenidos de cemento de 1,0%.

Sobre la base de los resultados obtenidos del análisis estructural del pavimento, se pudo observar que la capa de AE de la estructura de pavimento en Grecia fue sometida un SR (Stress-Ratio) de 0,20, mientras que la capa de AE de la estructura de pavimento en Sudáfrica a un SR de 0,55. El parámetro SR corresponde a la división entre la tensión efectiva y la tensión máxima admisible. Ambos valores de SR son muy diferentes y podrían explicar el comportamiento observado de la evolución de la rigidez, ya que valores más altos de SR indican que las tensiones de trabajo son más cercanas a las tensiones admisibles del material. En el caso del pavimento de Grecia, es probable que un SR igual a 20% signifique que las tensiones de trabajo efectivas sean menores a las que se requieren para producir algún daño a los enlaces producidos por las partículas de asfalto y cemento, manteniendo de esta forma la rigidez en un valor constante cercano al inicial.

Tabla 1. Tensiones y deformaciones estimadas en los pavimentos de los proyectos de Grecia y Sudáfrica

Capa	Módulo Elástico (MPa)	Grecia				Sudáfrica			
		t (cm)	σ (kPa)	ε (μm)	SR	t (cm)	σ (kPa)	ε (μm)	SR
Superficial	4000	9				3			
Asfalto espumado	1200	25	60	45	0.2	25	165	100	0.55
Otras capas	1000 (*)	10				---			
Subbase granular	250	15				25			
Subrasante	90 (**)	---				---			

(*) capa tratada con cemento, (**) estimado por los autores, SR = tensión efectiva dividido por tensión máxima admisible, t = espesor de la capa, σ = tensión, ε = deformación unitaria

OBJETIVOS Y ALCANCES

Este documento presenta los resultados de un trabajo de investigación llevado a cabo para representar y cuantificar la evolución de la rigidez de mezclas con asfalto espumado (AE) y cemento sometidas a diferentes niveles de estado de tensiones. Esta información se utiliza para dos objetivos principales:

- Definir el nivel de tensiones máximo que debe ser aceptado en la capa de AE con el fin de mantener constante su rigidez.
- Establecer el efecto de los contenidos de asfalto y cemento en el desempeño a largo plazo de las mezclas con AE.

Ambos planteamientos toman como base la hipótesis de que la tasa de deterioro de estas mezclas, manifestada a través de una disminución progresiva de su rigidez, depende del estado de tensiones que se desarrolla en la capa estabilizada.

El estudio llevado a cabo utilizó como base un solo tipo de material granular recuperado o reciclado, por lo cual las conclusiones específicas están acotadas a estos materiales y las mezclas obtenidas a partir del factorial definido en función de los distintos contenidos de asfalto y cemento utilizados.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Materiales

Materiales granular recuperado y asfalto reciclado (RAG)

Los materiales fueron obtenidos directamente de un proyecto existente y las propiedades son las siguientes.

- Tamaño máximo del árido: 19 mm
- Material pasante tamiz # 200 (0,075 mm): 6%

- Material pasante tamiz # 40 (0,425 mm): 13%
- Material pasante tamiz # 4 tamiz (4,75 mm): 46%
- Partículas trituradas: 100%
- Índice de Plasticidad: No plástico
- Contenido de humedad óptimo: 6,0%
- Densidad máxima: 2.190 kg/m³

Propiedades agentes estabilizantes

Las propiedades del ligante asfáltico fueron:

- Viscosidad a 60 °C: 3.210 poises.
- Ductilidad a 25 °C: Mayor a 150 cm a 5 cm/min
- Índice de penetración: -0,9
- Propiedades del residuo (TFOT):
 - Viscosidad a 60 °C: 9.180 poises
 - Ductilidad: Mayor a 150 cm a 5 cm/min.

Respecto al cemento, se utilizó Portland tipo II.

Preparación, mezcla, compactación y curado.

