



**CONGRESO MEXICANO DEL ASFALTO**

Nuestra prioridad: **Preservar los pavimentos asfálticos**

**23-25 de agosto, Cancún 2017**

# DETERMINACIÓN DE LA VIDA A FATIGA DE UN CONCRETO ASFÁLTICO TIBIO MEDIANTE DIFERENTES ENFOQUES

Ponente

**M. En I. Richard Raúl Josephia Santos**

Instituto de Ingeniería – Universidad Nacional Autónoma de México



AMAACmx

#10CongresoAMAAC

Preservar es asfaltar

## 1. Introducción

- Durante el proceso de elaboración de una mezcla asfáltica en caliente la emisión de gases contaminantes de tipo CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, TOC y polvo, es muy alta, y causa un grave daño ambiental (Tejash G., 2008).
- De acuerdo a Larsen J., (2014) y Larios, J., (2008), el principal responsable del cambio climático y de la generación de los gases de invernadero son las emisiones globales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).



**Izquierda: tendido de mezcla en caliente. Derecha: tendido de mezcla tibia**  
(National Asphalt Pavement Association - Warm Mix Asphalt)

# 1. Introducción

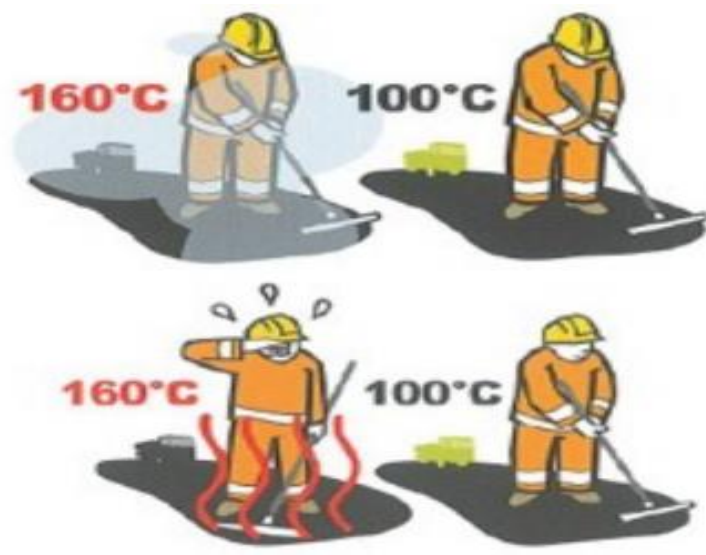
## 1.1 Beneficios de utilizar WMA

### Beneficios ambientales:

- Reducción de la emisión de CO<sub>2</sub>,
- Ahorro de energía en la producción y sobre todo la reducción a exposición de gases por parte de los operadores.



(National Asphalt Pavement  
Association - Warm Mix Asphalt)



Innovaciones en mezclas tibias de asfalto



# 1. Introducción

## 1.1 Beneficios de utilizar WMA

### Beneficios de producción:

- Proporciona una mejor trabajabilidad.
- Permite la utilización de mayores porcentajes de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement).
- Reduce el envejecimiento del cemento asfáltico.

### Beneficios de pavimentación:

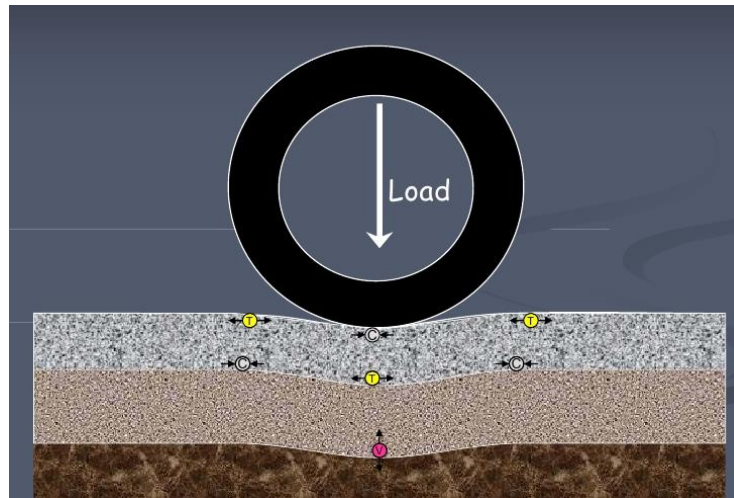
- Reduce los tiempos de espera para operar un pavimento.
- Las características mecánicas de las WMA son muy similares a las HMA.

Así mismo, otro beneficio que la literatura técnica no hace referencia es el menor desgaste de la planta asfáltica cuando se produce WMA (Kristjansdottir O., 2006).

