



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; CASTRO-FRESNO, D.; DEL COZ, J.J.; GARCÍA, P.J.

Simulación numérica de una mezcla asfáltica usando MEF y diseño de experimentos

Revista de la Construcción, vol. 10, núm. 2, abril, 2011, pp. 4-15

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127622720002>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Numerical simulation asphalt
mixture by FEM and design
of experiment*

Simulación numérica de una mezcla asfáltica usando MEF y diseño de experimentos



Autores

- NORAMBUENA-CONTRERAS, J.** Grupo de Investigación GITECO, ETSICCP, Universidad de Cantabria, 39005 Santander, España.
- CASTRO-FRESNO, D.** Grupo de Investigación GITECO, ETSICCP, Universidad de Cantabria, 39005 Santander, España.
- DEL COZ, J.J.** Departamento de Construcción, Universidad de Oviedo, 33204 Gijón, España.
- GARCÍA, P.J.** Departamento de Matemáticas, Universidad de Oviedo, 33007 Oviedo, España.

Fecha de recepción 25/3/2011

Fecha de aceptación 22/6/2011

Resumen

Este trabajo presenta la simulación numérica mediante el método de elementos finitos (MEF) de un ensayo dinámico desarrollado para estudiar la reflexión de grietas en muestras de mezcla asfáltica. Su desarrollo permitió comprobar el valor de los estados tensionales generados en una probeta de mezcla asfáltica densa, sometida a una carga de compresión dinámica. Así también,

se presenta una metodología en base al diseño de experimentos (DoE), para conocer la influencia de los parámetros constitutivos del material sobre el comportamiento estructural del material simulado. Finalmente, los resultados de la simulación y el diseño de experimentos mostraron resultados comparables frente al ensayo experimental descrito en este trabajo.

Palabras clave: método de elementos finitos, mezcla asfáltica, diseño de experimentos.

Abstract

This paper presents the numerical simulation using finite element method (FEM) of a dynamic test developed to study the reflection of cracks in asphalt mixture samples. Its development, permitted the value of the stress states generated in a dense asphalt mixture specimen, subjected to dynamic compression load. Also, a methodology

based on the design of experiments (DoE) to determine the influence of the constitutive parameters of material on the structural behaviour of the simulated material, is presented. Finally, the results of the simulation and design of experiments showed comparable results compared with experimental test described in this paper.

Key words: finite element method, asphalt mixture, design of experiments.

1. Introducción

Las mezclas asfálticas corresponden a uno de los materiales mayormente utilizados en pavimentos de carreteras. No obstante, producto de las cargas del tráfico y las condiciones ambientales, estas se agrietan debiendo ser reparadas por las administraciones de carreteras de cada país. Ahora, con el fin de concederles una mayor resistencia en su diseño, es fundamental conocer su resistencia al agrietamiento en condiciones reales. Sin embargo, simular las variables del tráfico y las diversas condiciones ambientales que imperan durante su vida de servicio, resulta muy difícil y costoso (Molenaer, 1993). Por lo anterior, el Grupo de Caminos Santander (GCS) de la Universidad de Cantabria ha desarrollado un ensayo dinámico para la evaluación de muestras de mezcla asfáltica, logrando simular en condiciones experimentales la reflexión de grietas hacia la superficie (Zamora-Barraza *et al.*, 2010).

El ensayo propuesto evalúa las tensiones y deformaciones de una mezcla asfáltica, en función de la carga a la cual se ve expuesta. Su desarrollo simplificado consiste en aplicar a una probeta bicapa, con una grieta inducida en su capa inferior, una carga axial de forma senoidal con frecuencia y amplitud conocidas hasta completarse la propagación de la grieta en la capa superior. No obstante, uno de los principales inconvenientes de este procedimiento es que se requieren largos tiempos de ensayo (Norambuena-Contreras *et al.*, 2008). Por esto, la simulación numérica por elementos finitos, sirve como ayuda complementaria al diseño y modelación de ensayos físicos, pudiéndose obtener resultados comparables con los ensayos reales (Castro-Fresno *et al.*, 2009). De esta forma, esta aplicación numérica basa su análisis en la utilización de métodos de integración explícita en el dominio del tiempo, pudiendo extenderse a innumerables aplicaciones en otros tipos de análisis, como la simulación de problemas de impacto, de conformado mecánico, de fractura y/o fragmentación, de contacto, de grandes deformaciones y/o grandes desplazamientos, no linealidades en el comportamiento del material, etc.

