

## **UN MODELO CONSTITUTIVO PARA LA CARACTERIZACION DE LA FATIGA EN CONCRETOS ASFALTICOS**

### **A CONSTITUTIVE MODEL TOWARDS THE FATIGUE CHARACTERIZATION OF ASPHALT CONCRETE**

*Por / By Nelson E. Galé, Alex T. Visser*

#### **Resumen**

*Un modelo denominado constitutivo fue utilizado en la presente comunicación para evaluar los concretos asfálticos a través de una curva de fatiga que tiene en cuenta la evolución del daño en los mismos. El objetivo de esta comunicación es presentar una alternativa eficaz para la predicción de la resistencia a la fatiga de los concretos asfálticos, comparable con la que se observa en los pavimentos en servicio. Para tal fin fue necesario verificar primero el principio de correspondencia, el cual se basa en el cálculo de las pseudo deformaciones y que requiere la expresión del módulo de relajamiento en función del tiempo. A su vez, el módulo de relajamiento se predijo a través del ensayo de deformación de fluencia. La curva maestra de deformación de fluencia fue desarrollada usando la serie de Prony y luego, utilizando la teoría de viscoelasticidad, la curva maestra del módulo de relajamiento fue también obtenida. A continuación se presentó el modelo constitutivo que describe el comportamiento uniaxial de las tensiones-deformaciones en el concreto asfáltico y se demostró que el modelo provee una caracterización satisfactoria del comportamiento mecánico del concreto asfáltico bajo cargas uniaxiales y con tasa de deformación constante. Luego se utilizó el modelo teórico para la predicción de la resistencia a la fatiga en concretos asfálticos, desarrollándose una curva que presenta una pendiente menor comparada con la de otros modelos convencionales, es decir menos sensible a los incrementos de los valores de deformación de tracción. Dentro del rango de las deformaciones analizadas, la curva del modelo constitutivo es la que presenta mayores valores del número de repeticiones de la carga hasta la rotura de la muestra, indicando una mayor resistencia a la fatiga.*

**Palabras Clave:** *Principio de correspondencia, viscoelasticidad linear, módulo de relajamiento, deformación de fluencia, series de Prony, modelo uniaxial viscoelástico, evolución del daño, curvas de fatiga.*

#### **Abstract**

*A constitutive model was used to evaluate the fatigue performance of asphalt concrete, considering damage evolution. The aim of the paper is to present a methodology capable of predicting fatigue life in asphalt concrete more realistically and comparable with field fatigue life. Firstly, the correspondence principle was verified, which is based on the calculation of pseudo deformations and the relaxation curve as a function of time. In turn, this relaxation curve was predicted through the creep test. Consequently, the master creep compliance curve and the master relaxation curve were obtained using the Prony series and the theory of viscoelasticity. Then, the constitutive model for uniaxial stress-strain behaviour was presented and it was shown that the model provides a satisfactory characterization of the mechanical behaviour of asphalt concrete under uniaxial loading. The theoretical model was used to predict fatigue performance in asphalt concrete by means of a fatigue curve, which present a smaller slope compared to the conventional curves. Within the range of tensile strains analyzed, this curve presents higher values of number of repetitions to failure, indicating a better fatigue resistance.*

**Keywords:** *Correspondence principle, linear viscoelasticity, relaxation modulus, creep compliance, prony series, uniaxial viscoelastic model, damage evolution, fatigue curves.*



## 1. INTRODUCCION

Un modelo constitutivo fue utilizado en la presente comunicación para evaluar los concretos asfálticos a través de una curva de fatiga que tiene en cuenta la evolución del daño en los mismos. El objetivo de esta comunicación es presentar una alternativa eficaz para la predicción de la resistencia a la fatiga de los concretos asfálticos, comparable con la que se observa en los pavimentos en servicio. A su vez, el principio de correspondencia fue utilizado como el primer paso para la caracterización a la fatiga de los concretos asfálticos (Kim et al, 1995). A través de este principio, un problema viscoelástico y dependiente del tiempo puede ser transformado a un caso elástico e independiente del tiempo. El cálculo de pseudo variables es necesario para la aplicación de este principio y el fundamento teórico del mismo se presenta en la Sección 2, Fórmulas (1) a (5). La Sección 3 presenta la verificación del principio de correspondencia y la Sección 4 la aplicación del mismo a una serie de ensayos a tracción uniaxial con diferentes tasas de deformación constante variando entre 0.0001 unidades/seg. y 0.0032 unidades/seg. Se observa que el principio de correspondencia elimina la dependencia del material con respecto a la diferentes tasas de deformación aplicadas.

A continuación se derivó una ecuación constitutiva para predecir la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas densamente graduadas. La Sección 5 detalla el modelo constitutivo que describe el comportamiento uniaxial de las tensiones-deformaciones en el concreto asfáltico. A través de este experimento se demostró que el modelo provee una caracterización satisfactoria del comportamiento mecánico del concreto asfáltico bajo cargas uniaxiales y con tasa de deformación constante.

Por último, la determinación de una curva de fatiga para ser utilizada en el diseño de concretos asfálticos se presenta en la Sección 6 y es comparada con otras dos curvas denominadas convencionales. La presente comunicación está basada en el tema de la Maestría en Ingeniería presentada en la Universidad de Pretoria denominada Fatigue Characterisation of Asphalt Concrete using Viscoelasticity and Damage Theory (Galé, 2000).

## 2. PRINCIPIO DE CORRESPONDENCIA

Las tensiones originadas por una serie cíclica de deformaciones son calculadas con una ecuación linear-viscoelástica para el caso de carga uniaxial y con un módulo de relajamiento típico para concretos asfálticos. La fórmula usada es:

$$\sigma = \int_0^t E(t - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (1)$$

donde:

$E(t)$  = módulo de relajamiento

$\sigma$  = tensión uniaxial

$\varepsilon$  = deformación uniaxial

El comportamiento resultante de las tensiones-deformaciones presenta lazos de histéresis aún cuando debido a la magnitud de la carga no hay daño provocado en la muestra.