## 2. Comportamiento a fatiga del concreto asfáltico

### 2.1 Fenómeno de fatiga

De acuerdo a Fatemi A. y Yang L. (1998), los concretos asfálticos son sometidas a sollicitaciones de corta duración por el paso repetido de los vehículos; así mismo las diferentes capas del pavimento estarán sometidas a esfuerzos de flexión.

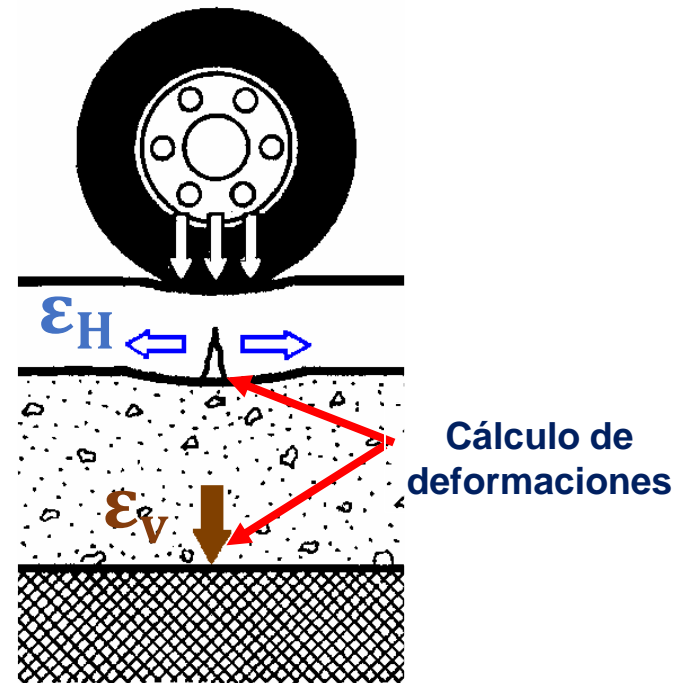


**Pavimento sometido a sollicitaciones de flexión**

## 2. Comportamiento a fatiga del concreto asfáltico

### 2.1 Fenómeno de fatiga

- La falla por fatiga generalmente inicia en la cota inferior de la carpeta asfáltica debido a una acumulación de daño (Shen S., y Carpenter S., H., 2007).
- El agrietamiento por fatiga en el concreto asfáltico incrementa con el paso repetido de los carros (Fatemi A. y Yangt L., 1998).



Fatiga de la capa superficial  $\rightarrow f(\epsilon_H)$   
Formación de roderas  $\rightarrow f(\epsilon_V)$  (Timm, D., 2014)

