

IAG169-01-2013
COMPARACIÓN DEL ESFUERZO DE TRACCIÓN DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS CON RAP A TRAVÉS DE LOS ENSAYOS ITS (TENSIÓN
INDIRECTA) Y SCB (VIGA SEMI-CIRCULAR)
COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE ASFALTO COM RAP
ATRAVÉS DE TESTES DE DST (TRAÇÃO INDIRETA) E SCB (SEMI-
CIRCULAR BEAM)

Carlos Rodolfo Marín Uribe
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
crmarin@uc.cl

Guillermo Thenoux Zeballos
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
gthenoux@ing.puc.cl

Resumen

La resistencia a la tracción es una propiedad importante de evaluar en mezclas asfálticas, en particular en condiciones de relativa baja temperatura y/o altas velocidades de carga y/o envejecimiento, ya que ante estas condiciones el comportamiento mecánico de dichas mezclas es principalmente elástico y no visco-elástico. Fallas como la fatiga y la fisuración por baja temperatura están íntimamente relacionadas con la resistencia a la tracción de las mezclas asfálticas. Por otra parte, mezclas asfálticas preparadas con diferentes porcentajes de RAP, tienden a mostrar generalmente mayor estabilidad Marshall o rigidez, por lo cual se recomienda caracterizar y estudiar estas mezclas a través de su módulo o ensayos de fatiga. No obstante, en el proceso de diseño de mezcla es conveniente realizar ensayos mecánicos relativamente más simples. Tradicionalmente, se ha utilizado el ensayo ITS para caracterizar las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas. Aunque dicho ensayo presenta muchas ventajas también muestra desventajas. Por ejemplo, la indentación producida en los puntos de compresión modifica la distribución de tensiones en el plano de falla y entrega mayor variabilidad en los resultados, particularmente cuando el material no tiene un comportamiento lineal elástico. En los últimos años, el ensayo SCB ha generado mayor atención y podría presentar ventajas adicionales para el diseño de mezclas asfálticas con RAP. El objetivo de este trabajo es comparar mediante un estudio experimental de laboratorio, mezclas asfálticas con distintas adiciones de RAP (0, 25, 50%) a través de la ejecución de los ensayos ITS y SCB. El trabajo muestra que la resistencia a la tracción de las mezclas asfálticas aumenta con el incremento del contenido de RAP y que el rango de valor promedio general de la relación de los valores de resistencia SCB/ITS oscila entre 3.7 - 4.0, por lo que hace que sus resultados sean comparables y convertibles.

Resumo

A resistência à tracção é uma propriedade importante em misturas de asfalto para avaliar, particularmente sob uma temperatura relativamente baixa e/ou de alta velocidade de carregamento e/ou envelhecimento, tal como a estas condições o comportamento mecânico dessas misturas é principalmente elástica viscoelástico não; defeitos tais como fissuras de fadiga e de temperatura baixa estão intimamente relacionados com a resistência à tracção das misturas de asfalto. Além disso, a mistura de asfalto preparado com diferentes porcentagens de RAP, geralmente tendem a apresentar maior estabilidade ou rigidez Marshall, que é recomendado por caracterizar e estudar estas misturas através do seu módulo ou ensaios de fadiga. No entanto, no processo de concepção é o teste mecânico de mistura adequado relativamente simples. Tradicionalmente, o teste foi utilizado para caracterizar as suas propriedades mecânicas de misturas betuminosas. Embora este teste tem muitas vantagens mostra também desvantagens. Por exemplo, o recuo produzido em pontos de compressão modifica a distribuição de tensão no plano da falha e proporciona uma maior variabilidade dos resultados, particularmente quando o material é o comportamento elástico linear. Nos últimos anos, o teste de viga semicircular (SCB) tem gerado mais atenção e pode fornecer vantagens adicionais para o projeto de misturas asfálticas com RAP. O objetivo deste trabalho é comparar com um estudo experimental de laboratório, misturas asfálticas com diferentes adições RAP (0, 25, 50%), através da implementação de ensaios ITS e SCB. Mostra-se que a resistência à tracção de misturas de asfalto aumenta com o aumento do teor de RAP e que a gama de proporção média geral dos valores de resistência SCB/ITS entre 3,7-4,0, fazendo que os resultados são comparáveis e conversível.

