

# **EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE DISEÑO DE SOBRECAPAS ASFÁLTICAS CONTRA REFLEJO DE GRIETAS**

Luis Loria, MsC, autor correspondiente  
Centro Superpave para el Oeste de Estados Unidos  
Universidad de Nevada Reno/ MS257  
lorial@unr.nevada.edu

Elie Y. Hajj, PhD  
Centro Superpave para el Oeste de Estados Unidos  
Universidad de Nevada Reno/ MS257  
elieh@unr.edu

Alejandro Navas, MsC  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME)  
Universidad de Costa Rica  
anavas@lanamme.ucr.ac.cr

Peter E. Sebaaly, PhD, P.E.  
Centro Superpave para el Oeste de Estados Unidos  
Universidad de Nevada Reno/ MS257  
psebaaly@unr.edu

## **Resumen**

La presente investigación está dirigida a identificar el mejor modelo analítico para predecir la resistencia de sobrecapas de mezcla asfáltica anti-reflejo de grietas así como predecir su desempeño a largo plazo. Varios modelos fueron identificados y de entre ellos, tres fueron elegidos para ser comparados en esta investigación: 1) El Modelo Simplificado de Diseño de Sobrecapas Asfálticas del Instituto Politécnico de Virginia; 2) El Modelo de Diseño de Sobrecapas de la Asociación de Pavimentos de Caucho; y, el 3) Nuevo Modelo Empírico-Mecanístico para Reflejo de Grietas. Los modelos identificados fueron evaluados para determinar su habilidad para predecir el desempeño de sobrecapas asfálticas sujetas a reflejo de grietas. Adicionalmente, un diseño de sobrecapa asfáltica fue realizado para tres mezclas que fueron manufacturadas usando diferentes granulometrías para agregado de la fuente llamada Sloan del sur de Nevada y un asfalto del tipo PG76-22 modificado con polímero. El tránsito de diseño de la sobrecapa fue de 7 millones de ejes equivalentes para un período de diseño de 20 años. Finalmente, una comparación fue realizada entre los espesores de sobrecapa obtenidos por cada método, las propiedades de los materiales utilizados en el diseño y el tráfico de diseño. Para efectos de diseño, se determinó que el mejor método disponible es de la Asociación de Pavimentos de Caucho, pues permite utilizar propiedades mecánicas de los materiales y los resultados son más consistentes con el desempeño esperado los materiales usados.

## **INTRODUCCIÓN**

Uno de los más importantes deterioros que afectan la vida de una sobrecapa asfáltica es el reflejo de grietas (Elsefi et al, 2003). Cuando los pavimentos asfálticos son colocados sobre pavimentos de concreto con juntas o en capas asfálticas severamente agrietadas, las grietas

subyacentes se reflejarán en la nueva capa en un tiempo relativamente corto. Este fenómeno consiste en un movimiento de separación alrededor de la zona agrietada debido a las cargas del tránsito y a la temperatura. Por lo tanto, el desempeño a largo plazo de las sobrecapas asfálticas dependerá en gran medida de su habilidad para resistir el reflejo de grietas. Las grietas reflejadas contribuyen en el flujo de agua a través del pavimento y a debilitar la capa de mezcla asfáltica así como las capas inferiores del pavimento, lo cual disminuye de forma muy importante la vida del pavimento. La humedad excesiva en el pavimento puede causar desnudamiento de la mezcla asfáltica y reducción de la resistencia de las capas de base y subrasante mientras que el agrietamiento produce la falla estructural del pavimento (Sousa et al, 2001, Guía Empírico-Mecanística, 2004).

Varios métodos han sido desarrollados para determinar el espesor de sobrecapa asfáltica requerido para resistir el efecto combinado de carga de tráfico, condiciones ambientales, técnica de rehabilitación y el reflejo de grietas del pavimento.

En 1996, una investigación desarrollada por Molenaar and Nods (Koerner, 2005, Molenaar y Nods, 1996 ) sugirió el uso de la Ley de Paris (Paris y Erdogan, 1963) para calcular la tasa de propagación de una grieta a través de una sobrecapa asfáltica. Dicha ley se muestra en la ecuación 1.

$$\frac{dC}{dN} = AK^n \quad (1)$$

En la ecuación 1,

$\frac{dC}{dN}$  = Tasa de propagación de la grieta por número de cargas de tráfico;

$K$  = Factor de intensidad de esfuerzo; and

$A, n$  = constants experimentales.