## 2. Comportamiento a fatiga del concreto asfáltico

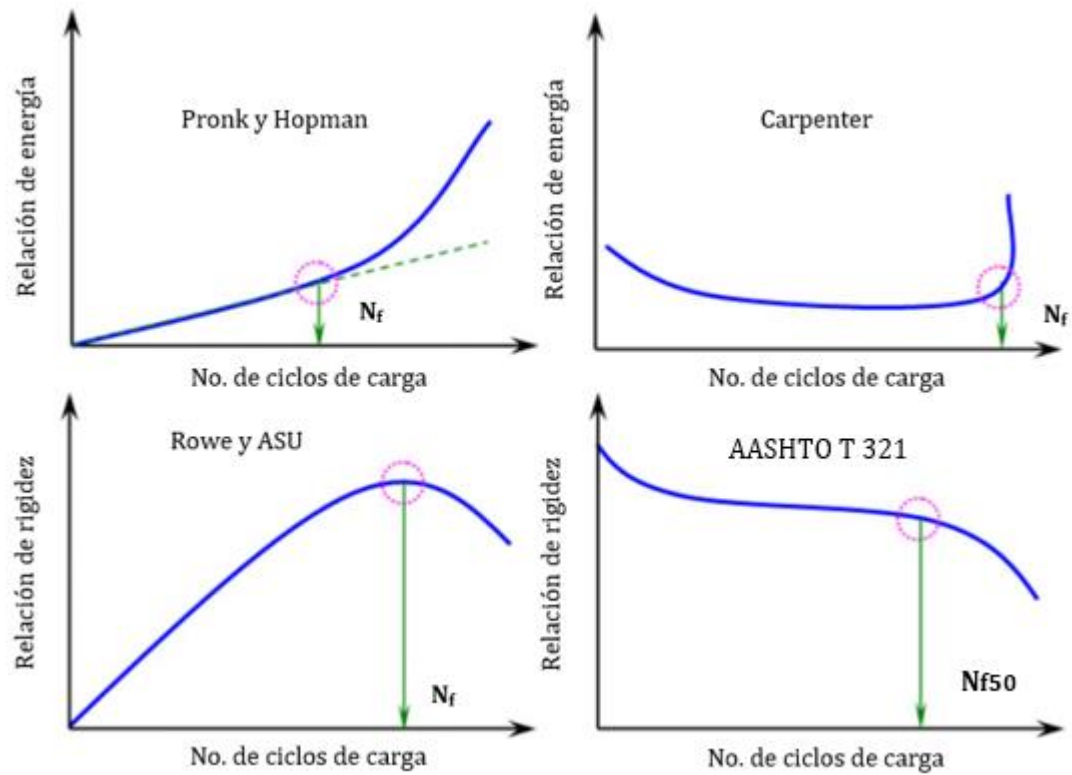
### 2.2 Criterios de vida a la fatiga

#### 2.2.1 Enfoque de energía

- Método Carpenter
- Método Hopman
- Método Pronk

#### 2.2.2 Deterioro de rigidez

- Norma AASHTO T 321
- Método de Rowe
- Método ASU



Métodos de falla a fatiga (Souliman *et al.*, 2012)

## 2. Comportamiento a fatiga del concreto asfáltico

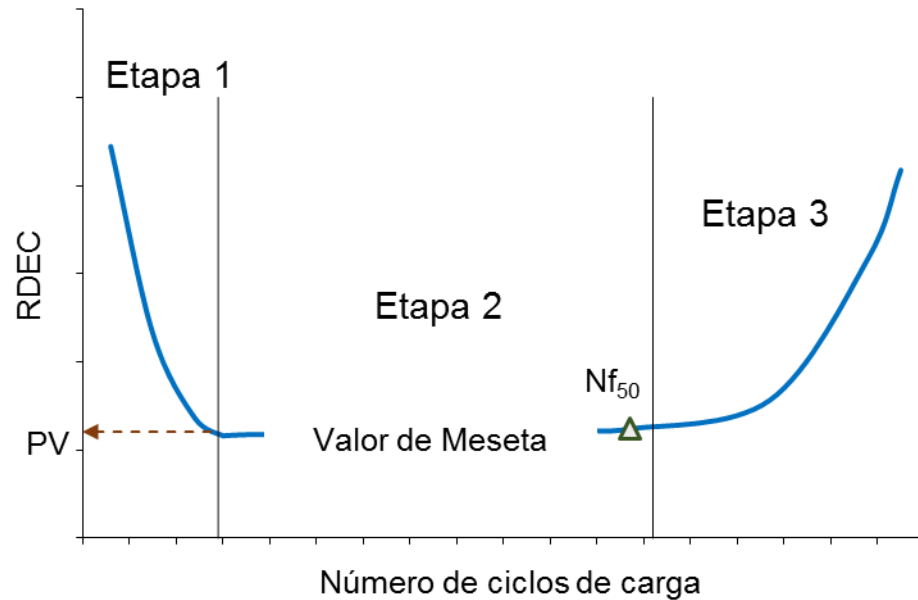
### 2.2 Criterios de vida a la fatiga

#### 2.2.1 Enfoque de **energía**

- Método Carpenter

$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n}$$

Donde:  $DE_n$  = energía disipada en el ciclo de carga  $n$ ;  $DE_{n+1}$  = energía disipada en el ciclo de carga  $n + 1$ .



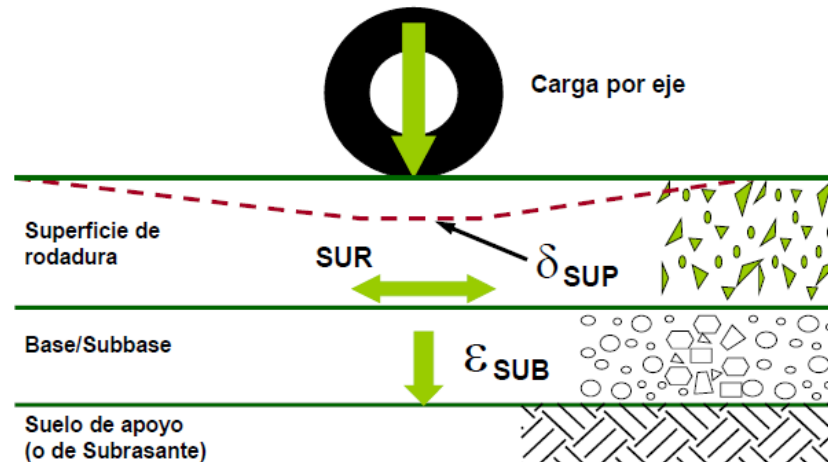
Ejemplo típico de RDEC versus ciclos de carga (Carpenter *et al.*, 2003)