INTRODUCCIÓN

El material asfáltico reciclado (RAP), ha sido incorporado desde hace un tiempo dentro de las nuevas mezclas asfálticas para pavimentos. En los últimos años, su uso se ha incrementado justificado principalmente a que se considera un material amigable con el medio ambiente y es económicamente atractivo (Jensen et al., 2008, Huang et al., 2004). Aspectos como la disminución de los espacios disponibles para su disposición (botaderos o vertederos), el incremento del precio del petróleo, el agotamiento de las fuentes de explotación de agregados vírgenes, la reducción del contenido de asfalto nuevo requerido para la nueva mezcla, la reducción en los costos de transporte de nuevos materiales pétreos y la presión de los gobiernos en busca de la reutilización de materiales reciclables por cuestiones ambientales han sido argumentos a favor de su reutilización en nuevas mezclas asfálticas. El comportamiento constitutivo de estas mezclas depende fundamentalmente de la interacción fisicoquímica entre el cemento asfáltico (tanto el nuevo como el residual) y los agregados, los cuales son totalmente diferentes en naturaleza. La heterogeneidad del material compuesto afecta su desempeño en servicio, por lo que han surgido algunas preocupaciones relacionadas con las características de resistencia a la fatiga, el fisuramiento térmico y su sensibilidad a la humedad especialmente en mezclas con altos contenidos de RAP. Por ejemplo, a bajos contenidos de RAP, las mezclas no incluyen una cantidad considerable de material envejecido que pueda afectar las propiedades del cemento asfáltico nuevo. A altos contenidos de RAP, el cemento asfáltico residual envejecido rigidiza la mezcla, lo que la hace más resistente al ahuellamiento pero más susceptible a la fisuración. Algunas patologías de los pavimentos asfálticos tales como: la fisuración por fatiga y

la fisuración por baja temperatura están íntimamente relacionadas con la resistencia a la tracción de las mezclas asfálticas (Huang et al., 2003, Kim y Wen, 2002). Uno de los ensayos más comunes para determinar la resistencia a la fractura o resistencia a la tracción es el ensayo de estabilidad Marshall. Sin embargo, al ser un ensayo empírico no ha llenado las expectativas de los diseñadores debido a la falta de representatividad de las condiciones reales de un pavimento (Arabani y Ferdowsi, 2009). Tradicionalmente se ha utilizado el ensayo de resistencia a la tensión indirecta (ITS) para caracterizar las propiedades de resistencia a la tracción de las mezclas asfálticas (Kim and Wen, 2002, Roque and Butler, 1992). Aunque el ensayo ITS presenta ventajas tales como el montaje simple para el ensayo y la facilidad de obtención de la probeta, también tiene algunas desventajas como por ejemplo la indentación producida en los puntos de compresión modifica la distribución de tensiones en el plano de falla, entrega mayor variabilidad en los resultados particularmente cuando el material no tiene un comportamiento lineal elástico y existe un estado de esfuerzos biaxiales (Kim y Wen, 2002, Van de Ven y Smit, 1997). Por lo anterior, se hace necesario desarrollar métodos simples que permitan caracterizar mezclas asfálticas con RAP, teniendo en cuenta que su resistencia a la tracción se considera una de las propiedades mecánicas más importantes. En los últimos años, se ha generado mayor atención en el ensayo de viga semi-circular (SCB), el cual fue originalmente utilizado para caracterizar la resistencia a la fractura en mecánica de rocas y posteriormente se ha aplicado a las mezclas asfálticas mediante la caracterización de las propiedades de su resistencia a la tracción y sus propiedades de resistencia a la fatiga (Huang, 2005). Recientemente, el ensayo SCB ha sido aprobado como norma regular por el Comité de Estandarización Europeo (CEN - European Committee Standardization) para determinar la resistencia a la tracción o resistencia a la fractura de una mezclas asfáltica para el cálculo del potencial de propagación al fisuramiento (UNE-EN 12697-44, 2011).

OBJETIVO Y ALCANCE

El principal objetivo de este estudio es realizar una comparación del esfuerzo de tracción de mezclas asfálticas en caliente con RAP a través de los ensayos ITS y SCB. El alcance del trabajo corresponde a la ejecución de estos ensayos sobre una variedad de estas mezclas con diferentes contenidos de RAP y asfalto, con el fin de obtener los valores de resistencia a la tracción y su posterior comparación. Esto permite determinar la posibilidad de implementación de un ensayo alternativo simple para caracterizar las mezclas asfálticas en laboratorio. Se piensa que el procedimiento desarrollado en este estudio sea una herramienta útil para la evaluación de la resistencia a la tracción de las mezclas asfálticas con RAP; lo que permite complementar las metodologías de diseño de un pavimento.

