

En español

Estudio del comportamiento a fatiga de asfaltos mediante el uso del reómetro de corte dinámico

Oscar Javier Reyes Ortiz¹, Félix E. Pérez Jiménez²

RESUMEN

El objetivo principal del artículo fue el de determinar el comportamiento a fatiga de diferentes tipos de asfaltos a partir de ensayos en el reómetro de corte dinámico (DSR). Los ensayos en el DSR se realizaron a un esfuerzo senoidal de amplitud constante, a una frecuencia de 1,59 Hz y a 20 °C. Los asfaltos estudiados fueron B-13/22, B-40/50, B-60/70, B-80/00, B-150/200 y un BM-3c (asfalto modificado). Durante los ensayos se midió la evolución de la deformación, el módulo complejo, el ángulo de desfase, la energía disipada y el ratio de energía disipada con los ciclos de carga, parámetros para determinar el ciclo de fallo por fatiga de los asfaltos. En primer lugar se estableció en las curvas de evolución de la deformación con los ciclos de carga el rango de deformación de rotura, zona donde la evolución de la deformación crece en forma súbita y se presenta el fallo por fatiga. Luego del análisis del ratio de energía disipada (DER) y de la evolución de la deformación con los ciclos de carga, se determinó el ciclo donde se produce el fallo. Del estudio se obtuvo un nuevo criterio de fallo de fatiga, consistente en calcular la fatiga del asfalto cuando alcanza un valor de 10% pasado el valor máximo de la curva de ratio de energía disipada. Por último, se obtuvieron las leyes de fatiga de los asfaltos con los resultados de deformación de rotura y ciclo de fallo.

Palabras claves: fatiga, asfaltos, DSR, energía disipada y deformación de rotura.

Recibido: noviembre 9 de 2009

Aceptado: febrero 7 de 2011

Introducción

El fenómeno de fatiga es una de las principales causas del daño de las mezclas bituminosas, de ahí la importancia de su estudio. Múltiples autores han definido su comportamiento y evaluado su proceso mediante la ejecución de ensayos de laboratorio con la aplicación de esfuerzos, deformaciones o desplazamientos controlados en forma cíclica (Baren *et al.*, 2002; Mihai *et al.*, 2005; Di Benedetto, 1997); sin embargo, se ha estudiado menos el asfalto como causa de dicho proceso. La normativa Superpave dentro de los ensayos propuestos plantea el uso del reómetro de corte dinámico para establecer el agrietamiento por fatiga de los asfaltos mediante el análisis de G^* sen δ en ensayos a defor-

In English

Studying asphalt binder fatigue pattern by using a dynamic shear rheometer

Oscar Javier Reyes Ortiz³, Félix E. Pérez Jiménez⁴

ABSTRACT

This article was aimed at determining fatigue test results regarding different types of binder when using a dynamic shear rheometer (DSR). The tests were carried out in stress conditions at 20°C. The stress input signal was a constant amplitude, 1.59 Hz frequency sine wave. Asphalt binders B-13/22, B-40/50, B-60/70, B-80/00, B-150/200 and BM-3c (modified asphalt) were studied. The test measured strain, complex modulus (G^*), dissipated energy and dissipated energy ratio (DER) with the number of cycles. Strain criteria were used for determining binder fatigue failure (DER). Failure was defined as the point at which (DER) dropped 10% after peaking. Laws of asphalt fatigue were obtained from the strain and failure cycle results.

Keywords: fatigue, asphalts binder, DSR, dissipated energy, strain failure.

Received: November 9th 2009

Accepted: February 7th 2011

Introduction

Fatigue is one of the main causes of damage in bituminous mixtures; its study is therefore of the utmost importance. Several authors have defined its behaviour and have evaluated it via strain-controlled, stress and displacement laboratory tests (Baren *et al.*, 2002, Mihai *et al.*, 2005, Di Benedetto, 1997). However, few authors have studied bitumen's role in fatigue failure. The Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave) system proposes that a dynamic shear rheometer (DSR) be used for determining fatigue crack patterns by analysing G^* sine δ in a strain-controlled test at 1.59 Hz frequency. On the other hand, some authors say that Superpave specifications do not provide

¹M.Sc. en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Ph.D. Universidad de Cataluña, España. Profesor Asociado, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. oscar.reyes@unimilitar.edu.co

²B.Sc. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, España. Ph.D., Universidad Politécnica de Madrid, España. Catedrático, Universidad Politécnica de Cataluña, España. feduardo.perez@upc.es

³M.Sc. Civil Engineering, Universidad de los Andes, Colombia. Ph.D., Universidad de Cataluña, España. Associate professor, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. oscar.reyes@unimilitar.edu.co

⁴B.Sc. Paths, Canals and Ports Engineering, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Spain. Ph.D., Universidad Politécnica de Madrid, Spain. Professor, Universidad Politécnica de Cataluña, Spain. feduardo.perez@upc.es

En español

mación controlada, a una frecuencia de 1,59 Hz y en los primeros ciclos de carga (Kennedy *et al.*, 1998). No obstante, varios autores han estudiado el comportamiento del asfalto con base en los criterios de análisis hechos por Superpave y manifestado la escasez de información del sistema, razón por la cual han planteado nuevas hipótesis a tener en cuenta en el análisis del comportamiento del asfalto y de su fallo por fatiga (Anderson *et al.*, 2001; Cho y Bahía, 2007; Shen y Carpentier, 2005; Pérez-Jiménez *et al.*, 2008).

H. Soenen, De la Roche y Redelius (2004) determinaron leyes de fatiga de asfaltos con el DSR, trabajando con muestras de asfalto de 8 mm de diámetro y 2 mm de alto. El criterio para determinar las leyes de fatiga fue el de someter múltiples muestras a deformación controlada y calcular el ciclo de la rotura cuando el módulo complejo inicial se reduce al 50%, criterio clásico de falla de mezclas bituminosas a desplazamiento controlado (figura 1).