El material granular (RAG) fue mezclado con asfalto espumado utilizando ligante asfáltico a una temperatura de 165 °C con 2,5% de agua de espumación. La tasa de expansión fue de 12 a 15 y la vida media de 10 a 12 segundos. El material fue pre-acondicionado en paquetes de 20 kg en una pieza acondicionada a temperaturas entre 18 y 25 °C. El RAG fue mezclado con el asfalto espumado a una humedad promedio de 75% de la humedad óptima de compactación del material granular sin aditivos. Durante la mezcla, primero se incorporó el cemento, luego el agua de compactación y en último lugar el asfalto espumado.

Se prepararon probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 60 mm de alto utilizando un compactador giratorio. Todas las probetas fueron confeccionadas utilizando la misma cantidad de material y el número de giros fue ajustado de tal forma de que todas las probetas tuvieran la misma densidad. Las probetas fueron extraídas del molde inmediatamente luego de preparadas y curadas durante 72 hrs en horno a 40 °C

Ensayo de laboratorio

Para evaluar la evolución de la rigidez de estas mezclas se utilizó el ensayo de Fatiga a la Tracción Indirecta, cuya sigla en inglés es ITFT (Indirect Tensile Fatigue Test). Este test utiliza LVDTs que se instalan diametralmente en la probeta para medir las deformaciones transversales (Figura 3). La estimación de la tensión de tracción transversal junto a la medición de la deformación transversal, permite evaluar el Módulo Elástico o Rigidez instantánea de la mezcla, así como también su evolución en el tiempo debido a los ciclos de carga. El estado de tensiones aplicado durante el ensayo fue representado a través del parámetro SR o Stress-Ratio, el cual corresponde a la división entre la tensión efectiva de trabajo (σ_x) y la tensión máxima admisible. La tensión máxima en este caso corresponde al parámetro ITS (Indirect tensile Strength). En estos experimentos, el parámetro de rigidez o módulo elástico fue representado por la letra S. Sobre esta base, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi t d} \quad (1)$$

Donde P es la carga vertical, t es el espesor de la probeta y d es el diámetro de la probeta.

$$S = \frac{\sigma_x}{\varepsilon} \quad (2)$$

Donde S es el modulo elástico o rigidez; σ_x corresponde a la tensión efectiva de trabajo; y ε la deformación transversal medida por los LVDT.

$$SR = \frac{\sigma_x}{ITS} \quad (3)$$

Donde σ_x es la tensión efectiva de trabajo, e ITS es la tensión transversal máxima que resiste la probeta.

La Figura 3 muestra los resultados de uno de estos ensayos. En este se puede apreciar como la rigidez de la mezcla decrece debido al aumento progresivo de las deformaciones bajo ciclos de carga.