MATERIALES Y MÉTODOS DE ENSAYO

Se desarrolló un experimento en el laboratorio de pavimentos de la Pontificia Universidad Católica de Chile con el fin de obtener la resistencia a la tracción de mezclas asfálticas en caliente con adición de distintos porcentajes de RAP, comparar e interpretar los resultados de los ensayos ITS y SCB. El plan experimental involucra tres componentes principales. El primero de ellos corresponde a la separación en varios tamaños de los agregados vírgenes y el RAP mediante una serie de tamices. Dichos tamices fueron: $\frac{3}{4}$ " (12.7 mm), $\frac{1}{2}$ " (9.51 mm), $\frac{3}{8}$ " (9.5 mm), #4 (4.75 mm), #8 (2.38 mm), #30 (0.599), #50 (0.297), #100 (0.152 mm), # 200 (0.075 mm). La separación de tamaños de los agregados permite controlar por un lado, la gradación y el ajuste de

las distintas mezclas analizadas con respecto a la mezcla patrón y por otro lado, permite incrementar de manera controlada la cantidad de RAP en las mezclas asfálticas. El segundo componente del plan experimental involucra la confección en laboratorio de las mezclas asfálticas, para lo cual se utilizó un cemento asfáltico tipo CA-24 en tres diferentes porcentajes: 5.5, 6.0, 6.5%, para obtener mayor cantidad de resultados y dos porcentajes de RAP (25, 50%), además de la muestra patrón (0% RAP). Las probetas para ambos ensayos tienen un diámetro de 100 mm y fueron compactadas con 75 golpes por cara con el compactador Marshall. Se utilizaron dos probetas por punto de ensayo. Finalmente, el tercer componente corresponde a la ejecución de los ensayos ITS y SCB para la caracterización de la resistencia a la tracción de las mezclas asfálticas a una temperatura de 20 °C. La Figura 1 muestra el plan experimental seguido en la investigación.