## 2. Comportamiento a fatiga del concreto asfáltico

### 2.3. Límite de endurecimiento a fatiga (FEL, Fatigue endurance limit)

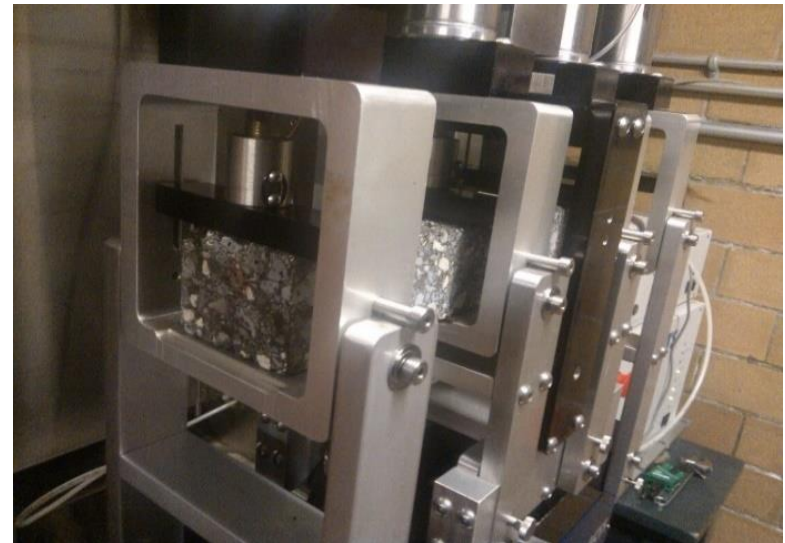
El límite de endurecimiento a fatiga (FEL), se define como la una amplitud de deformación por debajo del cual el concreto asfáltico no presenta daños significativos por fatiga cuando es sometido a un ilimitado número de ciclos de carga (NCHRP, 2010).



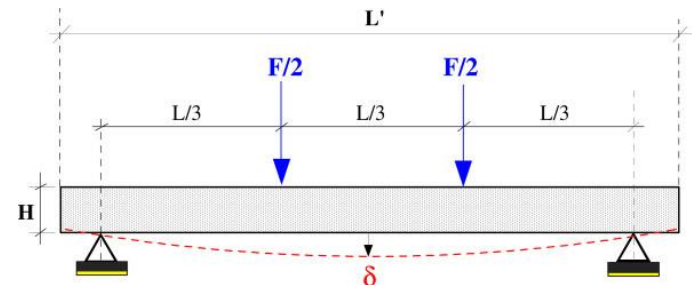
Respuesta del pavimento ante una carga

## 2. Comportamiento a fatiga del concreto asfáltico

### 2.3. Ensayo por Flexión en Cuatro Puntos



- 350, 450, 600 y 750 ( $\mu\epsilon$ )
- Frecuencia = 10 Hz
- Vacíos =  $4 \pm 1\%$
- Temperatura de prueba = 20 °C
- AASHTO T-321



## 3. Materiales y métodos

### 3.1 Materiales

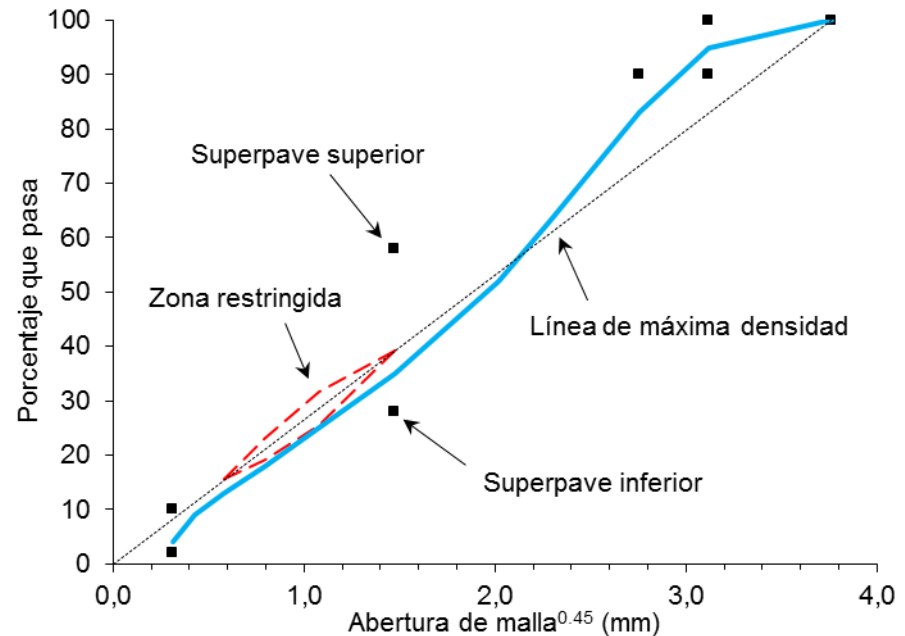
- Se utilizó un aditivo basado en tensoactivos como agente modificador de la viscosidad del cemento asfáltico.
- Se empleó un cemento asfáltico AC-20 proveniente de la refinería Miguel Hidalgo del Estado de Hidalgo perteneciente al municipio de Tula de Allende.
- El agregado mineral utilizado fue un basalto vesicular triturado.