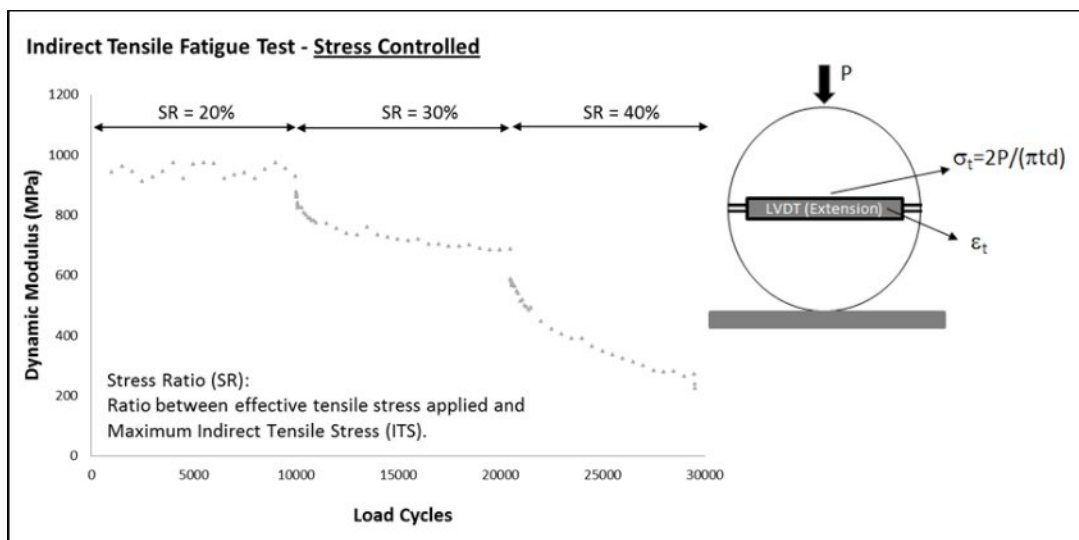


Figura 3: Ejemplo de un ensayo de fatiga a la tracción indirecta ITFT

Diseño experimental

El programa de ensayo de laboratorio fue diseñado para estudiar el impacto de distintos contenidos de asfalto y cemento en el desempeño de la mezcla, para probetas con distintos niveles de estado de tensiones (representado por SR). Paralelamente el programa de ensayos buscó determinar el nivel máximo de estado de tensiones que puede soportar una mezcla sin reducir significativamente su rigidez.

En cada ensayo ITFT se aplicaron 5000 ciclos de carga y 4 niveles de SR; es decir, se aplicaron en total 20.000 ciclos de carga. Los ensayos ITFT se llevaron a cabo a 25 ° C, utilizando una cabina con control de temperatura. De las 12 combinaciones del diseño factorial, sólo cinco fueron seleccionadas. Las mezclas FB1C1, FB2C1 y FB3C1 fueron utilizadas para evaluar el efecto del contenido de asfalto en la evolución de la rigidez y las mezclas FB2C0, FB2C1 y FB2C2 fueron utilizadas para evaluar el efecto del contenido de cemento. El detalle de las mezclas analizadas se presenta en **Tabla 2**.

Tabla 2: Mezclas analizadas

Mezclas Evaluadas	Contenido de Asfalto Espumado (%)	Contenido de Cemento (%)
FB1C1	1.0	1.0
FB2C1(*)	2.0	1.0
FB3C1	3.0	1.0
FB2C0	2.0	0.0
FB2C1(*)	2.0	1.0
FB2C2	2.0	2.0

(*) Corresponden a la misma mezcla

RESULTADOS Y ANALISIS

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados de los ensayos realizados. En Figura 4 se agrupan los resultados de las mezclas con distintos contenidos de asfalto y un contenido de cemento único (mezcla FB1C1, FB2C1 y FB3C1). En Figura 5 se agrupan los resultados de las mezclas con distintos contenido de cemento y un contenido de asfalto único (FB2C0, FB2C1 y FB2C2).

En los experimentos realizados, se espera que la rigidez de las mezclas con AE evolucione en el largo plazo según el nivel de tensiones que se desarrolle en la capa estabilizada. Si el nivel tensiones es inferior a un valor específico, la rigidez de la mezcla permanecerá relativamente constante en el tiempo, con un valor cercano a la rigidez inicial. Si el nivel de tensiones es mayor que un valor específico, la rigidez de la mezcla se reducirá gradualmente en el tiempo debido a los ciclos de carga producidos por los vehículos.

En los resultados que se presentan en las Figuras 4 y 5, se observa que lo discutido en el párrafo anterior es válido para los experimentos realizados en este trabajo de investigación y que las mezclas evaluadas efectivamente presentan mayor deterioro en la medida en que el estado de tensiones en su matriz aumenta.

Los resultados específicos muestran que un valor de SR igual a 20% permitirá que la mezcla mantenga una rigidez en el tiempo dentro de un rango entre 80 y 90% de la rigidez inicial. De

esta forma, las estructuras de pavimento que utilizan este material como parte de su estructura, debieran ser diseñadas para garantizar que el estado de tensiones de la mezcla no supere el valor de SR igual a 20%. De igual forma, se observa que si el SR llega a valores cercanos a 50%, entonces la mezcla “colapsará” rápidamente frente a los ciclos de carga, reduciendo su rigidez a un valor cercano al que posee el material granular sin agentes estabilizantes.