La teoría de viscoelasticidad permite transformar problemas viscoelásticos de forma tal que sean matemáticamente equivalentes a problemas elásticos con la sustitución de los módulos de elasticidad. Esta correspondencia se realiza transformando el dominio de aplicación y las ecuaciones de borde de un cierto problema viscoelástico con respecto al tiempo.

Schapery (1984) propuso un principio de correspondencia elasto-viscoelástico que puede ser aplicado tanto a materiales que se comportan en forma linear como a aquellos que tienen un comportamiento viscoelástico. De acuerdo a este principio, las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los materiales viscoelásticos son idénticas a las del caso elástico, pero las tensiones y deformaciones no son necesariamente cantidades físicas sino *pseudo variables* con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_{ij}^R = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t - \tau) \frac{\delta \varepsilon_{ij}}{\delta \tau} d\tau \quad (2)$$

$$\sigma_{ij}^R = E_R \int_0^t D(t - \tau) \frac{\delta \sigma_{ij}}{\delta \tau} d\tau \quad (3)$$



donde:

$\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$  = tensión y deformación físicas

$\sigma_{ij}^R, \varepsilon_{ij}^R$  = pseudo tensión y deformación

$E_R$  = módulo de referencia

$E(t)$  = módulo de relajamiento

$D(t)$  = deformación de fluencia

Para el caso de materiales viscoelásticos la relación entre tensión uniaxial y deformación está dada por la Fórmula 1. Usando la definición de pseudo deformación dada en la Fórmula 2, la Fórmula 1 puede ser expresada como:

$$\sigma = E_R \varepsilon^R \quad (4)$$

donde la expresión de la pseudo deformación está dada por:

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t - \tau) \frac{\delta \varepsilon}{\delta \tau} d\tau \quad (5)$$

### 3. VERIFICACION DEL PRINCIPIO DE CORRESPONDENCIA

#### 3.1 Fabricación de la Muestra

Las características de la mezcla asfáltica densamente graduada utilizada en los ensayos aparecen en la Tabla 1.

**Tabla 1. Características de la mezcla asfáltica en planta**

Tipo de Cemento Asfáltico		60-70 Pen	
Contenido de Cemento Asfáltico (%)		5,48	
Densidad Compactada en kg/m <sup>3</sup>		2 340	
Densidad Teórica Máxima (Rice) en kg/m <sup>3</sup>		2 458	
Estabilidad (kN)		10,9	
Fluencia (mm)		3,3	
Porcentaje de vacíos		4,8	
Granulometría	Tamiz (mm)	Pasa (%)	Especificación
	13,2	100	100
	9,5	97	90-100
	6,7	77	69-79
	4,75	60	53-63
	2,36	40	35-45
	1,18	27	27-35
	0,60	20	19-27
	0,30	15	12-20
	0,15	10	7-13
0,075	6,4	4,7-7,7	

La mezcla asfáltica fue compactada en los laboratorios del CSIR Transportek en forma de una placa rectangular de donde se extrajeron muestras cilíndricas de 100 mm de diámetro y 110 mm de altura. Las muestras fueron perforadas en dirección horizontal, es decir perpendicularmente al sentido de la fuerza de compactación, con la intención de reproducir la dirección de las tensiones/deformaciones de tracción que se producen en los pavimentos en servicio cerca de la



fibra inferior de las capas asfálticas. La densidad compactada de la muestra asfáltica en el laboratorio fue de 2 333 kg/m<sup>3</sup>. La densidad teórica máxima y el porcentaje de vacíos fueron de 2 440 kg/m<sup>3</sup> y 4,4%, respectivamente.

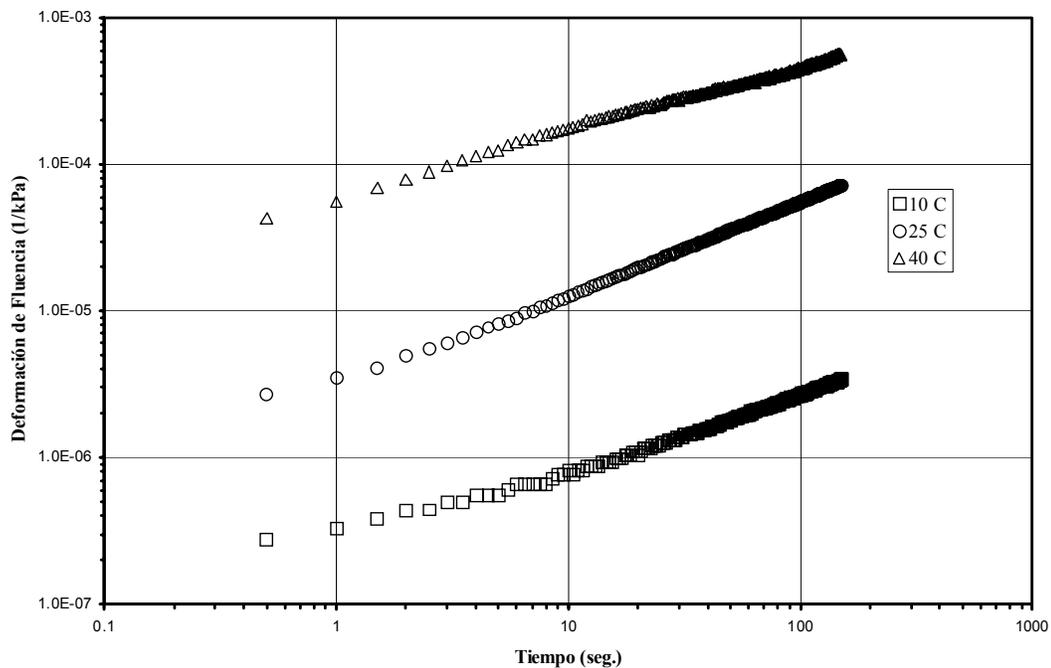
### 3.2 Curva Maestra de Deformación de Fluencia

En primer lugar, el comportamiento de la mezcla asfáltica fue analizado aplicando el principio de correspondencia. Este principio requiere el cálculo de pseudo deformaciones según lo dicho en la sección anterior. El cálculo de las pseudo deformaciones necesita a su vez la expresión del módulo de relajamiento en función del tiempo. El ensayo para determinar el módulo de relajamiento es complicado y desde un punto de vista práctico es preferible su predicción a través de un ensayo más simple como es el de deformación de fluencia.