Varios valores de las constantes  $A$  y  $n$  han sido sugeridos dependiendo del tipo de pavimento. En general se asume un valor de  $A$  de 4.3 y de  $n$  de  $0.3 \text{ N/cm}^{0.5}$ .

La presente investigación está dirigida a identificar el mejor modelo analítico para predecir la resistencia de sobrecapas de mezcla asfáltica anti-reflejo de grietas así como predecir su desempeño a largo plazo. Varios modelos fueron identificados y de entre ellos, tres fueron elegidos para ser comparados en esta investigación:

- 1) El Modelo Simplificado de Diseño de Sobrecapas Asfálticas del Instituto Politécnico de Virginia (Elsefi y Al-Qadi, 2003);
- 2) El Modelo de Diseño de Sobrecapas de la Asociación de Pavimentos de Caucho (Sousa et al, 2001); y,

El Nuevo Modelo Empírico-Mecanístico para Reflejo de Grietas (Guía de Diseño Empírico-Mecanística, 2004).

El Modelo Simplificado de Diseño de Sobrecapas Asfálticas del Instituto Politécnico de Virginia consiste de un modelo de regresión simple que predice el número de ejes equivalentes simples de 80 kN que producen un reflejo de grietas en la superficie de una sobrecapa asfáltica como función del espesor y el módulo de resiliencia de la sobrecapa de mezcla asfáltica; del espesor y el módulo de resiliencia de la capa existente de mezcla

asfáltica; del espesor y módulo de resiliencia de la base granular; y, del módulo de resiliencia de la subrasante (Elsefi y Al-Qadi, 2003).

El Modelo de Diseño de Sobrecapas de la Asociación de Pavimentos de Caucho consiste de ecuaciones desarrolladas con base en propiedades mecánicas y análisis estadístico de sobrecapas asfálticas colocadas encima de pavimentos agrietados (Sousa et al, 2001).

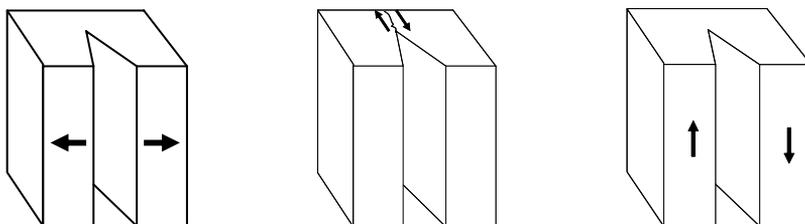
El nuevo Modelo Empírico-Mecanístico para Reflejo de Grietas desarrollado como parte de la nueva Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanística de los Estados Unidos consiste en ecuaciones generadas a partir de observaciones empíricas de datos de campo (Guía de Diseño Empírico-Mecanística, 2004).

Los modelos identificados fueron evaluados para determinar su habilidad para predecir el desempeño de sobrecapas asfálticas sujetas a reflejo de grietas. Adicionalmente, un diseño de sobrecapa asfáltica fue realizado para tres mezclas asfálticas que fueron manufacturadas usando diferentes granulometrías para agregado de la fuente llamada Sloan del sur de Nevada y un asfalto del tipo PG76-22 modificado con polímero. El tránsito de diseño de la sobrecapa fue de 7 millones de ejes equivalentes para un período de diseño de 20 años. Finalmente, una comparación fue realizada entre los espesores de sobrecapa obtenidos por cada método, las propiedades de los materiales utilizados en el diseño y el tráfico de diseño.

## FUNDAMENTOS DEL FENOMENO DE REFLEJO DE GRIETAS

En 1996, Jacobs et al (Jacobs et al, 1996) evaluaron la aplicación de los principios de la mecánica de la fractura al fenómeno de fracturamiento discontinuo de sobrecapas asfálticas mediante la comparación de modelos de elemento finito (crecimiento de agrietamiento continuo) con el fenómeno real que ocurre en mezclas asfálticas (crecimiento de agrietamiento discontinuo). La investigación sugirió el uso de la teoría de la mecánica de la fractura como un modelo adecuado para ser utilizado para explicar el fenómeno de reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas. Mediante la aplicación de esta teoría, se determinó que un pavimento puede ser cargado en alguno de los siguientes modos o en combinaciones de los mismos (Uzan, 1997):

- Modo I o modo de apertura, KI: Conocido como modo de deformación (Figura 1.a).
- Modo II o modo de deslizamiento, KII: Conocido como modo de esfuerzo cortante vertical (Figura 1.b). Este modo es similar al efecto de las cargas de tránsito en el pavimento.
- Modo III o modo de rasgado, KIII: Conocido como esfuerzo cortante horizontal. (Figura 1.c). Este modo es insignificante en pavimentos asfálticos.