Para cada una de las mezclas ensayadas, se ajustaron líneas de tendencias logarítmicas. En cada una de las figuras se muestra un ejemplo de la línea de tendencia ajustada a los resultados de una mezcla. Estas líneas de tendencia fueron utilizadas para extrapolar el valor de rigidez para ciclos de carga mayores a los analizados. La Tabla 3 muestra los resultados de estas extrapolaciones para 100.000 y 1.000.000 de ciclos de carga, para cada mezcla analizada y cada SR evaluado. Durante estos experimentos, se realizaron ensayos para números altos de ciclos de carga de tal forma de validar las extrapolaciones realizadas.

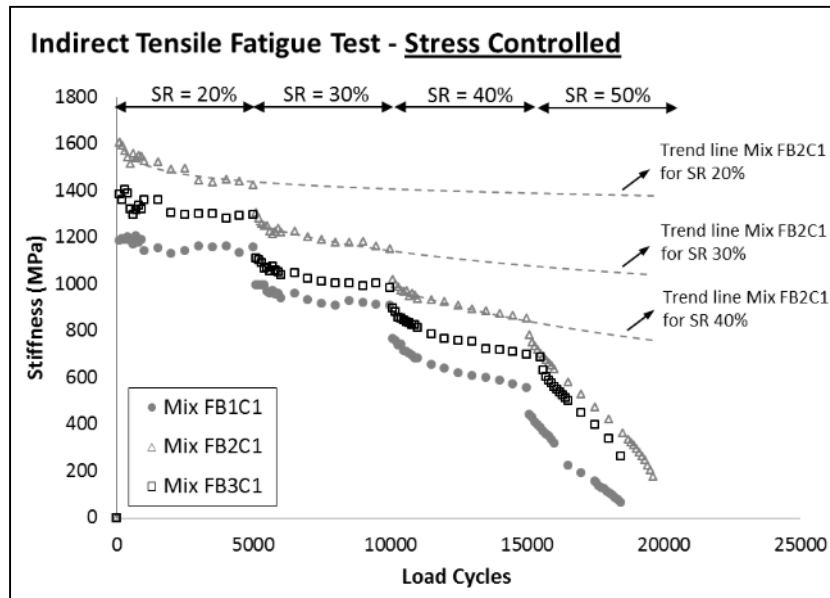


Figura 4: Resultados ensayos de evolución de la rigidez para mezclas con distinto contenido de asfalto y mismo contenido de cemento

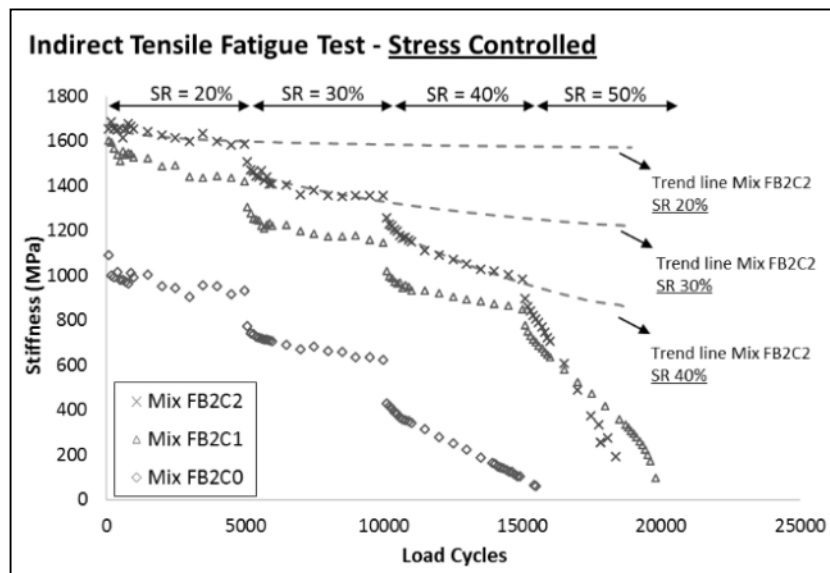


Figura 5: Resultados ensayos de evolución de la rigidez para mezclas con distinto contenido de cemento y mismo contenido de asfalto

Tabla 3: Detalles líneas de tendencia y rigidez estimada para cada mezcla.