Por lo tanto, una serie de ensayos de deformación de fluencia a tracción fueron realizados a tres temperaturas diferentes (10°C, 25°C y 40°C) con el fin de obtener las propiedades termoviscoelásticas básicas del material. Las características del ensayo y las dimensiones de la muestra son presentadas en la Tabla 2. La Figura 1 representa las curvas de deformación de fluencia a las distintas temperaturas.

**Tabla 2. Ensayos de Deformación de Fluencia a Tracción**

Nº	Temperatura (°C)	Carga (kN)	Diámetro (mm)	Altura (mm)
1	10	1.60	100	110
2	25	1.10	100	110
3	40	0.55	100	110



**Figura 1. Curvas de Deformación de Fluencia a 10°C, 25°C y 40°C**

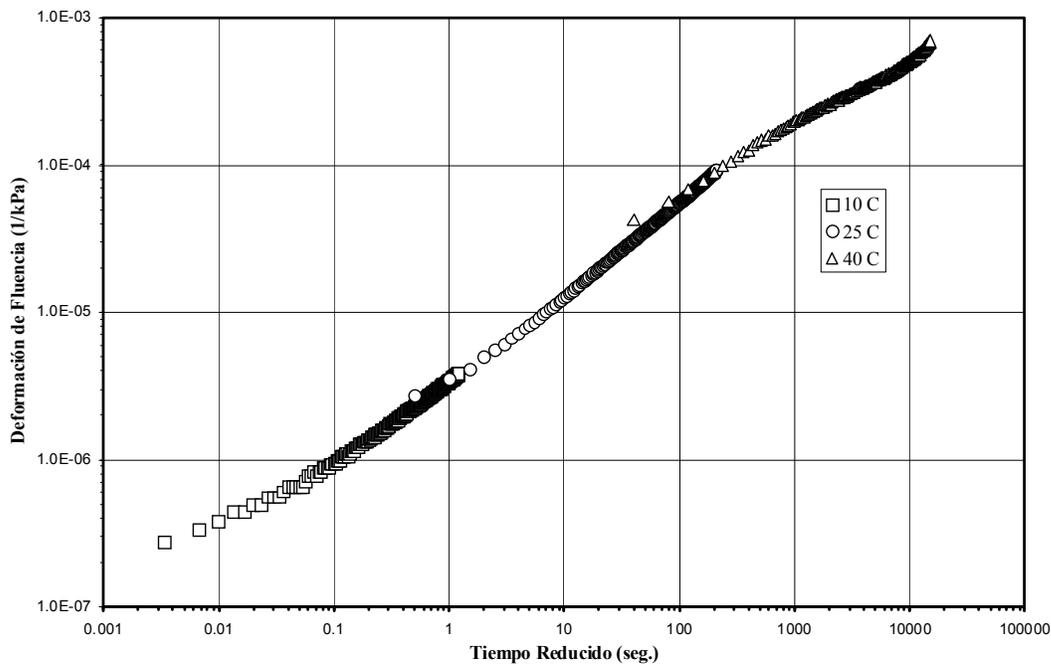


Las curvas representadas en la Figura 1 fueron usadas para derivar una curva maestra de deformación de fluencia, la cual se representa en la Figura 2. Esta curva maestra fue generada desplazando cada una de las curvas en dirección horizontal en escala logarítmica. Una de las temperaturas fue seleccionada como referencia para la curva maestra, en este caso  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

La dependencia que exhiben las mezclas asfálticas con respecto al tiempo y la temperatura puede ser representada por la dependencia con respecto a una única variable, el *tiempo reducido* como se observa en la Figura 2. A esta característica se la denomina *superposición de tiempo y temperatura* (Park et al., 1996).

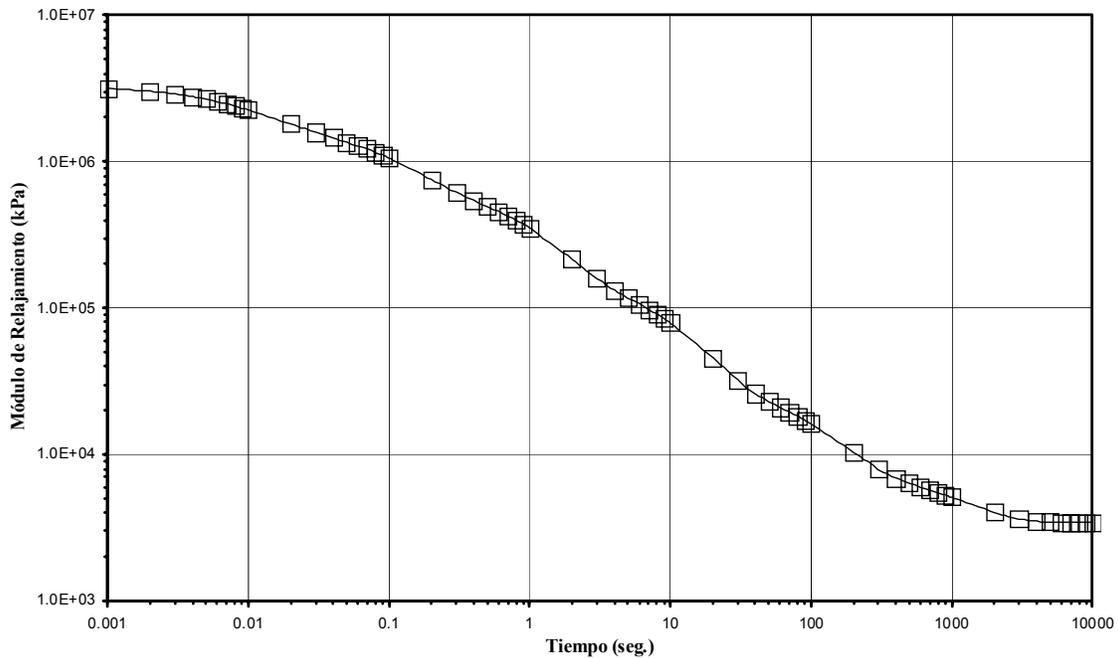
Una vez obtenida la curva maestra,  $D(t)$ , es necesario representarla matemáticamente para lo cual se utilizó la serie de Prony (Park and Kim, 2001).