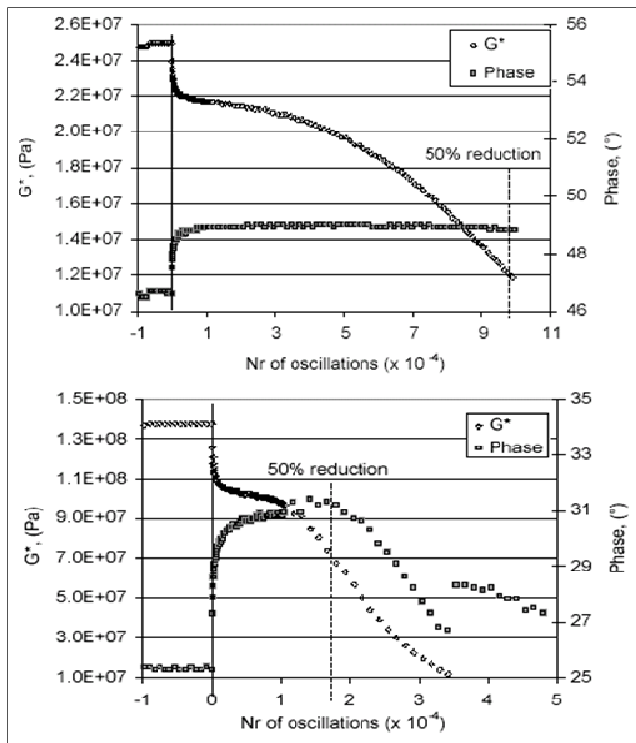


Figura 1. Fallo por fatiga al 50% de la reducción del módulo complejo. Criterio clásico.

Delgadillo y Bahía (2005) han estudiado la fatiga de los asfaltos con ensayos en el DSR mediante el análisis de la energía disipada (ecuación 1) y el ratio de energía disipada (ecuación 2). Del gráfico de ratio de energía disipada con respecto a los ciclos de carga (figura 2), para ensayos a esfuerzo controlado, la curva inicia con una pendiente constante, y luego de la aplicación de cierta cantidad de ciclos la curva empieza a separarse de la línea tangente, punto denominado como formación de las grietas e inicio del fallo por fatiga. Posterior a este punto, la curva continúa creciendo, pero cada vez alejándose más de la línea tangente, hasta llegar a un punto donde obtiene su valor máximo, punto reconocido por los autores como aquel donde se crea el fallo por fatiga. En ensayos a deformación controlada el comportamiento de la gráfica de ciclos de carga contra DER consiste en la separación ascendente de la curva con respecto a la línea

In English

sufficient information (Kennedy *et al.*, 1998); different hypotheses have thus been proposed for analysing bitumen's behaviour and its fatigue failure (Anderson *et al.*, 2001, Cho and Bahía, 2007, Shen and Carpentier, 2005, Pérez-Jiménez *et al.*, 2008).

H. Soenen, De la Roche and Redelius (2004) have determined fatigue laws for different binders using a DSR. Such fatigue laws were computed with bitumen samples measuring 8 mm in diameter and 2 mm in height. Bitumen samples failed at 50% initial complex modulus using the controlled stress method (the classic criterion for bituminous mixture fatigue failure in controlled displacement testing) (Figure 1)

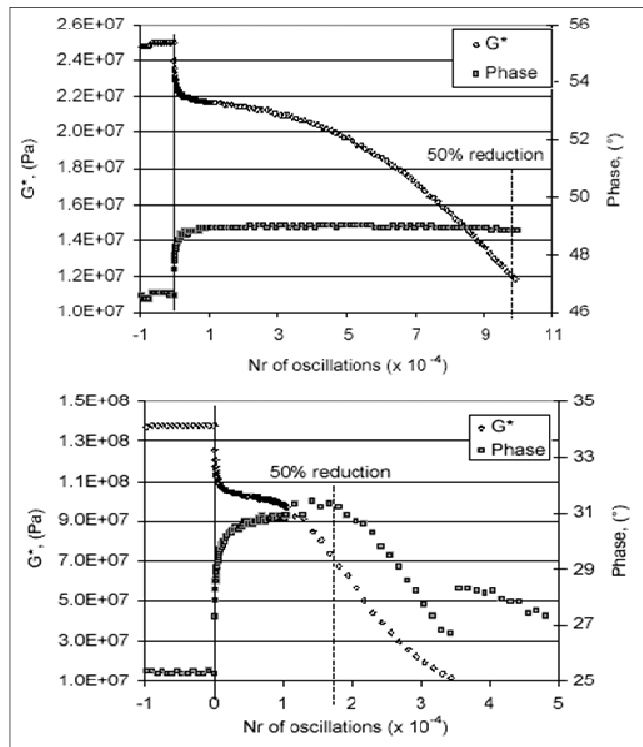


Figure 1 Complex modulus variation with the number of oscillations for two different binders

Delgadillo and Bahía (2005) have studied fatigue using a DSR focusing on dissipated energy (w) (equation 1) and dissipated energy ratio (DER) (equation 2). DER compared to cycle representation obtained by the stress controlled test showed that the curve began with a constant upward slope until a number of cycles had been achieved, after which point the slope began to decrease (Figure 2). The authors have claimed that this point is where cracks began to appear; from that point on values continued increasing until reaching a maximum value when fatigue occurred. When the curve deviates upward from its initial path in strain-controlled testing, micro-cracks appear. The authors established fatigue failure at 20% deviation (Figure 3).

En español

In English

tangente, determinándose que el punto de fallo por fatiga es cuando la separación alcanza un valor del 20% (figura 3).

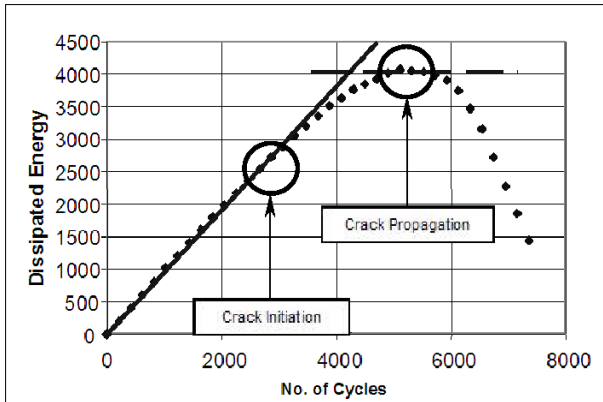


Figura 2. Variación del ratio de energía disipada a esfuerzo controlado.