(a) Modo de Apertura (b) Modo de Deslizamiento (c) Modo de Rasgado

**Figura 1: Modos de fractura de acuerdo con la teoría de mecánica de la fractura**

En general, el agrietamiento de una sobrecapa asfáltica ocurre en dos etapas: 1) La fase de inicio del agrietamiento. Este fenómeno puede ser caracterizado por una ecuación de fatiga convencional, como la que se muestra en la ecuación 2 y que consiste en la predicción del número de cargas de tránsito que pueden producir una falla evidente del pavimento; y 2) La fase de propagación del agrietamiento que puede ser modelado a través de la ecuación 1.

$$N = 4.856 \times 10^{-16} \varepsilon_{zx}^{-4.73} \quad (2)$$

En la ecuación 2,

$N$  = número de ciclos de carga para el agrietamiento, y

$\varepsilon_{zx}$  = deformaciones cortantes en el centro de la capa de mezcla asfáltica.

## REVISIÓN DE LOS MODELOS DE DISEÑO DE SOBRECAPAS ASFÁLTICAS ANTIREFLEJO DE GRIETAS

### Modelo Simplificado de Diseño de Sobrecapas Asfálticas del Instituto Politécnico de Virginia

En el año 2003, Elsefi y Al-Qadi (Elsefi y Al-Qadi, 2003) desarrollaron el modelo indicado utilizando los principios de la mecánica de la fractura lineal elástica para derivar una ecuación simple basada en modelación tridimensional de elemento finito para determinar el número de ciclos de carga que producen el agrietamiento de una mezcla asfáltica colocada sobre un pavimento agrietado. Para tal fin se basaron en la ley de Paris utilizando valores de la literatura para las constantes  $A$  y  $n$  y con base en estas, determinaron los factores de intensidad de esfuerzo en varias profundidades del pavimento. Los valores de las constantes se indican a continuación:

- Mezcla Asfáltica Tipo I:  $n = 3.40$  y  $A = 1.37 \times 10^{-6}$  (alto contenido de asfalto)
- Mezcla Asfáltica Tipo II:  $n = 3.85$  y  $A = 1.67 \times 10^{-6}$
- Mezcla Asfáltica Tipo II:  $n = 4.50$  y  $A = 2.33 \times 10^{-6}$  (alto contenido de vacíos)

El factor de intensidad de esfuerzos fue determinado usando la ecuación 3.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \times f(a) \quad (3)$$

En la ecuación 3,

$\sigma$  = esfuerzo de borde,

$a$  = longitud de la grieta, and

$f(a)$  = función que depende de la geometría del pavimento.

Finalmente, la ecuación 4 fue desarrollada para predecir el número de cargas de tráfico de 80 kN que produciría el agrietamiento de una sobrecapa dada de mezcla asfáltica.

$$\log W_{t80} = \frac{1}{10^4} (255H_{overlay} + 2.08E_{overlay} + 45.3H_{HMA} + 8.73E_{HMA} + 1.34H_{Base} + 6.93E_{Base} + 1.49E_{subgrade}) \quad (4)$$

En la ecuación 4,

$W_{t80}$  = Número total de cargas de 80-kN que producen el agrietamiento,

$H_{overlay}$  = Espesor de la sobrecapas asfáltica (mm),

$E_{overlay}$  = Módulo de resiliencia de la sobrecapas asfáltica (MPa),

$H_{HMA}$  = Espesor de la capa asfáltica existente (mm),

$E_{HMA}$  = Módulo de resiliencia de la capas asfáltica existente (MPa),

$H_{base}$  = Espesor de la capa de base (mm),

$E_{base}$  = Módulo de resiliencia de la capa de base (MPa), y

$E_{subgrade}$  = Módulo de resiliencia de la subrasante (MPa).