La expresión del módulo de relajamiento en función del tiempo,  $E(t)$ , fue obtenida usando la interrelación basada en la teoría de la viscoelasticidad por la cual  $E(t)$  es aproximadamente igual a  $1/D(t)$  (Ferry, 1980). La Figura 3 representa la curva maestra del módulo de relajamiento en función del tiempo.



**Figura 2. Curva maestra de deformación de fluencia a una temperatura de referencia de  $25^{\circ}\text{C}$**





**Figura 3. Curva maestra del módulo de relajamiento a una temperatura de referencia de 25°C**

La siguiente expresión matemática fue utilizada para describir los datos experimentales obtenidos en los ensayos de laboratorio:

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^N E_i e^{-t/\rho_i} \quad (6)$$

donde:

- $E_{\infty}$ ,  $E_i$  y  $\rho_i$  son constantes
- $E_{\infty}$  = módulo de equilibrio
- $\rho_i$  = tiempos de relajamiento

#### 4. APLICACION DEL PRINCIPIO DE CORRESPONDENCIA

Una serie de ensayos a tracción uniaxial fueron realizados en una muestra de concreto asfáltico a 25°C con diferentes tasas de deformación constante variando entre 0.0001 unidades/seg. y 0.0032 unidades/seg. Estos ensayos se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3. Ensayos a tracción con deformación constante**

Nº	Carga Tracción Uniaxial	Forma de la Onda	Amplitud de la Deformación
1	Tracción uniaxial	Medio Seno Verso	0.0001
2	Tracción uniaxial	Medio Seno Verso	0.0004
3	Tracción uniaxial	Medio Seno Verso	0.0016
4	Tracción uniaxial	Medio Seno Verso	0.0032

Los 4 ensayos se realizaron en la misma muestra de 100 mm de diámetro y 110mm de altura introduciendo un período de reposo de 40 minutos entre ellos.



Los gráficos de tensión versus deformación a las distintas tasas de deformación se presentan en la Figura 4, donde puede observarse que la mezcla asfáltica analizada presenta un comportamiento que depende de la tasa de deformación constante aplicada.

Seguidamente, estos resultados fueron vueltos a representar en la Figura 5 en términos de pseudo deformaciones, según el principio de correspondencia. Las pseudo deformaciones,  $\varepsilon^R$ , fueron representadas versus  $\sigma/I$ , es decir, tensiones sobre pseudo rigidez inicial. La pseudo rigidez inicial, definida como la relación entre la tensión y la pseudo deformación en la parte lineal de la curva, fue usada para dar cuenta de la variabilidad entre los ensayos. Puede observarse que el principio de correspondencia elimina la dependencia del material con respecto a la diferentes tasas de deformación aplicadas.

La expresión de la pseudo deformación, de acuerdo a la Fórmula 5 con el uso de la Fórmula 6, está dada por:

$$\varepsilon^R = R/E_R ( E_{\infty}t + \sum_{i=1}^N E_i \rho_i (1 - e^{-t/\rho_i}) ) \quad (7)$$

donde:

- R = tasa constante de deformación
- t = tiempo =  $\varepsilon / R$  en este caso de tasa de deformación constante
- 1/E<sub>R</sub> = módulo de referencia = 3.14627E-07kPa<sup>-1</sup> para t=0  
(obtenido de la Fig.3)