## 3. Materiales y métodos

### 3.2 Granulometría

- Tamaño máximo de  $\frac{3}{4}$ " (19 mm) .
- Tamaño máximo nominal de  $\frac{1}{2}$ " (12.5 mm).
- Se tomaron en cuenta las recomendaciones del Instituto del Asfalto (2001) para la elaboración de mezclas asfáltica densas.





## 3. Materiales y métodos

### 3.3 Diseño de la mezcla asfáltica

- Contenido óptimo de cemento asfáltico de 6.8% (García J. L., 2014).
- Valor de TSR (Tensile Strength Ratio) de 85%.
- Tránsito (ESAL's) de  $9.5 \times 10^6$  el cual corresponde al Nivel 2 de la metodología Superpave y es representativo de vialidades urbanas.

#### Especificaciones de compactación para el nivel II (Asphalt Institute, 2001)

| ESAL de<br>diseño<br>(millones) | Número de giros |        |        |
|---------------------------------|-----------------|--------|--------|
|                                 | Inicial         | Diseño | Máximo |
| 3 - 30                          | 8               | 100    | 160    |

#### Especificaciones de las relaciones volumétricas (Asphalt Institute, 2001)

| ESAL de<br>diseño<br>(millones) | Densidad requerida<br>(porcentaje de $G_{mm}$ ) |              |              | VMA(*) Porcentaje mínimo<br>Tamaño nominal máximo (mm) |    |    |      |     | VFA(**)<br>Porcentaje<br>mínimo | Proporción<br>de polvo<br>(Filler) |
|---------------------------------|---|--------------|--------------|--|----|----|------|-----|---------------------------------|------------------------------------|
|                                 | $N_{inicial}$                                   | $N_{diseño}$ | $N_{máximo}$ | 37.5   | 25 | 19 | 12.5 | 9.5 | 65-75                           | 0.6 - 1.2                          |
| mar-30                          | $\leq 89.0$                                     | 96           | $\leq 98.0$  | 11   | 12 | 13 | 14   | 15  |                                 |                                    |

## 3. Materiales y métodos

### 3.4. Elaboración de especímenes

8 vigas prismáticas de  $380 \pm 6$  mm de largo,  $63 \pm 2$  mm de ancho y  $50 \pm 2$  mm de espesor



120 – 125 °C (248 – 257 °F)



110 – 114 °C (230 – 237 °F)



99 – 101 °C (210 – 214 °F)



Compactador de rodillo liso



Compactación en campo



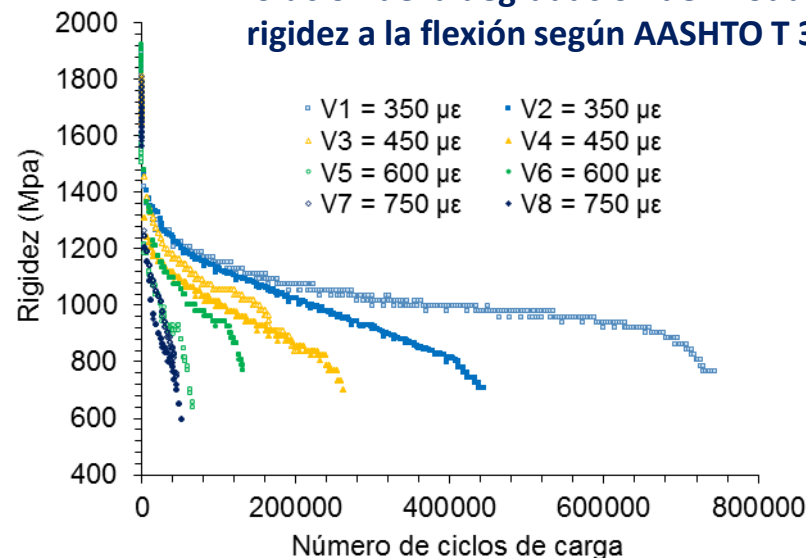
Vigas WMA

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Enfoque de Rigidez



Evolución de la degradación del módulo de rigidez a la flexión según AASHTO T 321