## Modelo de Diseño de Sobrecapas de la Asociación de Pavimentos de Caucho

En el año 1999, la Asociación de Pavimentos de Caucho desarrolló un método de diseño de sobrecapas asfálticas anti-reflejo de grietas para mezclas asfálticas modificadas con caucho (Sousa et al, 2001). El método se basó en análisis estadístico de datos de desempeño en sitio de sobrecapas asfálticas, modelación mecánica de esfuerzos con elemento finito tridimensional, y correlación de valores modelados con la medición del movimiento de grietas en sitio a través del deflectómetro de impacto. El factor clave de este método es la determinación del invariante de deformación de Von Mises en la fibra inferior de la sobrecapa asfáltica. Dicho valor de deformación es determinado a través de un sencillo macro de una hoja electrónica en la que hay que indicar algunas variables de entrada y como resultado brinda el espesor de sobrecapa para varios escenarios de tráfico vehicular. Los parámetros de diseño requeridos por la hoja electrónica son los siguientes:

1. Módulo de resiliencia y espesor de las capas de pavimento,
2. Determinación de temperaturas de pavimento representativas de la zona,
3. Determinación de un nivel de agrietamiento de diseño,
4. Temperatura máxima del pavimento,
5. Factor de ajuste por condición de subrasante y humedad,
6. Selección del módulo de resiliencia de la sobrecapa asfáltica,
7. Ley de fatiga del material de sobrecapa y
8. Determinación del número de ejes equivalentes de diseño de 80 kN

La ventaja que ofrece este método es que, aunque fue desarrollado para mezclas asfálticas modificadas con caucho, las propiedades de los materiales se pueden modificar de modo que si se tiene conocimiento del módulo de resiliencia y la ley de fatiga de un material diferente, dichos valores pueden incluirse en la hoja electrónica y se puede diseñar para este nuevo material.

## Nuevo Modelo Empírico-Mecánico para Reflejo de Grietas

La nueva Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecánica de los Estados Unidos incluyó un modelo empírico basado en observaciones de campo para determinar la vida útil de sobrecapas asfálticas anti-reflejo de grietas (Guía de Diseño Empírico-Mecánica, 2004). El modelo está basado en la ecuación 5.

$$RC = \frac{100}{1 + e^{a+bt}} \quad (5)$$

En la ecuación 5,

$RC$  = Porcentaje de grietas reflejadas,

$t$  = Tiempo en años,

$$a = 3.5 + 0.75 \times h_{ac}$$

$$b = -0.688584 - 3.37302 \times (h_{ac})^{-0.915469}, \text{ and}$$

$h_{ac}$  = Espesor de la sobrecapa asfáltica en años.

## EJEMPLO DE DISEÑO DE SOBRECAPA ASFALTICA USANDO LOS MODELOS DE ANALISIS ESTUDIADOS

Un diseño de sobrecapa asfáltica fue desarrollado para una estructura típica de pavimento usando los tres modelos estudiados. La estructura de pavimento consiste en 100 mm de capa de mezcla asfáltica existente con un módulo de resiliencia de 2500 MPa; una capa de base granular de 250 mm con un módulo de resiliencia de 320 MPa y una capa de subrasante con un módulo de resiliencia de 83 MPa. El tráfico de diseño a 20 años fue de 7 millones de ejes equivalentes simples de 80 KN, utilizando un factor camión de 0.912, un factor anual de crecimiento de 7%, un factor de distribución de dirección de 50% y un factor de carril de 90%.

El análisis se hizo para tres tipos de mezcla asfáltica, con tres granulometrías diferentes, asfalto tipo PG76-22 modificado con polímero y agregados de la fuente Sloan del sur de Nevada. Los tipos de mezcla utilizados fueron:

- Mezcla densa de Nevada del Tipo 2C (T2C)
- Mezcla de California para intersecciones (CT).
- Mezcla anti-deformación permanente de Nevada (NRM).