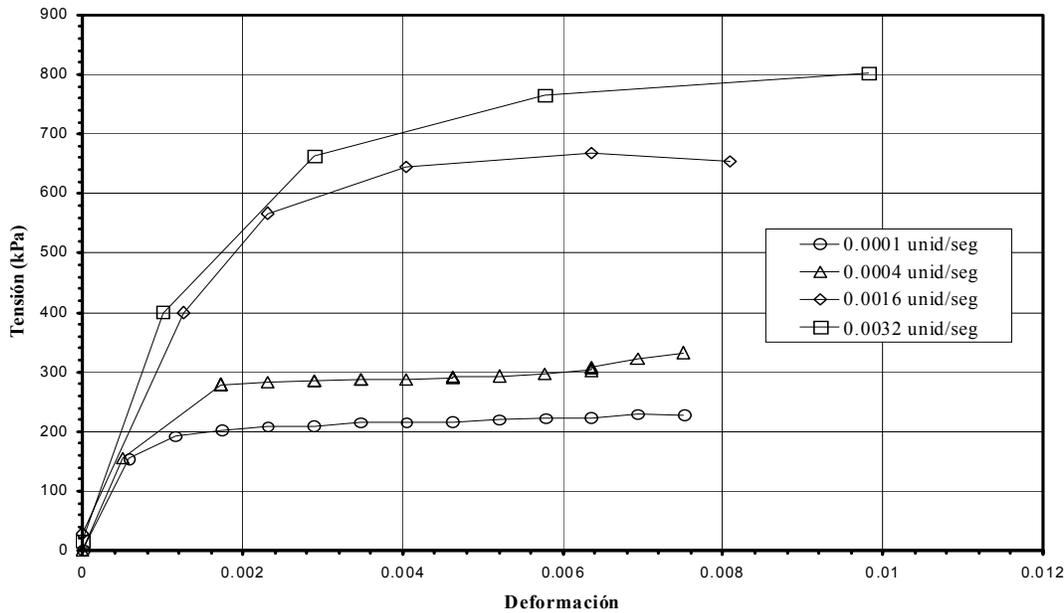


Figura 4. Ensayos a tasa constante de deformación: Curvas de Tensión-Deformación



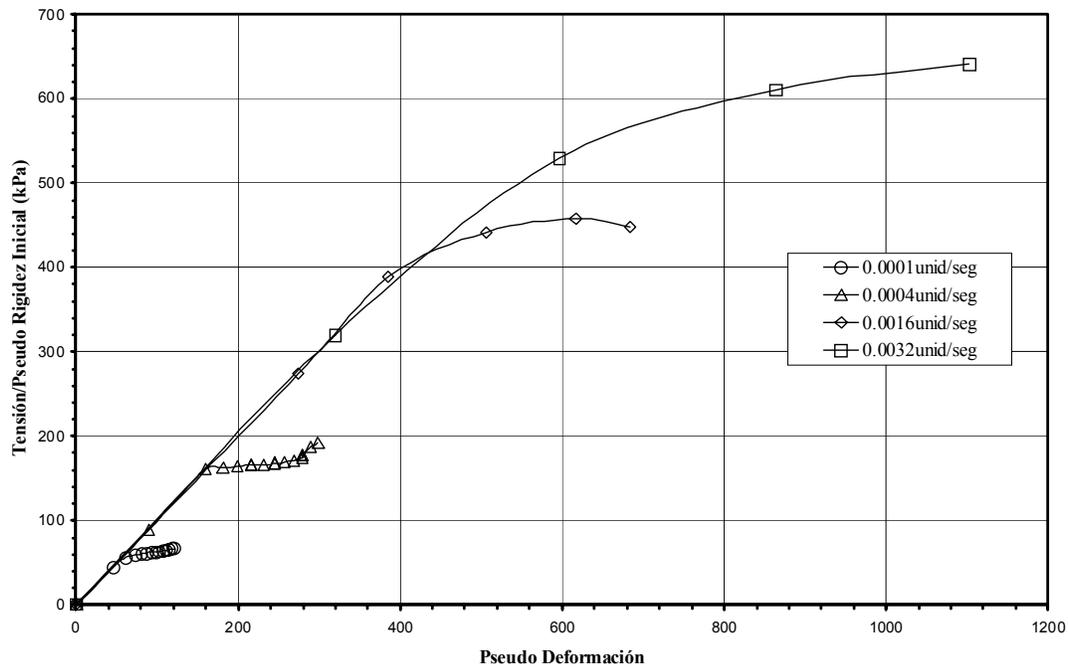


Figura 5. Tensión-Pseudo deformación a diferentes tasas de deformación:  $\sigma/I$  versus  $\epsilon^R$



## 5. MODELO UNIAXIAL VISCOELASTICO CON EVOLUCION DEL DAÑO

A continuación se detalla el modelo constitutivo que describe el comportamiento uniaxial de las tensiones-deformaciones en el concreto asfáltico.

Primero, se define una función que representa la densidad de la energía de la pseudo deformación:

$$W^R = \frac{1}{2} C(S) (\varepsilon^R)^2 \quad (8)$$

donde el coeficiente  $C$  es una función del parámetro de daño  $S$ .

Entonces:

$$\sigma \equiv \frac{\partial W^R}{\partial \varepsilon^R} = C(S) \varepsilon^R \quad (9)$$

La ley que describe la evolución del daño en la muestra está dada por:

$$\dot{S} = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial S}\right) \alpha \quad (10)$$

Las Fórmulas 8 a 10 constituyen el modelo que describe el comportamiento de un sólido viscoelástico con evolución del daño dependiente del tiempo. La Fórmula 9 es consistente con lo observado en la Figura 5. Es decir, la tensión es linealmente proporcional a la pseudo deformación a niveles bajos de deformación cuando no hay daño inducido en la muestra, situación que corresponde a un valor constante de la función  $C$  en la Fórmula 9 y que resulta en una relación lineal entre  $\sigma$  y  $\varepsilon^R$ . Cuando el nivel de pseudo deformaciones se incrementa, cada curva se desvía de la relación lineal indicando una reducción de  $C$ , es decir  $dC/dS \leq 0$ .

Resulta interesante observar que cada una de las curvas en la Figura 5 se desvía a una tasa diferente para un determinado nivel de pseudo deformación sugiriendo que la evolución del daño es no solamente dependiente de la tasa a través de  $\varepsilon^R$ , sino que presenta una dependencia adicional.

Las curvas de baja tasa de deformación se desvían a bajos valores de pseudo deformación, indicando que más daño ocurre cuanto mayor es la duración de la carga para la misma pseudo deformación. Este comportamiento es consistente con la Fórmula 10, la cual representa los efectos de las tasas de deformación a través de  $\varepsilon^R$  en  $W^R$  y los efectos del tiempo a través de la derivada de  $S$  respecto del mismo.

En conclusión, los únicos parámetros relacionados con el daño en la muestra que es necesario determinar para desarrollar un modelo uniaxial viscoelástico con evolución del daño son las funciones  $C(S)$  y la constante  $\alpha$ .