Por ello, en este trabajo se plantea como objetivo la simulación numérica simplificada del ensayo dinámico propuesto usando el método de elementos finitos (MEF) y el diseño de experimentos (DoE), permitiendo evaluar los estados de tensión generados en una probeta de mezcla asfáltica ante la acción de una carga.

2. Modelo matemático

Para el desarrollo de este trabajo se ha considerado que la mezcla asfáltica se comporta como un medio elástico lineal. No obstante, aunque el comportamiento real de la mezcla asfáltica sigue un modelo viscoelastoplástico, en nuestro caso es posible simplificar el problema asumiendo un comportamiento elástico lineal definido mediante sus propiedades mecánicas, módulo de elasticidad (E) y coeficiente o módulo de Poisson (ν) ya que, tanto la velocidad de aplicación de las cargas como el campo de deformaciones en el sólido son suficientemente pequeños, por lo que el error cometido es despreciable (Bathe, 2007; Zienkiewicz, 2005). Finalmente, el material se considera homogéneo, isotropo, continuo de espesor constante e indefinido horizontalmente. La base de soporte del ensayo se simuló como un macizo semiindefinido indeformable de Boussinesq (Zamora-Barraza *et al.*, 2010).

2.1 Ecuación constitutiva del material

Para formular la ecuación constitutiva del material, se ha considerado un cuerpo elástico B ocupando el dominio acotado $\Omega \subset \Re^3$ con frontera Γ descomposta en dos partes Γ_1 y Γ_2 con el área Γ_2 de carácter positivo. Sobre B va a actuar una fuerza por unidad de volumen $f = (f_1, f_2, f_3)$ y sobre la frontera la carga $g = (g_1, g_2, g_3)$ en Γ_1 , donde f_i y g_i son las componentes en la dirección x_i . Además, se asume que B está fijo a lo largo de Γ_2 . De esta forma, se desea determinar el desplazamiento $u = (u_1, u_2, u_3)$ y el tensor de tensiones simétrico $\sigma = (\sigma_{ij})$, $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$, $i, j = 1, 2, 3$, bajo las cargas f y g . Donde u_i es el desplazamiento en la dirección x_i , σ_{ii} es la tensión normal en la dirección x_i , y σ_{ij} , $i \neq j$ son las tensiones cortantes. Además es sabido que $\varepsilon(u) = (\varepsilon_{ij}(u))$, siendo (Beer *et al.*, 2008; Callister, 2006):

$$\varepsilon_{ij}(u) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

De esta forma la ecuación (1) muestra el tensor de deformación asociado con el desplazamiento. Así, suponiendo que tiene un comportamiento elástico lineal y que los desplazamientos son pequeños, se tiene la siguiente relación constitutiva (ley de Hooke) entre

tensiones y deformaciones (Steinberg, 1991; Gere y Goodno, 2008; Hibbeler, 2007):

$$\sigma_{ij} = \lambda \operatorname{div} u \delta_{ij} + \mu \varepsilon_{ij}(u) \quad (2)$$

Donde λ y μ son constantes positivas conocidos como parámetros de Lamé, y:

$$\operatorname{div} u = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

Así, a partir de las ecuaciones de equilibrio (Beer et al., 2008; Callister, 2006; Steinberg, 1991; Gere y Goodno, 2008; Hibbeler, 2007) se tiene que:

$$-\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = f_i \text{ in } \Omega, i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

Teniendo en cuenta las condiciones de contorno (Beer et al., 2008; Callister, 2006; Steinberg, 1991):

$$u = 0 \text{ in } \Gamma_2; \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} n_j = g_i \text{ in } \Gamma_1, i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

donde $n = (n_i)$ es la normal exterior a Γ , y las constantes λ y μ en (2) pueden expresarse como:

$$\mu = \frac{E}{1+\nu}, \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (7)$$

siendo E el módulo elástico y ν el coeficiente de Poisson del material elástico B .