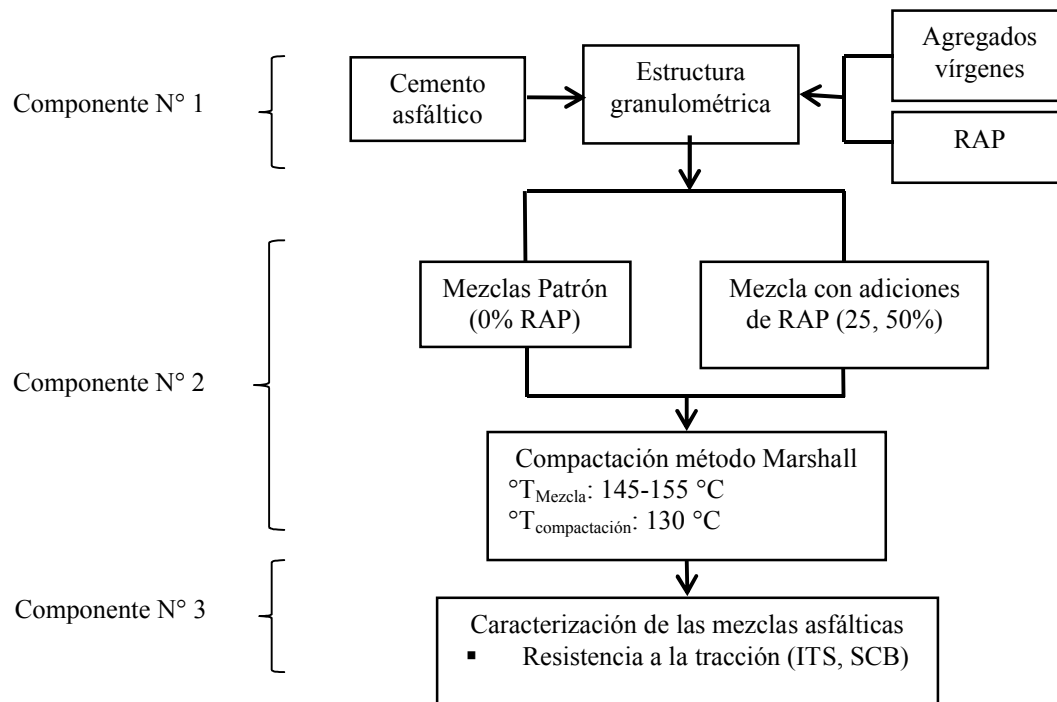


Figura 1: Diagrama de flujo del plan experimental

Para la fabricación de las mezclas asfálticas se reprodujeron en laboratorio dos estructuras granulométricas. La primera de ellas denominada IV-A-12, representa una gradación semi-densa de amplia utilización como capa de rodado en Chile con tamaño máximo nominal de 19 mm. La segunda estructura llamada ARZ, representa una gradación densa que sigue los límites superiores de la banda granulométrica recomendada por el programa *Superpave* para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm. En la Figura 2 se observan las estructuras granulométricas del estudio en un gráfico “exponente 0.45”.

Figura 2: Estructuras granulométricas de ensayo (IV-A-12 y ARZ)

Método de la tensión indirecta (ITS)

En la configuración de este ensayo se carga verticalmente una probeta cilíndrica a través de su longitud, como se muestra en la Figura 3. La carga de compresión induce esfuerzos de tensión transversal casi uniformes sobre la porción central a través del plano de carga y esfuerzos de tensión horizontal en su eje central horizontal. Se aplicó una carga con una velocidad constante de 5 ± 0.2 mm/min.

Figura 3: Ensayo de tensión indirecta (ITS)

El esfuerzo horizontal inducido sobre el centro de la probeta se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_h = \frac{2 \times F_{m\acute{a}x}}{\pi \times D \times t} \quad (1)$$

Donde:

- σ_h = esfuerzo de tracción en el centro de la probeta (N/mm²)
- $F_{m\acute{a}x}$ = fuerza máxima (N)
- D = diámetro de la probeta (mm)
- t = espesor de la probeta (mm)

Método de la viga Semi-Circular

La configuración del ensayo SCB consiste en una probeta semi-circular a la cual se le aplica una carga monotónica creciente de compresión hasta su falla. Esta carga induce tensión en la zona inferior de la probeta. De acuerdo con la norma UNE-EN 12697-44, la probeta para ensayo SCB se carga a una velocidad con tasa de deformación de 5.0 ± 0.2 mm/min. Las cargas y deformaciones se registran de manera continua. Para este plan experimental, las probetas semi circulares fueron ensayadas sin ranura con el fin de poder determinar la carga máxima a la cual se produce la falla por tracción (no se estudió el fenómeno de propagación de la fisura). De los resultados se determinan: la carga máxima, F_{max} y la deformación vertical, ΔW .

Figura 4: Ensayo de viga semi circular (SCB)

El máximo esfuerzo horizontal, $\sigma_{m\acute{a}x}$, está dado por:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{4.263 \times F_{m\acute{a}x}}{D \times t} \quad (2)$$

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = esfuerzo máximo de tracción (N/mm²)

D = diámetro de la probeta (mm)

t = espesor de la probeta (mm)

$F_{m\acute{a}x}$ = fuerza máxima (N)

En la Ecuación 2, cuando la carga alcanza el valor máximo, σ representa la resistencia del material. Para probetas SCB sin ranura, la resistencia a la tracción es igual al esfuerzo máximo (Biligiri et al., 2012).

RESULTADO DE LOS ENSAYOS

Los resultados de los ensayos de resistencia a la tracción ITS y SCB se muestran en las Tablas 1-6. Se puede observar que las mezclas que contienen un porcentaje más alto de RAP tuvieron una resistencia a la tracción más alta comparada con las mezclas con menos porcentaje de RAP, lo cual indica que el RAP incrementa la resistencia a la tracción de las mezclas asfálticas en caliente. Este incremento se puede atribuir a la rigidez debido al envejecimiento del asfalto

residual del RAP, el cual después de algunos años en servicio llega a ser más duro que el asfalto nuevo adicionado (Roberts et al., 1996). Este incremento es útil hasta cierto punto para proteger el pavimento contra la fisuración bajo cargas de tránsito.