### 5.1 Función $C(S)$ y la constante $\alpha$

Para determinar la función  $C$ , la Fórmula 9 se ajustó a la curva experimental de tensión-pseudo deformación para  $R = 0.0001$  unidades/seg. Este proceso da como resultado una función  $C$  que depende de  $\varepsilon^R$  y de la tasa de deformación, pero no de  $S$  directamente. Para encontrar esta dependencia es necesario determinar una relación entre  $S$ ,  $\varepsilon^R$  y la tasa de deformación (o tiempo). Esta relación requiere el uso de la ley de la evolución del daño, Fórmula 10. Sin embargo, esta ecuación necesita el conocimiento a priori de la expresión de  $C(S)$  antes de que la ecuación pueda ser resuelta para  $S$ , lo cual requiere un proceso de iteración extensivo y poco práctico. Por este motivo, un procedimiento aproximado desarrollado por el mismo Schapery (1990) fue utilizado en el presente trabajo.

Finalmente, una expresión para la función  $C(S)$  fue obtenida, la cual se presenta en la Fórmula 11. Además, se determinó que con  $\alpha = 2.35$  el modelo predice las observaciones experimentales de una forma más precisa.

$$C = 958879 \times S^{-0.4044} \quad (11)$$

### 5.2 Predicción de la respuesta mecánica y la evolución del daño

Habiendo encontrado los parámetros constitutivos utilizados en el modelo, es posible ahora predecir las tensiones para una historia de deformaciones dada. Primero, la pseudo deformación  $\varepsilon^R$  es calculada de acuerdo a la Fórmula 7 para cargas a tracción con tasas de deformación constante.



Considerando  $\Delta S = \dot{S} \Delta t$  a lo largo del tiempo con la condición inicial de  $S=0$  para  $t=0$ , el parámetro de daño  $S$  fue obtenido de las Fórmulas 10 y 8 a través de la suma de los incrementos de  $S$ . Finalmente la función fue predecida usando la Fórmula 9. La Figura 6 representa la predicción de las tensiones basada en la historia de deformaciones para una tasa de deformación constante de 0.0001 unidades/seg.

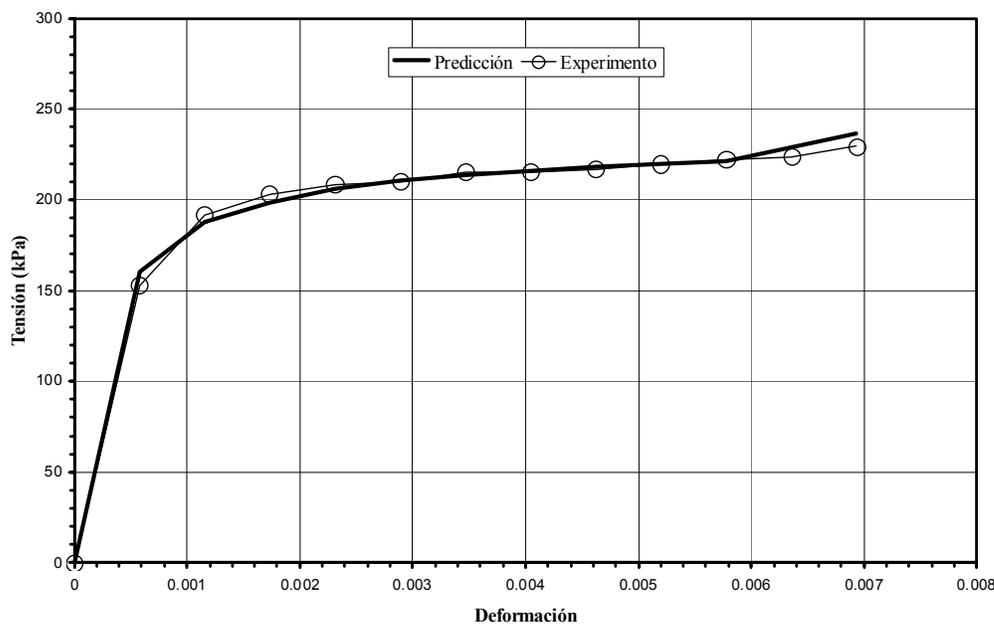
En general, la predicción está de acuerdo con los datos experimentales, lo que demuestra la validez del modelo usado (en términos de  $S$ ) para la tasa de deformación constante utilizada de 0.0001 unidades/seg.

En conclusión, se demostró que el modelo constitutivo con evolución del daño provee una caracterización satisfactoria del comportamiento mecánico del concreto asfáltico bajo cargas uniaxiales y con tasa de deformación constante.

El próximo paso fue usar el modelo teórico para la predicción de la resistencia a la fatiga, es decir el número de ciclos a la rotura por fatiga,  $N_f$ . Este aspecto de la investigación se detalla en la siguiente sección.

## 6. CURVAS DE PREDICCIÓN DE LA FATIGA

Tres curvas diferentes fueron desarrolladas en esta sección. Primero, una curva de laboratorio fue determinada basada en una serie de ensayos de fatiga con cargas en los tercios medios de la muestra, llevados a cabo en los laboratorios del CSIR Transportek. Luego se determinó una curva basada en el Método de Diseño Mecánico el cual relaciona la deformación inicial en la parte inferior de una capa asfáltica con el número de ciclos a la rotura por fatiga. Por último, una tercera curva fue derivada basada en el modelo constitutivo utilizado en este trabajo.



**Figura 6. Predicción de la Tensión–Ensayos de laboratorio versus modelo constitutivo (R=0.0001 unidades/seg.)**

La derivación de la curva de laboratorio, la que se representa en la Figura 7, fue basada en los ensayos realizados en vigas rectangulares de concreto asfáltico sometidas a cargas en los tercios medios, así como la determinación del punto a la rotura por fatiga como el número de repeticiones de la carga que produce un 50% de reducción en el valor inicial del módulo de rigidez. Esta curva de laboratorio fue derivada usando dos ensayos diferentes, los cuales se describen en la Tabla 4. Dichos ensayos fueron realizados con valores de deflexión controlados los que corresponden a diferentes valores de deformación. La resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas es expresada generalmente como una relación entre tensión o deformación inicial y el número de repeticiones de la carga que produce la rotura por fatiga. En este caso, la curva de fatiga fue desarrollada teniendo en cuenta la deformación inicial versus el número de aplicaciones de la carga.