2.2 Formulación variacional del problema elástico: el problema continuo

Para una mejor comprensión en el desarrollo de la formulación variacional, a partir de esta sección se usará la siguiente notación para las derivadas parciales:

$$v_{,j} = \frac{\partial v}{\partial x_j}, j = 1, 2, 3, \quad (8)$$

También se usará el convenio de suma, tal que índices repetidos indican suma desde 1 a 3. Usando esta convención es posible escribir las ecuaciones de equilibrio (5) como sigue:

$$-\sigma_{ij,j} = f_i, \text{ in } \Omega, i = 1, 2, 3, \quad (9)$$

Se dará ahora una formulación variacional del problema de elasticidad (2), (5) y (6). Para ello, a continuación se muestra la formulación de Green (Brenner y Scott, 2007; Chandrupatla y Belegundu, 1991; Reddy, 2004):

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}(v) dx = \int_{\Gamma} \sigma_{ij} n_i v_j ds - \int_{\Omega} \sigma_{ij,j} v_i dx, \quad (10)$$

donde el convenio de suma se aplica a todos los términos, es decir, se suma sobre i y j desde 1 a 3. Para mostrar (10), $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ y $\varepsilon_{ij}[v] = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i})$, observándose que y, de manera que se tiene:

$$\sigma_{ij} \varepsilon_{ij}(v) = \frac{1}{2}(\sigma_{ij} v_{i,j} + \sigma_{ji} v_{j,i}) = \frac{1}{2}(\sigma_{ij} v_{i,j} + \sigma_{ij} v_{i,j}) = \sigma_{ij} v_{i,j}, \quad (11)$$

Por tanto, aplicando la fórmula de Green (Brenner y Scott, 2007) se consigue:

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}(v) dx = \int_{\Omega} \sigma_{ij} v_{i,j} dx = \int_{\Gamma} \sigma_{ij} n_i v_j ds - \int_{\Omega} \sigma_{ij,j} v_i dx, \quad (12)$$

lo cual prueba 10. A continuación, se escoge una función test $v = (v_1, v_2, v_3) \in [H^1(\Omega)]^3$ (cada componente $v_i \in H^1(\Omega)$) tal que $v = 0$ sobre Γ_2 , multiplicamos (5) por v_i , sumando con respecto a i desde 1 a 3 e integrando sobre Ω . Por medio de la fórmula de Green (10), resultando (Brenner y Scott, 2007; Chandrupatla y Belegundu, 1991; Reddy, 2004):

$$\int_{\Omega} f_i v_i dx = - \int_{\Omega} \sigma_{ij,j} v_i dx = \int_{\Omega} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}(v) dx - \int_{\Gamma} \sigma_{ij} n_j v_i ds, \quad (13)$$

donde la integral de contorno extendida a Γ_2 se anula ya que $v = 0$ en Γ_2 . Usando también (6), se tiene por tanto:

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}(v) dx = \int_{\Omega} f_i v_i dx + \int_{\Gamma} g_i v_i ds, \quad (14)$$

Finalmente, se elimina σ_{ij} usando (2) para obtener:

$$\int_{\Omega} [\lambda \operatorname{div} u \operatorname{div} v + \mu \varepsilon_{ij}(u) \varepsilon_{ij}(v)] dx = \int_{\Omega} f_i v_i dx + \int_{\Gamma} g_i v_i ds \quad (15)$$

ya que

$$\operatorname{div} u \delta_{ij} \varepsilon_{ij}(v) = \operatorname{div} u \operatorname{div} v, \quad (16)$$