Mezcla	Stress Ratio	$y = a \cdot x^b$		R^2 (%)	Rigidez de largo plazo para i ciclos de carga	
		a	b		i = 100,000	i = 1,000,000
FB1C1 (1%FB + 1%Cem)	20	c	-0,013	50,7	1098	1066
	30	c	-0,136	83,4	654	478
	40	c	-0,755	96,6	131	23
FB2C1 (2% FB+1%Cem)	20	c	-0,031	88,5	1310	1220
	30	c	-0,140	85,3	828	600
	40	c	-0,384	94,5	407	168
FB3C1 (3% FB+1%Cem)	20	c	-0,019	61,2	1220	1168
	30	c	-0,157	90,1	682	475
	40	c	-0,581	96,3	228	60
FB2C0 (2% FB+0%Cem)	20	c	-0,031	70,2	849	791
	30	c	-0,261	95,1	341	187
	40	Mezcla colapsa prematuramente				
FB2C1 (2% FB+1%Cem)	20	c	-0,031	88,5	1310	1220
	30	c	-0,140	85,3	828	600
	40	c	-0,384	94,5	407	168
FB2C2 (2% FB+2%Cem)	20	c	-0,013	61,2	1538	1493
	30	c	-0,139	90,1	844	613
	40	c	-0,576	96,3	324	86

y: Rigidez del ITFT; x: Ciclos de carga; c: Valor constante no utilizado en el análisis.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se obtienen de los ensayos realizados son las siguientes.

- Tal como se esperaba, la tasa de disminución de la rigidez aumentará a medida que aumenta el estado de tensiones en la matriz de las mezclas evaluadas.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, un valor de SR igual a 20% permitirá que la mezcla mantenga una rigidez en el tiempo dentro de un rango entre 80 y 90% de la rigidez inicial.

- Si el SR llega a valores cercanos a 50%, entonces la mezcla “colapsará” rápidamente frente a los ciclos de carga, reduciendo su rigidez a un valor cercano al que posee el material granular sin agentes estabilizantes.

Sobre la base de los resultados obtenidos es necesario destacar dos puntos importantes. Primero, es necesario tener conciencia respecto a que pavimentos que utilizan este material como parte de su estructura, debieran ser diseñadas para garantizar que el estado de tensiones de la mezcla no supere el valor de SR igual a 20%. Segundo, si se da el caso en que la estructura de pavimentos diseñada produce que el estado de tensiones en la matriz de la base estabilizada sea cercana al 50%, entonces toda la inversión realizada para mejorar estructuralmente el material reciclado se perderá.

REFERENCIAS

1. Loizos A. *In-situ characterization of foamed bitumen treated layer mixes for heavy-duty pavements*. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8, N° 2, June 2007, 123-135.
2. Bowering R.H. *Foamed bitumen: Production and application of mixtures, evaluation and performance of pavements*. In Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 45: 453–73, 1976.
3. Jones D., Fu P., Harvey J.T., and Halles F. *Full-Depth Reclamation with Foamed Asphalt: Final Report*. Davis and Berkeley, CA. University of California Pavement Research Center. (Research Report UCPRC-RR-2008-07), 2008.
4. Fu P., Jones D., Harvey J.T. and Halles F. *Investigation of the Curing Mechanism of Foamed Asphalt Mixes Based on Micromechanics Principles*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 22, pp.29-38, 2010.
5. Long F. M. *The development of structural design models for foamed bitumen treated pavement layers*. Contract Report CR-2001/76, Gauteng – CSIR, South Africa, 2001.
6. Verhaeghe B, Sadzik E. and Visser A. *Three Decades of Development and Achievements: The Heavy Vehicle Simulator in Accelerated Pavement Testing*. 10th International Conference on Asphalt Pavements (ICAP), 2006.