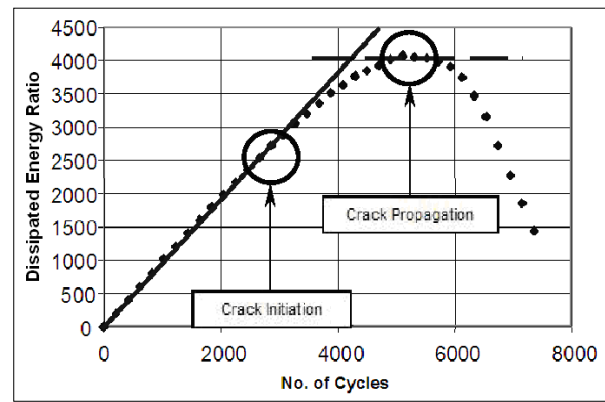


Figure 2 DER of the number of cycles. Stress controlled test

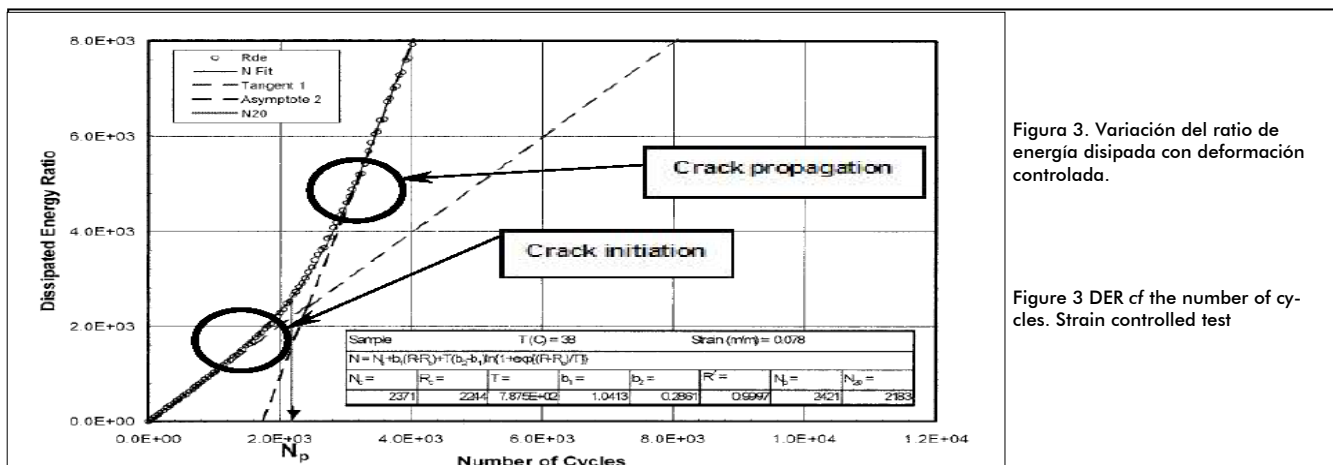


Figura 3. Variación del ratio de energía disipada con deformación controlada.

Figure 3 DER of the number of cycles. Strain controlled test

$$w = \pi \sigma \varepsilon \sin \theta \quad 1$$

$$W = \pi \sigma \varepsilon \sin \delta \quad 1$$

$$DER = \frac{\sum_{i=1}^n \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \theta_i}{\pi \sigma_n \varepsilon_n \sin \theta_n} \quad 2$$

$$DER = \frac{\sum_{i=1}^n \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \theta_i}{\pi \sigma_n \varepsilon_n \sin \theta_n} \quad 2$$

donde

DER = ratio de energía disipada

w = energía disipada

σ = esfuerzo aplicado

ε = deformación aplicada

θ = ángulo de desfase

El objetivo de esta investigación fue el de determinar el comportamiento de la fisuración por fatiga de diferentes asfaltos convencionales y modificados a partir de ensayos en el DSR a esfuerzo controlado, planteando el fallo por fatiga a partir del análisis de la evolución de la deformación de las muestras, de la energía disipada y el ratio de energía disipada.

where

DER = dissipated energy ratio

W = dissipated energy

σ = stress applied

ε = strain obtained

δ = phase angle

This research was thus aimed at analysing the behaviour of both modified and conventional binders in fatigue conditions. The researchers used a DSR in stress controlled testing. The authors determined that bitumen fatigue occurred with DER, dissipated energy and deformation.

Experimentación

Para el estudio del comportamiento a fatiga con el uso del DSR a esfuerzo controlado se utilizaron los asfaltos convencionales B-13/22, B-40/50, B-60/70, B-80/100, B-150/200 y el asfalto modificado con polímero BM-3c, cuyas características aparecen en la tabla 1. Las muestras de asfalto fabricadas para los ensayos fueron de 2 mm de alto por 8 mm de diámetro. Las condiciones de ensayo establecidas consistieron en fijar la muestra entre dos platos paralelos, posteriormente aplicar un torque senosoidal de carga controlada a una frecuencia de 1,59 Hz y a una temperatura de 20 °C (figura 4). En nuestro caso el esfuerzo aplicado osciló entre 1.000 y 9.000 Pa. Las variables medidas fueron la variación de la deformación con los ciclos de carga, el módulo complejo, la energía disipada y el ratio de energía disipada. La deformación medida en cada ciclo de carga por el equipo utilizado en la investigación corresponde a la relación entre el radio de la muestra y el ángulo generado por el torque aplicado, todo lo anterior dividido por la altura de la muestra, tal y como se observa en la figura 5 y las ecuaciones 3 y 4.

Tabla 1. Características de los asfaltos utilizados en la investigación.

Característica	B-13/22	B-40/50	B-60/70	B-80/100	B-150/200	BM3c
Penetración (0,1 mm)	15	42	67	91	178	62
Viscosidad Abs. a 60 °C (P)	2.500	2.000	1.500	1.000	600	-
Punto de ablandamiento (°C)	61	55	51	48	38	65
Punto de fragilidad Fraass (°C)	+1	-5	-8	-10	-15	-15
Solubilidad en tolueno (%)	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5	-
Punto de inflamación (°C)	245	242	237	231	230	-

Experimental

The tests were carried out using a dynamic shear rheometer DSR in stress controlled mode. Several conventional binders were tested together with polymer-modified bitumen. Conventional bitumen had different penetration ranges (B-13/22, B-40/50, B-60/70, B-80/100 and B-150/200). The modified binder was a BM-3c. Bituminous binder specifications are shown in Table 1. The samples consisted of 8 mm diameter and 2 mm height cylinders. The specimens were fixed between two parallel plates and a sine torque was applied at 1.59 Hz frequency. Test temperature was 20°C (Figure 4). The applied stress varied between 1,000 Pa and 9,000 Pa. The variables recorded were change strain, complex modulus, dissipated energy and dissipated energy ratio. Strain, dissipated energy and DER were calculated using equations 3 and 4 (Figure 5).