Para comparar la metodología convencional basada en el Método de Diseño Mecánico con el modelo teórico usado en este trabajo, una curva de fatiga para mezclas asfálticas densamente graduadas es también representada en la Figura 7.

Por otro lado, la curva de predicción de fatiga basada en el modelo constitutivo fue desarrollada efectuando dos ensayos con carga cíclica a deformación constante cuyas características se describen en la Tabla 5.

En ambos ensayos, las pseudos deformaciones fueron calculadas usando la Fórmula 7. Para predecir la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica usando la ecuación constitutiva se necesita un criterio de rotura. Un criterio de rotura tradicional es la reducción del 50% del módulo de rigidez inicial, como en el caso de la curva de laboratorio basada en los ensayos con cargas en los tercios medios. Sin embargo en este caso, un 50% de reducción en el módulo inicial de pseudo rigidez fue utilizado como criterio de rotura. La pseudo rigidez fue calculada dividiendo las tensiones medidas durante los ensayos por las pseudo deformaciones, obtenidas de la Fórmula 7.

Los primeros 400 y 200 ciclos, respectivamente para 0.0007 y 0.0014 de amplitud de deformación, fueron descartados para permitir que las condiciones iniciales del ensayo alcancen equilibrio. El número de ciclos a rotura por fatiga para el 50% de reducción en el módulo de pseudo rigidez fue calculado y la curva de predicción derivada, la cual se representa en la Figura 7.

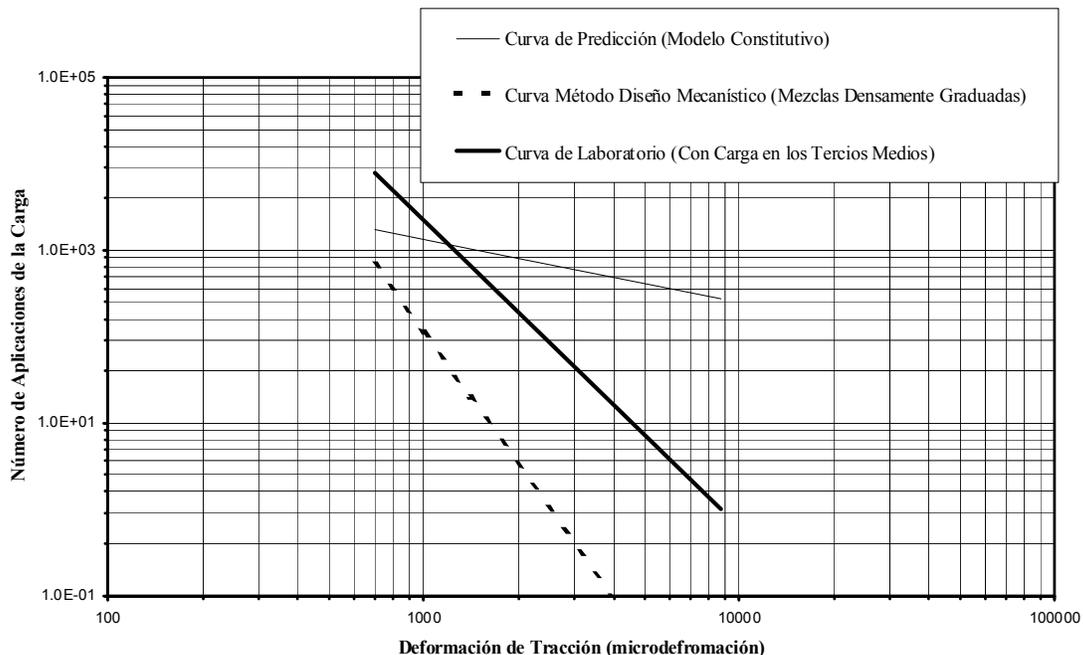
Las expresiones que representan a las curvas de la Figura 7 se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 4. Ensayos de fatiga con cargas en los tercios medios**

Muestra (No.)	Temp. (°C)	Frec. (Hz)	Nivel de Def. ( $\mu\epsilon$ )	E inicial (MPa)	E rotura (MPa)	Fatiga (Repet.)
1	5	10	534	9479	4739.5	19998
2	5	10	349	10472	5236	89998

**Tabla 5. Ensayos de cargas cíclicas a deformación constante**

Amplitud de Deformación	Modo	No. de Ciclos	Forma de la Onda	Indice de Carga
0.0007	Tracción Uniaxial	Hasta la Rotura	Medio Seno Verso	1.0 seg/ciclo
0.0014	Tracción Uniaxial	Hasta la Rotura	Medio Seno Verso	1.0 seg/ciclo



**Figura 7. Curvas de predicción de fatiga-número de aplicaciones de la carga versus deformación a tracción**



**Tabla 6. Ecuaciones para las curvas de predicción de fatiga**

Descripción	Ecuación	Temperatura (°C)
Curva de Predicción (Modelo Constitutivo)	$N_f = 10^{3.60(1 - \frac{\text{Log } \varepsilon}{6.20})}$	25
Curva Método Diseño Mecánico (Mezclas Densamente Graduadas)	$N_f = 10^{17.40(1 - \frac{\text{Log } \varepsilon}{3.40})}$	20
Curva de Laboratorio (Carga en los Tercios Medios)	$N_f = 10^{4.64(1 - \frac{\text{Log } \varepsilon}{37.69})}$	5

Como era de esperar, las tres curvas de fatiga representadas en la Figura 7 muestran una disminución en el número de aplicaciones de la carga al incrementarse la magnitud de la deformación de tracción. Esta disminución es particularmente rápida en la curva del Método de Diseño Mecánico.

Debe tenerse en cuenta que esta curva fue desarrollada considerando una *función de transferencia* que relaciona el número de aplicaciones de la carga hasta el punto de iniciación de la fisura en la parte inferior de la capa asfáltica.