Tabla 1: Comparación resistencia a la tracción ensayos SCB – ITS para granulometría IV-A-12, 20 °C y 0% RAP

Contenido de RAP (%)	Contenido de asfalto (%)	Resistencia a la tracción (MPa)		
		SCB	ITS	Relación (SCB/ITS)
0	5.5	3.50	0.76	4.61
	6.0	3.22	0.79	4.08
	6.5	2.97	0.75	3.96
Promedio		4.21		
Desviación estándar		0.34		
Coeficiente de variación (%)		8.2		
Porcentaje de valores que cae entre los límites:				
		68%		
		3.87 – 4.56		
		95%		
		3.53 – 4.90		
		99.5%		
		3.18 – 5.25		

Tabla 3: Comparación resistencia a la tracción ensayos SCB – ITS para granulometría IV-A-12, 20 °C y 50% RAP

Contenido de RAP (%)	Contenido de asfalto (%)	Resistencia a la tracción (MPa)		
		SCB	ITS	Relación (SCB/ITS)
25	5.5	5.48	1.33	4.12
	6.0	4.80	1.28	3.75
	6.5	4.94	1.19	4.15
Promedio		4.01		
Desviación estándar		0.22		
Coeficiente de variación (%)		5.6		

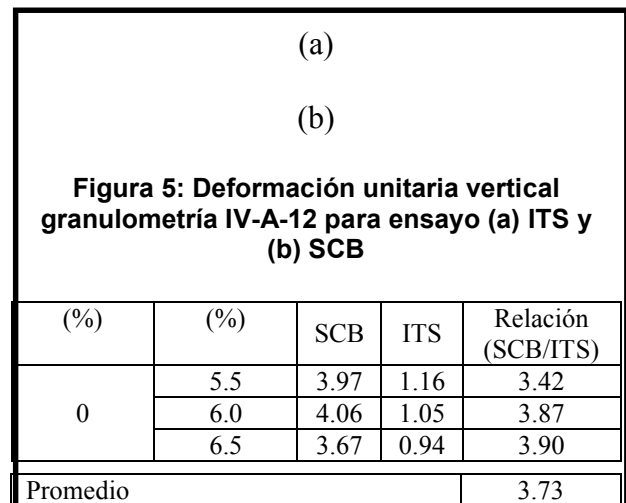
Tabla 4: Comparación resistencia a la tracción ensayos SCB – ITS para granulometría ARZ, 20 °C y 0% RAP

Contenido de RAP	Contenido de asfalto	Resistencia a la tracción (MPa)
------------------	----------------------	---------------------------------

Porcentaje de valores que cae entre los límites:		
68%		3.78 – 4.23
95%		3.56 – 4.45
99.5%		3.34 – 4.68

Tabla 2: Comparación resistencia a la tracción ensayos SCB – ITS para granulometría IV-A-12, 20 °C y 25% RAP

Contenido de RAP (%)	Contenido de asfalto (%)	Resistencia a la tracción (MPa)		
		SCB	ITS	Relación (SCB/ITS)
50	5.5	4.14	1.19	3.48
	6.0	4.27	1.17	3.65
	6.5	4.05	1.04	3.89
Promedio		3.67		
Desviación estándar		0.21		
Coeficiente de variación (%)		5.7		
Porcentaje de valores que cae entre los límites:				
		68%		
		3.47 – 3.88		
		95%		
		3.26 – 4.09		
		99.5%		
		3.05 – 4.30		



Desviación estándar	0.27
Coefficiente de variación (%)	7.2
Porcentaje de valores que cae entre los límites:	
68%	3.46 – 4.00
95%	3.20 – 4.27
99.5%	2.93 – 4.54

Tabla 6: Comparación resistencia a la tracción ensayos SCB – ITS para granulometría ARZ, 20 °C y 50% RAP

Contenido de RAP (%)	Contenido de asfalto (%)	Resistencia a la tracción (MPa)		
		SCB	ITS	Relación (SCB/ITS)
25	5.5	4.38	1.34	3.27
	6.0	4.87	1.35	3.61
	6.5	4.74	1.43	3.31
Promedio		3.40		
Desviación estándar		0.18		
Coeficiente de variación (%)		5.4		
Porcentaje de valores que cae entre los límites:				
68%		3.21 – 3.58		
95%		3.03 – 3.76		
99.5%		2.85 – 3.95		