Table 1. Bituminous binder specifications

Specification	B-13/22	B-40/50	B-60/70	B-80/100	B-150/200	BM3c
Penetration (0.1 mm)	15	42	67	91	178	62
Viscosity Abs. a 60°C (P)	2,500	2,000	1,500	1,000	600	-
Softening point (°C)	61	55	51	48	38	65
Fraass fragility point (°C)	+1	-5	-8	-10	-15	-15
Solubility in toluene (%)	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	-
Flash point (°C)	245	242	237	231	230	-

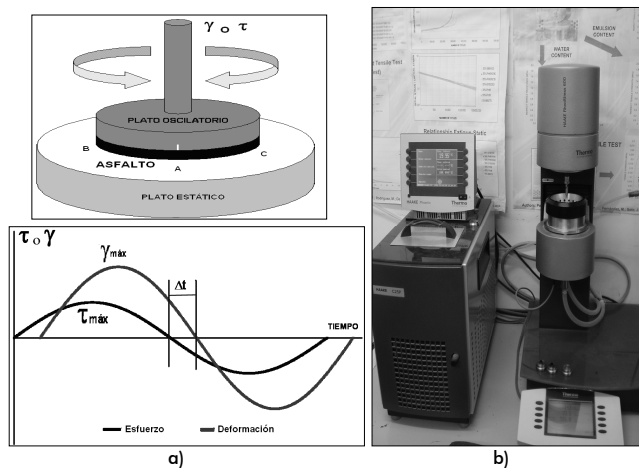


Figura 4. a) Muestra del procedimiento del ensayo DSR. b) Equipo DSR utilizado.

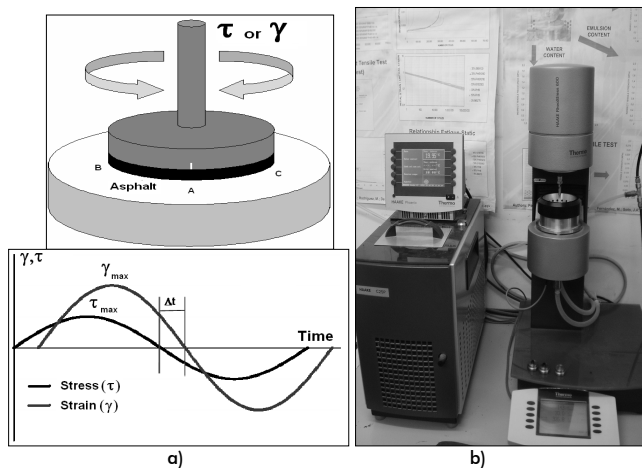


Figure 4. Scheme for DSR test procedure: (a) bitumen sample, (b) stress-strain response.

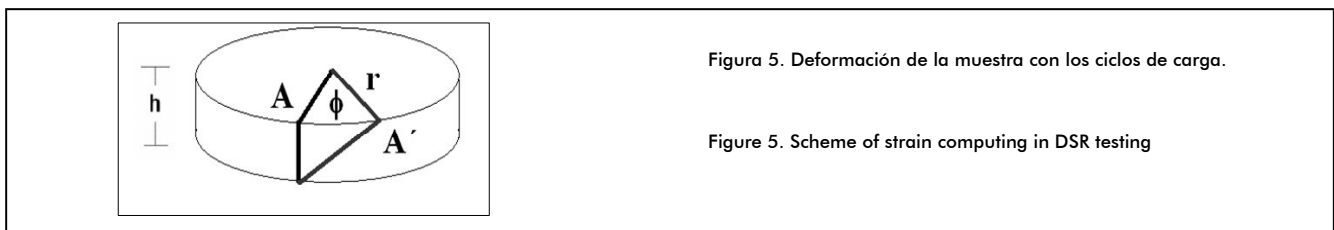


Figura 5. Deformación de la muestra con los ciclos de carga.

Figure 5. Scheme of strain computing in DSR testing

$$\tau = G * \gamma \quad 3$$

$$\tau = G * \gamma \quad 3$$

$$\gamma = \frac{r \phi}{h} \quad 4$$

$$\gamma = \frac{r \phi}{h} \quad 4$$

En español

In English

Donde

τ = torque aplicado a la muestra

G^* = módulo complejo calculado

γ = deformación de la muestra

r = radio de la muestra

ϕ = ángulo generado por el torque

h = altura de la muestra

Las curvas características de evolución de la deformación obtenidas del ensayo son las que se observan en la figura 6. El ensayo finalizaba cuando la variación de la deformación de la muestra experimenta un brusco y rápido incremento en pocos ciclos, indicando que la probeta ha fallado.

Where

τ = torque applied

G^* = complex modulus

γ = strain obtained

r = ratio

ϕ = phase angle

h = height

Figure 6 shows that strain was plotted with the number of cycles for a conventional B-80/100 binder. The test was continued until the slope increased sharply.

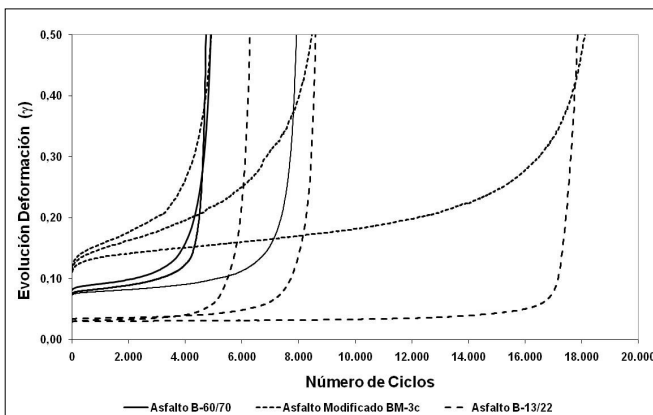


Figura 6 . Evolución de la deformación con los ciclos de carga.