Resumen de resultados de la prueba a fatiga bajo el enfoque de rigidez

| ID   | Tipo de mezcla | Deformación       | Vacíos de aire | Ciclos a fallo | Promedio | Ciclos a fallo | Promedio | Ciclos a fallo | Promedio |
|------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
| Viga |                | ( $\mu\epsilon$ ) | (%)            | (AASHTO)       | (AASHTO) | (ASU)          | (ASU)    | (Rowe)         | (Rowe)   |
| V1   | WMA-1          | 350               | 4.03           | 588010         | 463510   | 696010         | 553505   | 696010         | 553505   |
| V2   | WMA-2          | 350               | 4.11           | 339010         |          | 411000         |          | 411000         |          |
| V3   | WMA-1          | 450               | 4.01           | 183003         | 189007   | 192001         | 214506   | 192001         | 214506   |
| V4   | WMA-2          | 450               | 4.07           | 195010         |          | 237010         |          | 237010         |          |
| V5   | WMA-1          | 600               | 4.09           | 54008          | 72009    | 60005          | 91508    | 60005          | 91508    |
| V6   | WMA-2          | 600               | 4.12           | 90010          |          | 123010         |          | 123010         |          |
| V7   | WMA-1          | 750               | 4.02           | 33006          | 31508    | 42000          | 43502    | 42000          | 43502    |
| V8   | WMA-2          | 750               | 4.10           | 30010          |          | 45003          |          | 45003          |          |

## 4. Resultados y discusión

### 4.2 Enfoque de Energía

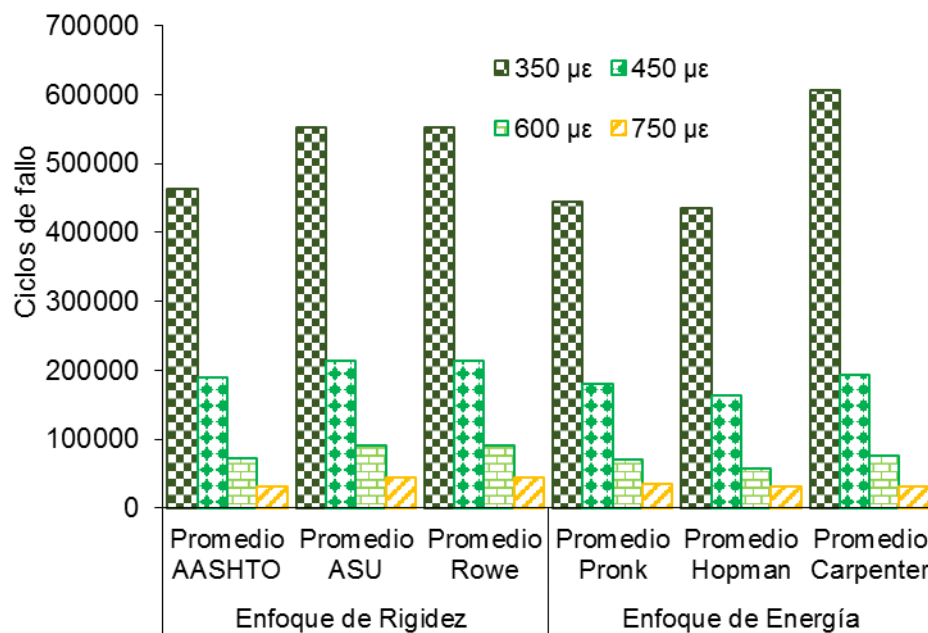
Resumen de resultados de la prueba a fatiga bajo el enfoque de rigidez

| ID<br>Viga | Tipo de<br>mezcla | Deformación<br>( $\mu\epsilon$ ) | Vacíos de<br>aire<br>(%) | Ciclos a<br>fallo<br>(Pronk) | Promedio<br>(Pronk) | Ciclos a<br>fallo<br>(Hopman) | Promedio<br>(Hopman) | Ciclos a<br>fallo<br>(Carpenter) | Promedio<br>(Carpenter) | PV<br>(Ec. 2) | PV<br>(Ec. 3) |
|------------|-------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| V1         | WMA-1             | 350                              | 4.03                     | 632265                       | 445065              | 627521                        | 435523               | 816009                           | 606006                  | 1.33E-07      | 1.33E-07      |
| V2         | WMA-2             | 350                              | 4.11                     | 257865                       |                     | 243524                        |                      | 396003                           |                         | 2.45E-07      | 2.45E-07      |
| V3         | WMA-1             | 450                              | 4.01                     | 172265                       | 179310              | 163542                        | 163900               | 186002                           | 193501                  | 4.59E-07      | 4.59E-07      |
| V4         | WMA-2             | 450                              | 4.07                     | 186354                       |                     | 164258                        |                      | 201000                           |                         | 4.15E-07      | 4.15E-07      |
| V5         | WMA-1             | 600                              | 4.09                     | 61652                        | 70944               | 62354                         | 57360                | 54009                            | 76506                   | 1.50E-06      | 1.50E-06      |
| V6         | WMA-2             | 600                              | 4.12                     | 80235                        |                     | 52365                         |                      | 99002                            |                         | 1.03E-06      | 1.03E-06      |
| V7         | WMA-1             | 750                              | 4.02                     | 30157                        | 35207               | 27684                         | 32131                | 33006                            | 31508                   | 2.82E-06      | 2.82E-06      |
| V8         | WMA-2             | 750                              | 4.10                     | 40257                        |                     | 36578                         |                      | 30010                            |                         | 3.33E-06      | 3.33E-06      |