Tabla 5: Comparación resistencia a la tracción ensayos SCB – ITS para granulometría ARZ, 20 °C y 25% RAP

Contenido de RAP (%)	Contenido de asfalto (%)	Resistencia a la tracción (MPa)		
		SCB	ITS	Relación

				(SCB/ITS)
50	5.5	4.87	1.22	3.99
	6.0	4.68	1.20	3.90
	6.5	4.22	1.12	3.77
Promedio				3.89
Desviación estándar				0.11
Coeficiente de variación (%)				2.9
Porcentaje de valores que cae entre los límites:				
68%				3.77 – 4.00
95%				3.66 – 4.11
99.5%				3.55 – 4.22

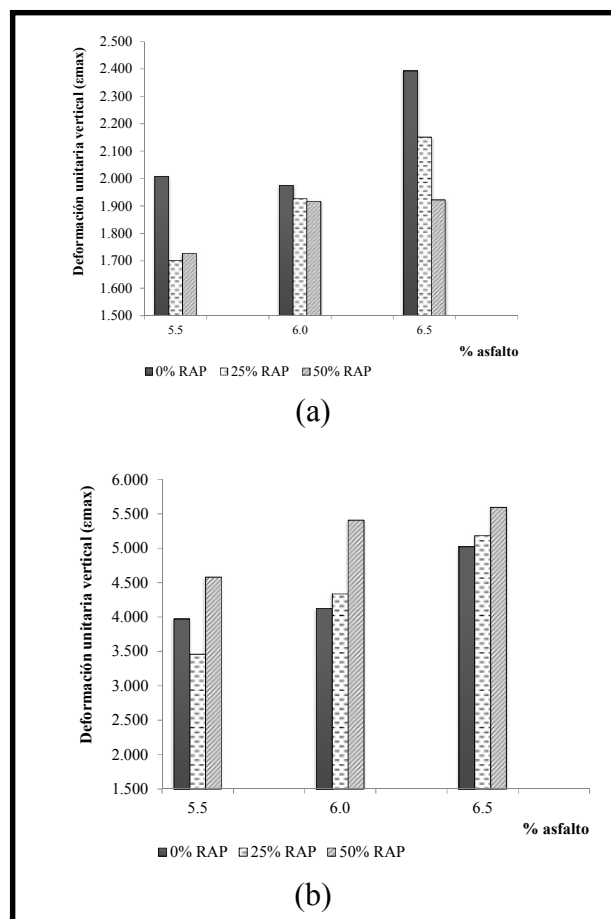


Figura 6: Deformación unitaria vertical granulometría ARZ para ensayo (a) ITS y (b) SCB

En las Tablas 1-3 se muestran los valores de resistencia a la tracción obtenidos de los ensayos ITS y SCB a una temperatura de 20 °C para la granulometría IV-A-12. La resistencia a la tracción medida por el ensayo SCB es mayor a la obtenida por el ensayo ITS, cuya relación fluctúa para los tres porcentajes de RAP entre los rangos de 3.7 a 4.2 (promedio aproximado 4.0). En las Tablas 4-6 se muestran los valores de resistencia a la tracción obtenidos de los ensayos ITS y SCB a una temperatura de 20 °C para la granulometría ARZ. Igualmente, la resistencia a la

tracción medida por el ensayo SCB es mayor a la obtenida por el ensayo ITS y su relación fluctúa para los tres porcentajes de RAP entre los rangos de 3.4 a 3.9 (promedio aproximado 3.7). Los coeficientes de variación obtenidos muestran valores que se consideran homogéneos (menores al 10%) para ambas estructuras granulométricas y las adiciones de RAP. Los valores de resistencia a la tracción obtenidos de la estructura granulométrica ARZ fueron mayores a los de la estructura granulométrica IV-A-12 para los mismos porcentajes de asfalto y de RAP, debido a la menor cantidad de vacíos existente en esta granulometría que se considera densa (mayor cantidad de finos). Esto indica que la estructura granulométrica ARZ es más resistente a la tracción o fractura que la IV-A-12. Por otro lado, estudios previos determinaron que los valores de deformación a la carga máxima se puede utilizar para evaluar las propiedades de la mezcla asfáltica antes de la falla (Huang et al, 2004). En las Figuras 5 y 6 se puede observar para el ensayo ITS que con el incremento en el contenido del RAP existe una disminución de la deformación unitaria a la carga máxima. Estos resultados coinciden con lo referenciado en la literatura (Shu et al, 2010). Para el ensayo SCB no existe una tendencia definida de aumento o disminución en la deformación de las mezclas a la carga máxima. Por otro lado, el aumento en el contenido de asfalto muestra un aumento en la deformación unitaria a carga máxima debido principalmente a la propiedad viscoelástica del cemento asfáltico.

CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de laboratorio a través de los ensayos ITS y SCB para evaluar el efecto del RAP sobre la resistencia a la tracción de las mezclas asfálticas, comparar los resultados obtenidos y determinar la posibilidad de adaptar un ensayo simple y alternativo para caracterizar las mezclas asfálticas en caliente. Basados en los resultados de laboratorio, se pueden exponer las siguientes conclusiones: Las resistencias a la tracción de los ensayos ITS y SCB fueron diferentes debido a sus distintos estados de esfuerzos bajo la carga. Siempre se obtuvieron valores mayores de resistencia a la tracción en el ensayo SCB comparado con el ITS. Se obtuvo un rango de valor promedio general de la relación de los valores de resistencia SCB/ITS, para todos los contenidos de RAP y asfalto entre 3.7 - 4.0 para ambas estructuras granulométricas, por lo que hace que sus resultados sean comparables y convertibles. Esto implica que la configuración de viga semi-circular sea una herramienta potencialmente efectiva para caracterizar la resistencia a la tracción de las mezclas asfálticas con inclusión de RAP con una buena repetibilidad. La incorporación de RAP en las mezclas asfálticas generalmente incrementa su resistencia a la tracción generando una mayor rigidez y fragilidad. Este incremento es útil hasta cierto punto si se desea proteger el pavimento contra la fisuración bajo cargas de tránsito.

REFERENCIAS

Arabani, M; Ferdowsi, B. (2009). Evaluating the Semi-circular Bending Test for HMA Mixtures. *International journal of Engineering. Transactions A: Basics*, Vol. 22, N° 1, p. 47-58.

- Biligiri, K.P; Said, S; Hakim, H. (2012). Asphalt Mixtures' Propagation Assessment using Semi-Circular Bending Tests. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol 4, N° 4, p. 209-217.
- Huang, B., Li, G; Mohammad, L.N. (2003). Analytical Modeling and Experimental Study of Tensile Strength of Asphalt Concrete Composite at Low Temperatures. *Composite Part B:engineering*, Vol. 34, p. 705-714.
- Huang, B; Kingery, W.R; Zhang, Z. (2004). Laboratory Study of Fatigue Characteristics of HMA Mixtures Containing RAP. *Proceeding, International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements*, Auburn/AL: 501-522.
- Huang, B., Xiang, S; Tang, Y. (2005). Comparison of Semi-Circular Bending and Indirect Tensile Strength Test for HMA Mixtures. *Advance in Pavement Engineering. GSP-130, Geo-Frontiers Congress 2005, Austin, Texas*, p. 1-12
- Jensen, W.G; Rea, R.C; Syslo, M.S. (2008). Evolving rehabilitation strategies for asphalt pavement. *International Journal of Pavement Engineering*. Vol 9, N° 4, p. 257-264
- Kim, Y.R; Wen, H. (2002). Fracture energy from Indirect Tension Testing. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 71, p. 779-793.
- Roberts, F.L; Kandhal, P.S; Brown, E.R; Lee, D.Y; Kennedy, T.W. (1996). Hot Mix Asphalt Materials. Mixture Design and Construction, 2nd Edition. *NAPA Education Foundation, Lanham/MD*.
- Roque, R; Buttlar, W.G. (1992). The Development of a Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties Using the Indirect Tensile Mode. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 61, p. 304-328.
- Shu, X; Huang, B; Vukosavljevic, D. (2010). Evaluation of Cracking Resistance of Recycled Asphalt Mixture Using Semi-Circular Bending Test. *GeoShanghai 2010 International Conference*, p. 58-64.
- UNE-EN 12697-44. (2011). Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 44: Propagación de fisura por el ensayo de flexión con una probeta semicircular. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- Van de Ven, M; Smit, A. (1997). Possibilities of a Semi-Circular Bending Test. *Proceedings, Eighth International Conference on Asphalt Pavements*, University of Washington, Seattle, Washington, p. 939-950.