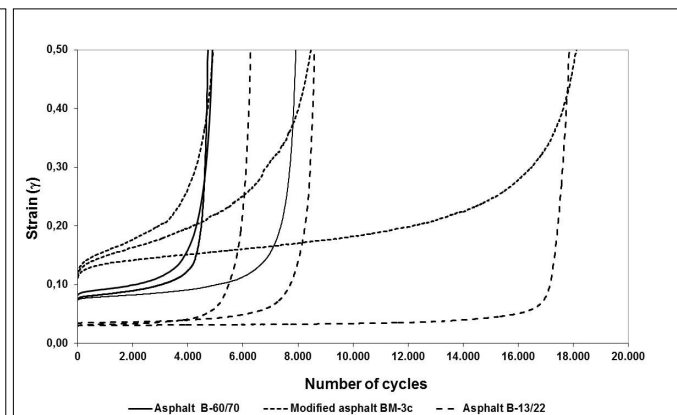


Figure 6. The curve for strain of the number of cycles

Análisis de resultados

En las figuras 7, 8, 9 y 10 se observa la variación de la deformación de tres asfaltos de diferente penetración y un asfalto modificado con los ciclos de carga. Se aprecia que la deformación va aumentando poco a poco, hasta alcanzar un rango de deformación a partir de la cual ésta aumenta de forma súbita y se produce el fallo. El rango de deformaciones donde se produce este fallo aumenta con la penetración del asfalto (figura 11), y para el asfalto modificado es más alto.

Results

Figures 7, 8, 9 and 10 show variation in strain throughout load cycles for all bitumens. Each curve shows different stress values. Strain increased slowly during the first part of the test until a certain number of cycles when strain began to increase dramatically. The tests showed that samples from the same type of bitumen failed in the same strain range (defined as failure-strain range). Such strain range increased with penetration of binders. Polymer-modified binders had the highest failure strain range for all binders tested. Figure 11 shows the strain range in which samples failed. The strain at which failure took place was higher for binders having a higher penetration range and was even higher for polymer-modified bitumen.

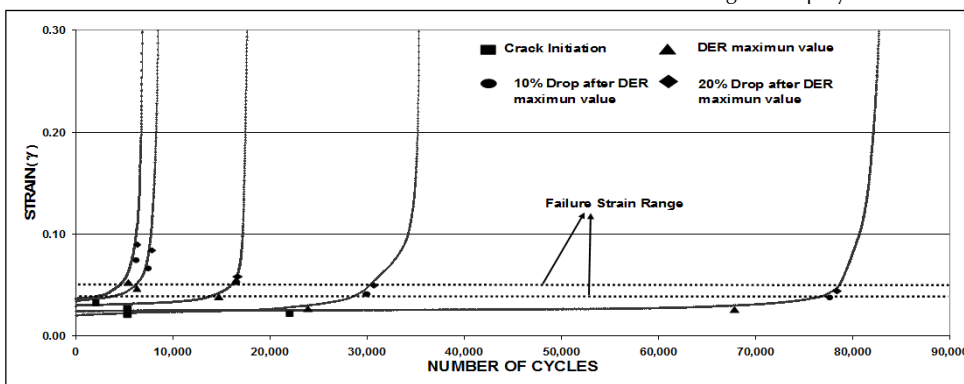


Figura 7. Evolución de la deformación con los ciclos de carga. Asfalto B-13/22.

Figure 7. Strain variation of the number of cycles. Binder B-13/22

En español

In English

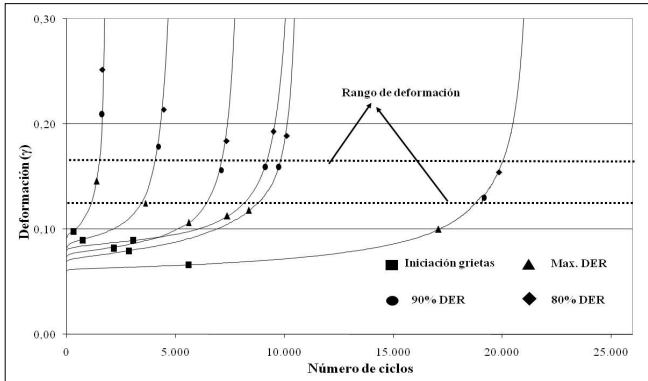


Figura 8. Evolución de la deformación con los ciclos de carga. Asfalto B-60/70.

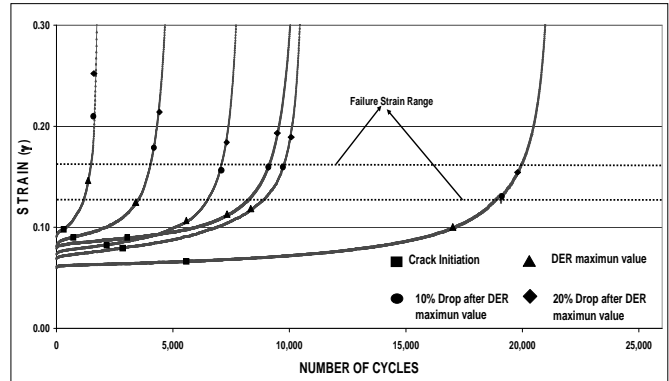


Figure 8. Strain variation of the number of cycles. Binder B-60/70

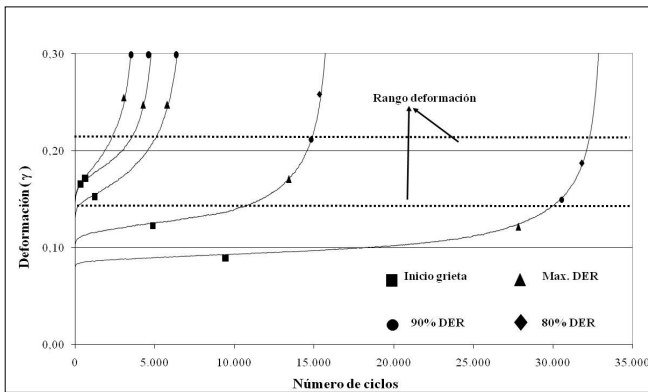


Figura 9. Evolución de la deformación con los ciclos de carga. Asfalto B-150/200.