En el caso de la curva de laboratorio, el ensayo fue realizado a *deformación controlada*. La deflexión aplicada se mantiene constante hasta el punto de iniciación de la fisura y luego disminuye hasta la rotura de la muestra. Cuando las deflexiones son bajas, existe una diferencia substancial entre el número de aplicaciones de la carga hasta el punto de la fisura inicial y la rotura final de la muestra, lo que hace que la determinación del número exacto de repeticiones hasta el punto inicial de la fisura sea dificultoso.

Es por este motivo que es necesario introducir un criterio de rotura, el cual en este caso se definió como el 50% de reducción en el valor del módulo de rigidez inicial. Sin embargo,  $N_f$  representa el número de repeticiones de la carga a la rotura por fatiga en el laboratorio y por lo tanto una pequeña cantidad de propagación de la fisura está incluida en la curva de fatiga.

La curva del modelo constitutivo presenta una pendiente menor comparada con las otras dos curvas, es decir menos sensible a los incrementos de los valores de deformación de tracción. Dentro del rango de las deformaciones analizadas, la curva del modelo constitutivo es la que presenta mayores valores del número de repeticiones de la carga hasta la rotura de la muestra.

## 7. CONCLUSIONES

Un modelo constitutivo fue presentado en el presente reporte para evaluar la resistencia a la fatiga de los concretos asfálticos. Primeramente se verificó el principio de correspondencia desarrollado por Schapery (1984). Este principio se basa en el cálculo de las pseudo deformaciones, para lo cual se requiere la expresión del módulo de relajamiento en función del tiempo. A su vez, el módulo de relajamiento se predijo a través del ensayo de deformación de fluencia. La curva maestra de deformación de fluencia fue desarrollada usando la serie de Prony y luego, utilizando la teoría de viscoelasticidad, la curva maestra del módulo de relajamiento fue también obtenida. Asimismo se comprobó que el principio de correspondencia elimina la dependencia del material con respecto a la diferentes tasas de deformación aplicadas.

Seguidamente se demostró que el modelo constitutivo con evolución del daño en la muestra provee una buena caracterización del comportamiento mecánico del concreto asfáltico bajo cargas uniaxiales. Las pseudo variables utilizadas simplificaron el proceso de evaluación del comportamiento viscoelástico de las mezclas asfálticas, así como la evolución del daño en las mismas.

Por último, una curva de predicción de la resistencia a la fatiga para mezclas asfálticas densamente graduadas fue desarrollada. Esta curva de predicción fue comparada con otras curvas convencionales; por un lado, la obtenida en el laboratorio con cargas en los tercios medios de la muestra, y por otro lado la desarrollada con el Método de Diseño Mecánico. Dentro del rango de las deformaciones analizadas, la curva del modelo constitutivo es la que presenta mayores valores del número de repeticiones de la carga hasta la rotura de la muestra, indicando una mayor resistencia a la fatiga.

Debe recordarse que el modelo propuesto en esta comunicación ha sido verificado para cargas con tasa de deformación constante y para mezclas asfálticas densamente graduadas. Es necesario, por lo tanto, extender el modelo a otro tipo de condiciones de carga así como a otros tipos de mezclas asfálticas.

Con respecto a la curva constitutiva, debe tenerse en cuenta que su aplicación es limitada al rango de amplitud de deformación utilizado para derivar la curva. Esta curva debe ser considerada como un primer intento para obtener una caracterización más precisa del comportamiento de los concretos asfálticos con respecto a la resistencia a la fatiga.



Consecuentemente, un programa de ensayos más extenso es necesario para evaluar la respuesta de los concretos asfálticos dentro de un rango más amplio de deformaciones de tracción. Asimismo, la extrapolación entre cargas con tasas de deformación constante y cargas cíclicas de deformación constante utilizadas en la presente comunicación para derivar la ecuación constitutiva debe ser investigada con más detalle.

## 8. REFERENCIAS

FERRY, J. D. 1980. Viscoelastic Properties of Polymers. University of Wisconsin, USA.

GALE, N. E. 2000. Fatigue Characterisation of Asphalt Concrete using Viscoelasticity and Damage Theory. MEng University of Pretoria, South Africa.

KIM, Y.R., LEE, Y. & LEE, H.J. 1995. Correspondence Principle for Characterization of Asphalt Concrete. J. Materials in Civil Eng., ASCE, 7 (1).

PARK, S.W. & KIM, Y.R. 2001. Fitting Prony-Series Viscoelastic Models with Power-Law Pre-Smoothing. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 13, No. 1.

PARK, S.W., KIM, Y.R. & SCHAPERLY, R.A. 1996. A Viscoelastic Continuum Damage Model and its Application to Uniaxial Behaviour of Asphalt Concrete. Civil Engineering Department, North Carolina State University, USA.

SCHAPERLY, R.A. 1984. Correspondence Principles and a Generalized Integral for Large Deformation and Fracture Analysis of Viscoelastic Media. Civil Engineering Department, Texas A&M University, USA.

SCHAPERLY, R.A. 1990. A Theory of Mechanical Behaviour of Elastic Media with Growing Damage and Other Changes in Structure. J. Mech. Phys. Solids.

**Nelson E. Galé**  
*Ingeniero Asociado*  
*Jeffares and Green (Pty) Ltd.*  
*Yohannesburg. Sudáfrica*

*Associated Engineer*  
*Jeffares and Green (Pty)*  
*Yohannesburg, South Africa*  
[gale@lantic.net](mailto:gale@lantic.net)

**Alex T. Visser**  
*Departamento de Ingeniería Civil*  
*University of Pretoria*  
*Petroria, Sudáfrica*

*Department of Civil Engineering*  
*University of Pretoria*  
*Petroria, South Africa*  
[avisser@postino.up.ac.za](mailto:avisser@postino.up.ac.za)