El diseño de las mezclas asfálticas se realizó con el método Hveem y los contenidos de asfalto óptimos fueron 4.2, 4.0 y 3.7 por peso de agregado para las mezclas T2C, CT y NRM

**Tabla 1: Propiedades de los materiales del pavimento**

Capas		Espesor (mm)	Módulo a 21°C (MPa)	Modelo de Fatiga*
Tipo de mezcla de sobrecapa	NDOT T2C	--#	1725	$N_f = 1.3740 \times 10^{-5} \times \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{4.4147} \left(\frac{1}{E_{T2C}}\right)^{2.0874}$
	CT	--#	7300	$N_f = 6.5815 \times 10^{-5} \times \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{4.3172} \left(\frac{1}{E_{CT}}\right)^{2.0898}$
	NRM	--#	9625	$N_f = 6.8745 \times 10^{-5} \times \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{4.2395} \left(\frac{1}{E_{NRM}}\right)^{2.1470}$
Mezcla asfáltica existente (agrietada)		100	2500	N.A.
Base granular		250	320	N.A.
Subrasante		--	83	N.A.

\* $N_f$  es el número de repeticiones para la falla,  $\epsilon$  es la deformación de flexión en micrones,

# Para ser diseñado de acuerdo con cada método estudiado

respectivamente. Todas las mezclas fueron tratadas con un 1.5% de cal. También se determinó el módulo dinámico,  $E^*$ , (AASHTO TP62, 2006) así como las leyes de fatiga para las tres mezclas asfálticas. Las curvas maestras para las tres mezclas fueron determinadas para la temperatura de 21°C utilizando el principio de superposición. La Tabla 1 muestra los valores de módulo de la mezcla asfáltica a una temperatura de 21°C y una frecuencia de 10 Hz así como las curvas de fatiga determinadas para cada una.

## Análisis del Ejemplo de Diseño

La Tabla 2 compara los espesores de sobrecapa determinados por los tres métodos de diseño estudiados. El modelo del Instituto Politécnico de Virginia (IPV) así como del de la Asociación de Pavimentos de Caucho (APC) generaron espesores de capa comparables, siendo el de IPV más conservador. En el caso del modelo de la Guía de Diseño Empírico-Mecanística, siempre se sobre-estimó el espesor de la sobrecapa.

Se debe resaltar que las propiedades de fatiga de las sobrecapas analizadas solo se pueden incorporar en el modelo de APC. Los resultados mostrados en la Tabla 2 indican que para el mismo tráfico de diseño (en ejes equivalentes simples) en el caso del modelo del IPV se requiere de un espesor de capa mayor para la mezcla T2C, seguida por la mezcla CT y finalmente la NRM. Caso contrario, para el modelo desarrollado por APC, se requiere un espesor de sobrecapa más delgado para la mezcla T2C, seguida por la CT y finalmente la NRM para obtener el mismo nivel de agrietamiento del pavimento. Por ejemplo, en el caso de 0% de reflejo de grietas, el espesor de sobrecapa requerido sería de 9.0, 22.3 y 38.1 cm para las mezclas tipo T2C, CT y NRM respectivamente. El mismo comportamiento ocurre para porcentajes de agrietamiento de 2%, 5% and 15%.

Este análisis muestra que una mezcla T2C requiere un espesor menor que la mezcla tipo CT y que la altamente rígida NRM. Esta tendencia puede ser explicada por el hecho de que la mezcla tipo NRM es diseñada para resistir deformación permanente y por lo tanto, su rigidez es mucho más alta que de las otras dos mezclas. Debido a esta altísima rigidez, la mezcla NRM podría estar cerca de su límite de fragilidad y por ende, su resistencia al reflejo de grietas disminuye. Caso contrario, la mezcla tipo T2C es mucho más flexible y por lo tanto, tiende a ser más resistente al reflejo de grietas. En el caso del modelo empírico propuesto por AASHTO, el espesor de sobrecapa encontrado siempre fue de 30 cm, independientemente del tipo de mezcla analizado.

**Tabla 2: Espesores de sobrecapas requeridos para un periodo de diseño de 20 años**

Tipo de Mezcla asfáltica de sobrecapa	Espesor de Sobrecapa, (cm)					
	IPV	APC				Guía de Diseño Empírico-Mecanística (100% de reflejo de grietas)
		Porcentaje de Agrietamiento				
		0%	2%	5%	15%	
NDOT T2C	11.3	9.0	6.0	5.0	1.9	30.0
CT	10.0	22.3	10.0	7.5	2.5	30.0
NRM	8.1	38.1	31.3	23.1	8.1	30.0

En síntesis, cuando solo la rigidez de la mezcla para sobrecapa es tomado en cuenta en el análisis (por ejemplo, el método del IPV), un espesor de sobrecapa más delgado fue determinado para mezclas más rígidas, mientras que cuando se tomaron en cuenta tanto la rigidez de la mezcla como su comportamiento a fatiga, (por ejemplo, el método del IPC), el espesor de sobrecapa requerido dependió de la interacción de dichas propiedades del material.