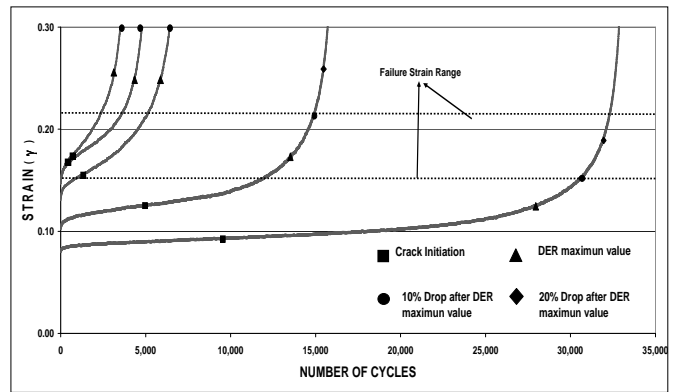


Figure 9. Strain variation of the number of cycles. Binder B-150/200

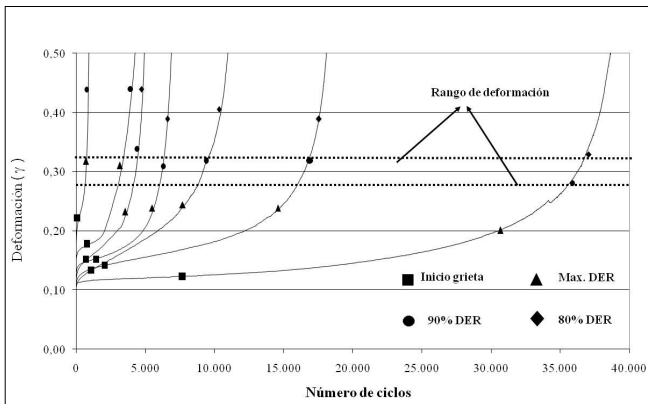


Figura 10. Evolución de la deformación con los ciclos de carga. Asfalto modificado BM-3c.

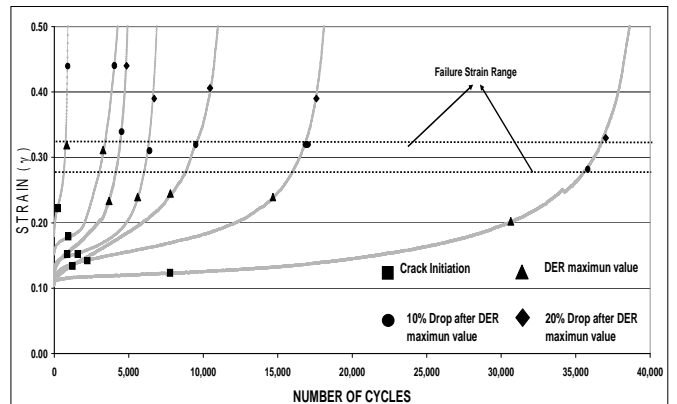


Figure 10. Strain variation of the number of cycles. Polymer-modified binder BM3c

Nuevo criterio de fallo en función de las curvas DER y evolución de la deformación

Por otra parte, en la Figura 12, se ha representado la evolución del ratio de energía disipada con los ciclos de carga para estos mismos asfaltos. A partir de estas curvas, se ha determinado el número de ciclo de fallo de los asfaltos estudiados para los diferentes criterios de fallo empleados:

New failure criterion (DER and strain evolutions)

Figure 12 shows DER variation throughout load cycles for the same binders. Based on these curves, the number of cycles at which failure occurred was computed using four different criteria:

En español

In English

- ◆ cuando el DER se separa de la línea tangente (inicio de grietas)
- ◆ para el valor máximo de DER
- ◆ para el 90 y 80% de DER en la curva posterior al valor máximo.

- ◆ DER deviation from the path;
- ◆ DER's maximum value;
- ◆ 10% and 20% drop from DER's maximum value

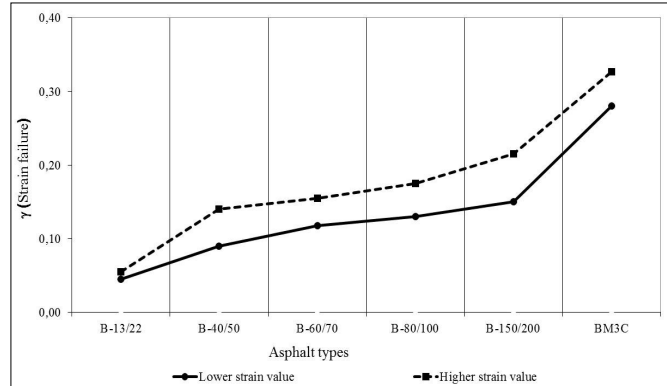
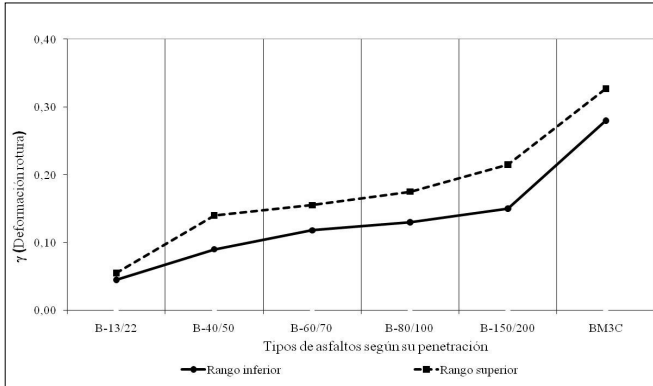


Figura 11. Rango de deformaciones de rotura de los asfaltos estudiados.