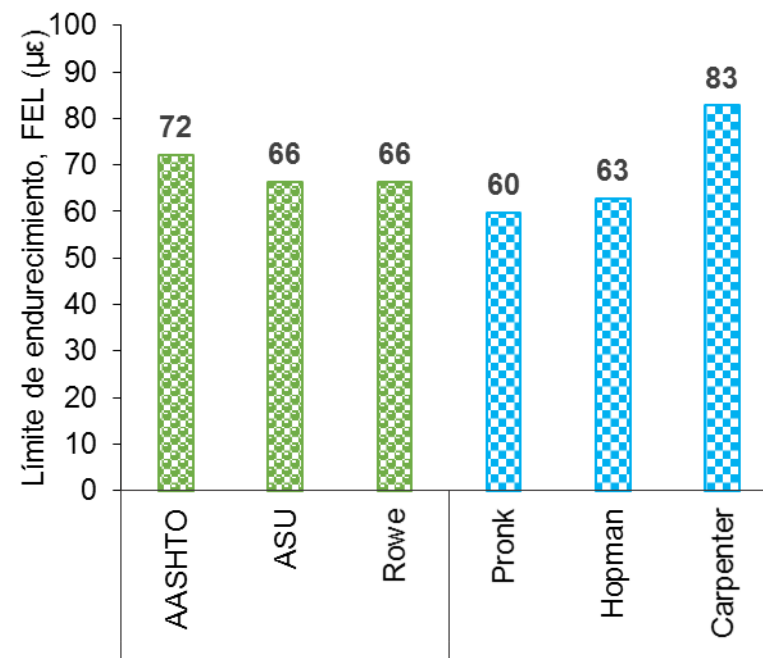
- Todas las vigas fallaron a ciclos mayores a los 10,000 y menores a los 1,000,000.
- Los tres criterios de falla adoptados bajo el enfoque de energía, arrojaron resultados muy similares.



## 4. Resultados y discusión



**Promedio de ciclos hasta la falla por nivel de deformación y enfoque de la WMA**



**Límite de endurecimiento de fatiga para WMA**

## 5. Conclusiones

La resistencia a fatiga del concreto asfáltico tibio se determinó mediante el procedimiento AASHTO T321-2003 con el cometido de predecir la diferencia de los ciclos de carga  $N_f$  donde falla a fatiga el material, mediante los enfoques de energía y deterioro de la rigidez, tomando en cuenta cuatro niveles de deformación 350, 450, 600 y 750  $\mu\epsilon$ . Los resultados muestran que el enfoque de energía (Pronk, Hopman y Carpenter) en promedio nos proporciona una mayor vida a fatiga, aproximadamente en un 10% mayor en relación al enfoque de rigidez (AASHTO, ASU y Rowe).

## REFERENCIAS

AASHTO, (2014). *Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt Subjected to Repeated Flexural Bending*. AASHTO designation T 321.

ASTM, (2013). Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction, ASTM designation D 3381/D 3381M.

Asphalt Institute, (2001). *Superpave Mix Design*. Series No. 2 (SP-02). Asphalt Institute, Lexington, KY.

Carpenter S. H., Ghuzlan K., y Shen S., (2003). "Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavements". Transportation Research Record: Journal, No. 1832, pp. 131-138.

D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B., (2007). Warm-Mix Asphalt: European Practice. European Tour FHWA. American Trade Initiatives.

European Asphalt Pavement Association, (2010). The use of Warm Mix Asphalt. EAPA position paper The use of Warm Mix Asphalt – January 2010.

Fatemi A. y Yang L. (1998). "Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: a Survey of The State of The Art for Homogeneous Materials". Int. J. Fatigue Vol. 20. No. 1, pp. 9-34, 1998. Elsevier Science Ltd.