## CONCLUSIONES

Tres métodos de diseño de sobrecapas asfálticas anti-reflejo de grietas fueron estudiados. Los métodos fueron estudiados en detalle y tres mezclas asfálticas fueron diseñadas para realizar una comparación entre dichos modelos. Las siguientes son las conclusiones más importantes de este trabajo.

- *Modelo Simplificado de Diseño de Sobrecapas Asfálticas del Instituto Politécnico de Virginia:* Para este modelo el factor más importante es el espesor de la sobrecapa asfáltica, seguido por el espesor de la capa asfáltica existente. Adicionalmente, los espesores y propiedades de las capas de base y subrasante no parecen tener efectos significativos en la resistencia al reflejo de grietas del pavimento.
- *Modelo de Diseño de Sobrecapas de la Asociación de Pavimentos de Caucho:* Actualmente este modelo ha sido calibrado solo para mezclas asfálticas modificadas con polímero. Sin embargo, este modelo brinda la posibilidad de determinar el valor de módulo apropiado de la curva maestra de módulo dinámico así como de introducir la ley de fatiga para el material de sobrecapa. Adicionalmente, los factores de ajuste que son requeridos pueden determinarse para las condiciones de otros proyectos.
- *Nuevo Modelo Empírico-Mecánico para Reflejo de Grietas.* Este modelo arrojó siempre un espesor de sobrecapa constante para cualquier condición de pavimento, para el tráfico estudiado para un periodo de diseño de 20 años. Este modelo no emplea ninguna propiedad del material de sobrecapa ni del pavimento existente basándose solo en una relación empírica.

Por lo anterior, se determinó que el modelo desarrollado por la APC es el que mejor considera las propiedades de la mezcla asfáltica de sobrecapa, las propiedades de los materiales subyacentes, el tráfico, distintas condiciones de agrietamiento y factores propios de la zona en donde se va a colocar el proyecto. Además, dado que se requiere de una aceptable caracterización de materiales y de tener un fundamento mecánico, los resultados que determina se ajustan al comportamiento esperado de los materiales. Por ejemplo, se espera que una mezcla más flexible como la T2C, requiera un espesor menor de sobrecapa cuando se compara con las otras dos mezclas, analizadas bajo las mismas condiciones.

## REFERENCIAS

- Elseifi, M., y Al-Qadi, I. (2003). Un Modelo Simplificado Anti-Reflejo de Grietas. Documento No. 03-3285 presentado en el TRB 82, Washington, D.C.
- Guía de Diseño Empírico-Mecánica, Estados Unidos. (2004). Federal Highway Administration. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Transportation Research Board, National Research Council. Reporte NCHRP 1-37A.
- Jacobs, M. M., Hopman, P. C., y Molenaar, A. A. A. (1996). Aplicación de los Principios de la Mecánica de la Fractura a Pavimentos Asfálticos. En Proceedings of the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, Vol. 65, Baltimore, MD, pp. 1-39.
- Koerner, R. (2005). Designing with Geosynthetics. Fifth Edition. Prentice Hall.
- Molenaar A., y Nods, M. (1996). Diseño de Sobrecapas Asfálticas para Pavimentos con Geogrillas. En Reflective Cracking in Pavements: Design and Performance of Overlay Systems, Proceedings of the Third International RILEM Conference, Maastricht, The Netherlands. 2-4 October, 1996. pp. 311-320.

Paris, P. C., y Erdogan, F. A. (1963). Análisis Crítico de las Leyes de Propagación de Agrietamiento. En Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Series D, No. 3.

Sousa, J., Pais, J., Saim, R., Way, G., y Stubstad, R.(2001). Desarrollo de un Modelo de Diseño de Sobrecapa Mecanístico basados en los Principio de Reflejo de Grietas. Reporte Final para la Asociación de Asfaltos Modificados con Caucho, Estudio Realizado por Consulpav Internacional.

Uzan, J (1997). Evaluación del Reflejo de Grietas, En Transportation Research Record 1570, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 89-95.