Figure 11. Failure strain range of binder type

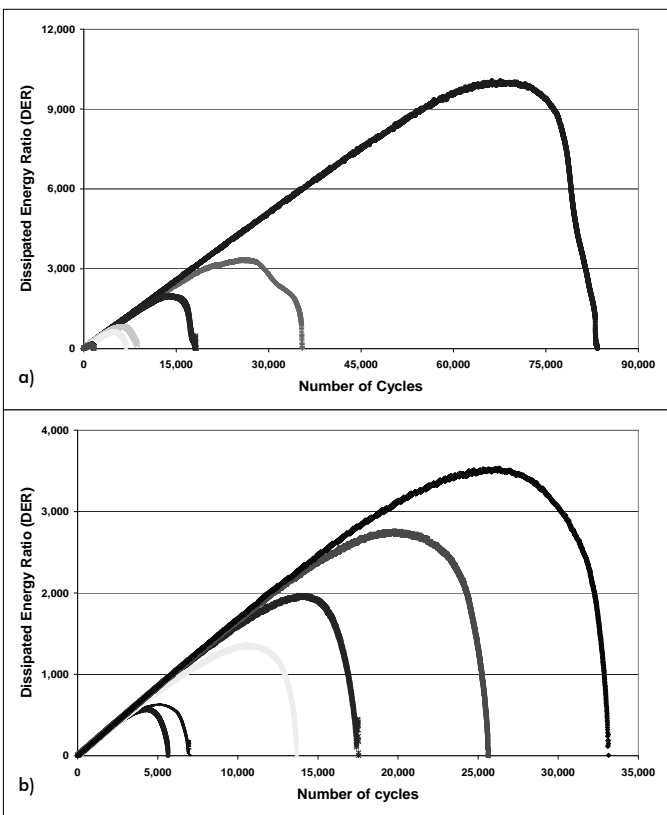
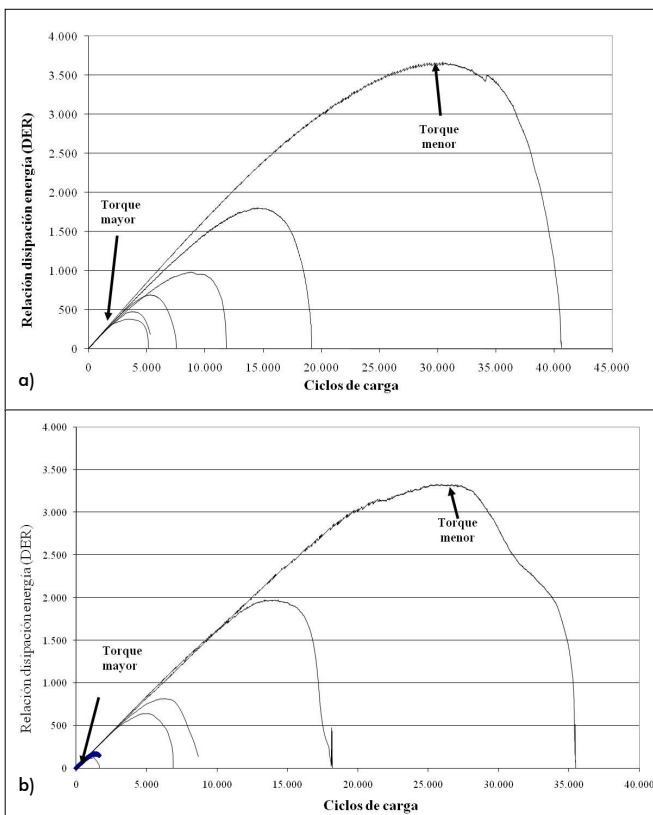


Figura 12. Evolución del ratio de energía disipada con los ciclos de carga para los asfaltos estudiados. a) Asfalto B-13/22. b) Asfalto BM-3c.

Figure 12. DER of the number of cycles: (a) asphalt B-13/22 and (b) asphalt B-80/100

Estos valores de ciclos de carga han sido colocados en las curvas de evolución de la deformación con los ciclos de carga (figuras 7, 8, 9 y 10). Se observa que, en todos los casos, el considerar que el asfalto falla cuando el DER se separa de la línea tangente, es un criterio excesivamente conservador, ya que su nivel de deformación está muy alejado del de rotura. El criterio del 80%

The values for these criteria have been plotted on the graphs shown in Figures 7, 8, 9 and 10. When DER deviation from the path proved to be too conservative, strain established by the criterion had a much lower value than the failure strain range (i.e. it appeared much earlier than actual fatigue failure occurred). The DER's maximum value and 10% and 20% drop

En español

In English

y 90% del DER se ajusta más cuando se ensayan asfaltos blandos y modificados, con un elevado número de ciclos. Sin embargo, cuando el fallo se produce con bajos ciclos de carga la deformación de rotura coincide más con el criterio del valor máximo de DER. A la vista de estos resultados, y dado que el ensayo de fatiga tiene más sentido cuando se caracterizan los materiales para un elevado número de ciclos, se considera más adecuado el criterio del 90% del DER como parámetro para definir el ciclo de carga de fallo.

Con este nuevo criterio de fallo se han determinado las leyes de fatiga para cada tipo de asfalto (figura 13), observándose que existe relación entre la ubicación de las leyes de fatiga y la deformación donde se produce el fallo por fatiga de estos asfaltos; cuando mayor es la deformación, la ley de fatiga se ubica más arriba. Por otra parte, los asfaltos con mayor módulo presentan unas leyes de fatiga con menor pendiente.

from DER's maximum value were more suitable for soft and polymer-modified binders, or, more precisely, when a high number cycles was required to produce significant damage. DER's maximum value criterion was best suited to few cycles. Given that a high number of cycles is necessary for a reliable fatigue test result, a 10% drop from DER's maximum value should be the parameter used for determining failure.

The fatigue laws for each binder have been determined using such new criterion (Figure 13). The relationship between the vertical position of the fatigue law and failure strain has been observed. The fatigue laws for binders having higher failure strain were in a higher position on the graph while bitumen having higher complex modulus had less slope for their fatigue laws.

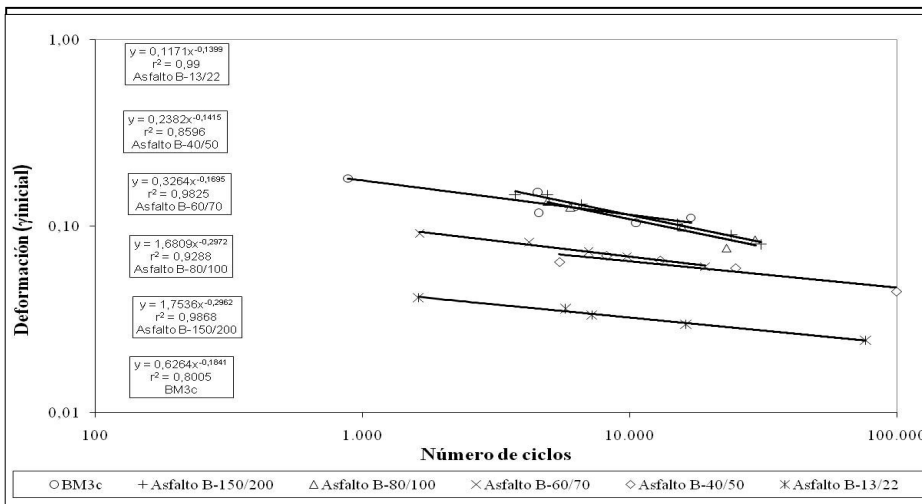


Figura 13. Leyes de fatiga para los asfaltos estudiados.