García J. L., (2014). "Empleo de Residuos de Concreto y Demolición (RCD) en la Construcción de Carpetas Asfálticas". Tesis de investigación para optar al título de Maestro en Ingeniería Civil. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. 166 p.

## REFERENCIAS

German Asphalt Paving Association, (2009). Warm Mix Asphalts. Elke Schlüter communication agency, Alfter. GAPA.

Ghuzlan K.A., (2001). "Fatigue Damage Analysis in Asphalt Concrete Mixtures Based Upon Dissipated Energy Concepts" Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Ghuzlan K.A., Carpenter S.H., (2000). "Energy-derived, damage-based failure criterion for fatigue testing". Transportation research record: Journal of the transportation research board 1723(1) (2000) 141- 149.

Gillis, J. (2015). "Short Answers to Hard Questions About Climate Change". The New York Times. Consultado el 5 de septiembre de 2016.

Hurley, G. C. *et al.* (2010). "Wisconsin Field Trial of Warm Mix Asphalt Technologies: Construction Summary". NCAT Report No. 10-04. National Center for Asphalt Technology (NCAT), Auburn. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC, (2013). Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC, (2001). Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Kristjansdottir, O. (2006). "Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving". Master of Science Thesis. University of Washington.

Larios, J. (2008). "Calentamiento Global al Borde del Límite". Instituto de Estudios Transnacionales (INET). ISBN: 978-84-936894-2-1. Depósito Legal: CO 527/08. Córdoba, España, 2008.



## REFERENCIAS

Larsen, J. (2014). Climate Change Fact Sheet. Earth Policy Institute. [www.earth-policy.org](http://www.earth-policy.org). Consultado el 5 de septiembre de 2016.

Pronk A.C., (1997). "Comparison of 2 and 4 point fatigue tests and healing in 4 point dynamic bending test based on the dissipated energy concept". Proceedings of the eighth international conference on asphalt pavements, Seattle, Washington, pp. 987–994. Pronk A.C. and Hopman P.C., (1990). "Energy Dissipation: The Leading Factor of Fatigue. Highway Research: Sharing the Benefits". Proceedings of the Conference the United States Strategic Highway Research Program. London.

Prowell B.D., Brown E.R., Anderson R.M., Sias-Daniel J., Von Quintus H., Shen S., Carpenter S.H., Bhattacharjee S. & Maghsoodloo S., (2010). "Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt". NCHRP Report 646, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Rowe G. M., (1993). "Performance of Asphalt Mixtures in the Trapezoidal Fatigue Test. Association of Asphalt Paving Technologists". Vol. 62, pp. 344-384.

Shen S., Airey G.D., Carpenter S.H. and Huang H.A., (2006). "Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation". International Journal of Road Materials and Pavement Design, 7 (1), 85-92.

Shen S., Chiu H.M., Huang H., (2010). "Characterization of fatigue and healing in asphalt binders". Journal of Materials in Civil Engineering 22(9) (2010) 846-852.

Souliman W.A., Zeiada K.E., Kaloush and Mamlouk M.S., (2012). "Assessment of different flexure fatigue failure analysis methods to estimate the number of cycles to failure of asphalt mixtures". *Four-Point Bending – Pais & Harvey (Eds)*. © 2012 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-64331-3. Arizona State University, Tempe, Arizona, US.

## REFERENCIAS

Tayebali *et al.*, (1993). "Modeling Fatigue Response of Asphalt Aggregate Mixtures". Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 62, pp. 385-421.

Tejash, G. (2008). "Effects of warm asphalt additives on asphalt binder and mixture properties". In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy Civil Engineering.

Yan Jun, *et al.* (2010). "Shanghai Experience with Warm Mix Asphalt". GeoShanghai 2010 International Conference. ASCE 2010. Paving Materials and Pavement Analysis.

Vaitkus A., *et al.* (2009). "Analysis and evaluation of possibilities for the use of Warm Mix Asphalt in Lithuania". The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. Vilnius Gedimnas Technical University.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Planta de Asfalto de la Ciudad de México y al grupo SÚRFAX®, por la donación de los materiales utilizados en la elaboración de los especímenes de concreto asfáltico utilizados en esta investigación.



## **CONGRESO MEXICANO DEL ASFALTO**

Nuestra prioridad: **Preservar los pavimentos asfálticos**

**23-25 de agosto, Cancún 2017**

# ¡Muchas gracias!

Datos de contacto:

[RJosephiaS@iingen.unam.mx](mailto:RJosephiaS@iingen.unam.mx)

[rjosephia@yahoo.es](mailto:rjosephia@yahoo.es)

[AOSA@iingen.unam.mx](mailto:AOSA@iingen.unam.mx)



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**



**AMAACmx**

**#EligeAsfalto**

**Preservar es asfaltar**