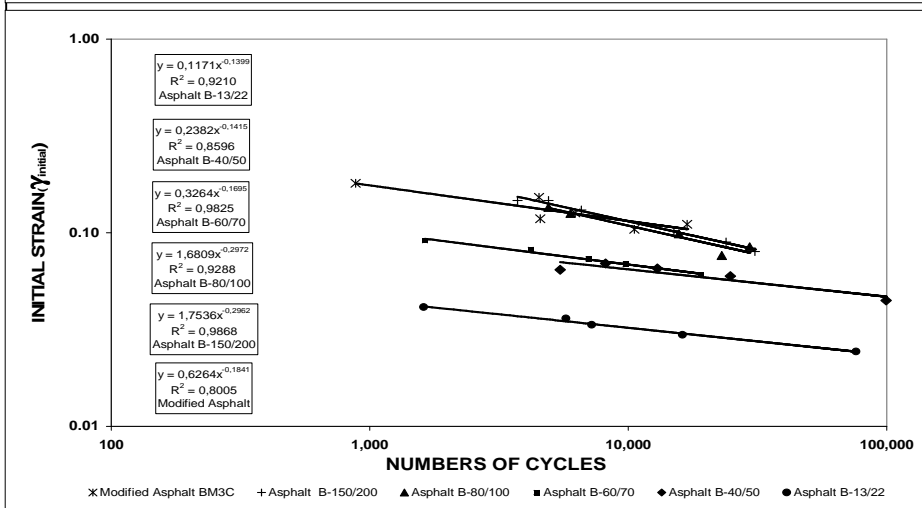


Figure 13. Fatigue law bituminous binders

Conclusiones

Del estudio realizado los autores pueden concluir que:

El criterio planteado del fallo a fatiga utilizando el DSR cuando se inician las grietas es muy conservador, ya que según el análisis de las curvas de evolución de la deformación con los ciclos de carga, el asfalto tiene una deformación muy inferior a la de su fallo por rotura.

Conclusions

The main conclusions were that:

The proposed fatigue failure criterion using DSR when cracks appeared was very conservative. According to the analysis of deformation curves in loading cycles, asphalt had significantly lower deformation than that corresponding to its failure by rupture;

En español

El criterio utilizado del fallo por fatiga en asfaltos cuando la curva DER obtiene su valor máximo es válido cuando al asfalto se le aplican pocos ciclos de carga o esfuerzos elevados, sin embargo la fatiga sucede a grandes ciclos de carga y esfuerzos menores a su resistencia máxima.

Del análisis de las curvas de evolución de la deformación con los ciclos de carga y DER, así como de la deformación de rotura, se plantea un nuevo criterio de fallo por fatiga en asfaltos, que ocurre cuando el valor máximo de DER se reduce un 10%.

En futuras investigaciones se correlacionará el comportamiento a fatiga de los asfaltos con el comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas fabricadas con dichos asfaltos.

In English

The fatigue failure criterion in asphalt, when the DER curve reached its maximum value, was valid when the asphalt had few loading cycles or high stresses. However, fatigue occurred with a large amount of loading cycles and stress value lower than their maximum strength;

A new fatigue failure criterion was proposed after analysing the deformation curves with loading cycles and DER, as well as rupture strain; this occurred when maximum DER value became reduced by 10%; and

Future research will correlate asphalt fatigue pattern with the fatigue pattern for asphalt mixtures made from these asphalts.

Referencias / References

- Anderson, D., Nir, L., Yam, M., Mihai, M., Planche, J., Martin, D., y Gauthier, G. Evaluation of fatigue criteria for asphalt binders. Transportation research record., Journal of the transportation research board, N. 1766, TRB. Washington, D.C., 2001, pp 48-56.
- Cho, D., Bahia, H., Effects of aggregate surface and water on rheology of asphalt films. Transportation research record., Journal of the transportation research board, TRB. Washington, D.C., 2007, pp 10-17.
- Delgadillo, R., Bahia, H., Rational fatigue limits for asphalt binders derived from pavement analysis., Asphalt paving technology: Journal of the association of asphalt paving technologists, Vol 74, 2005, pp 1-42.
- Di Benedetto, H., De la Roche, C., Francken, L., Fatigue of bituminous mixtures: Different approaches and RILEM interlaboratory test. Mechanical test for bituminous materials. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield. 1997. pp 15-26.
- Karen, B., Kitwe, N., Kitae, N., Bahia, H., Measuring and defining fatigue behaviour of asphalt binders., Washington, D.C., Transportation Research Record. Journal of the transportation research board, N. 1810, TRB. 2002. pp. 33-43.
- Kennedy, T., Weng, T., Mansour, S., Effect of reclaimed asphalt pavement on binder properties using the superpave system., Research report 1250-1, Center for transportation research, The university of Texas at Austin, September 1998, pp 51-59.
- Mihai, M., Clyne, T., McGraw, J., Xinjun, L., Velásquez, R., High-temperature rheological properties of asphalt binders., Transportation Research Record. Journal of the transportation research board, N. 1901, TRB, 2005, pp. 52-59.
- Perez-Jimenez, F., Reyes-Ortiz, O., Miro, R., Martinez, A., Between the fatigue behavior of bitumines and bituminous mixtures., 4 th Euroasphalt & Eurobitume congress, Copenhagen, 2008, pp 1-8.
- Shen, S., Carpentier, S., Application of the dissipated energy concept on fatigue endurance limit testing., Transportation research record, Journal of the transportation research board, N. 1929, TRB. Washington, D.C., 2005, pp 165-173.
- Soenen, H., De la Roche, C., Redelius, R., Predict mix fatigue test from binder fatigue properties, measured with a DSR., 3 th Euroasphalt & Eurobitume congress, Vienna, 2004, pp 1924-1934.