Por consiguiente, se ha obtenido la siguiente formulación variacional para el problema elástico (2), (5) y (6): Encontrar $u \in V$ tal que (Bathe, 2007; Zienkiewicz, 2005; Beer et al., 2008; Callister, 2006; Steinberg, 1991; Gere y Goodno, 2008; Hibbeler, 2007; Brenner y

, donde

$$a(u, v) = \int_{\Omega} [\lambda \operatorname{div} u \operatorname{div} v + \mu \varepsilon_{ij}(u) \varepsilon_{ij}(v)] dx, \quad L(v) = \int_{\Omega} f_i v_i dx + \int_{\Gamma_1} g_i v_i ds, \quad (18)$$

$$V = \left\{ v \in [H^1(\Omega)]^3 : v = 0 \text{ on } \Gamma_2 \right\} \quad (19)$$

2.3 El problema discreto

Llegado a este punto, es posible formular un método de elementos finitos (MEF) para el problema elástico concreto de este trabajo (Beer et al., 2008; Callister, 2006; Steinberg, 1991; Gere y Goodno, 2008; Hibbeler, 2007). Para ello, sea $T_h = \{K\}$ una "triangulación" de Ω en tetraedros K , y definiendo:

$$V_h = \left\{ v \in V : v|_K \in [P_2(K)]^3, \forall K \in T_h \right\}, \quad (20)$$

Por tanto, cada componente v_i de una función $v \in V_h$ es una función cuadrática a trozos que se anula sobre Γ_2 . Ahora formulamos el siguiente método de elementos finitos para (2), (5) y (6): Encontrar $u_h \in V_h$ tal que:

$$a(u_h, v) = L(v) \quad \forall v \in V_h, \quad (21)$$

Scott, 2007; Chandrupatla y Belegundo, 1991; Reddy, 2004; Castro-Fresno et al., 2008; Del Coz, 2007):

$$a(u, v) = L(v) \quad \forall v \in V, \quad (17)$$

Así y de acuerdo con la teoría general de elementos finitos (Bathe, 2007; Zienkiewicz, 2005; Beer et al., 2008; Callister, 2006; Steinberg, 1991; Gere y Goodno, 2008; Hibbeler, 2007; Brenner y Scott, 2007; Chandrupatla y Belegundo, 1991; Reddy, 2004), este problema tiene una solución única, de cuyos resultados de interpolación se obtiene la siguiente estimación del error:

$$\|u - u_h\|_{H^1(\Omega)} \leq Ch \|u\|_{H^2(\Omega)}, \quad (22)$$

2.4 Condiciones de contacto

Considérese N cuerpos (sólidos) que están en contacto en un instante. Sea S_c^t el área completa de contacto para cada cuerpo L , $L=1\dots N$. Así, el principio de los trabajos virtuales para los N cuerpos en el instante t viene dado por (Bathe, 2007; Castro-Fresno et al., 2008; Del Coz, 2007):

$$\sum_{L=1}^N \left\{ \int_{V'} \tau'_{ij} \delta e_{ij} dV' \right\} = \sum_{L=1}^N \left\{ \int_{V'} \delta u_i (f_i^B)' dV' + \int_{S_c^t} \delta u_i (f_i^S)' dS' \right\} + \sum_{L=1}^N \int_{S_c^t} \delta u_i^c (f_i^c)' dS' \quad (20)$$

donde la parte dada entre llaves se corresponde con:

- τ'_{ij} = componentes cartesianas del tensor de tensiones de Cauchy (fuerzas por unidad de volumen en la geometría deformada).
- δe_{ij} = tensor deformación correspondientes a los desplazamientos virtuales.
- δu_i = componentes del vector desplazamiento virtual impuesto sobre la configuración en el instante t , una función de x_j , $j=1,2,3\dots$
- x'_i = coordenadas cartesianas del punto material en el instante t .
- V' = volumen en el instante t .

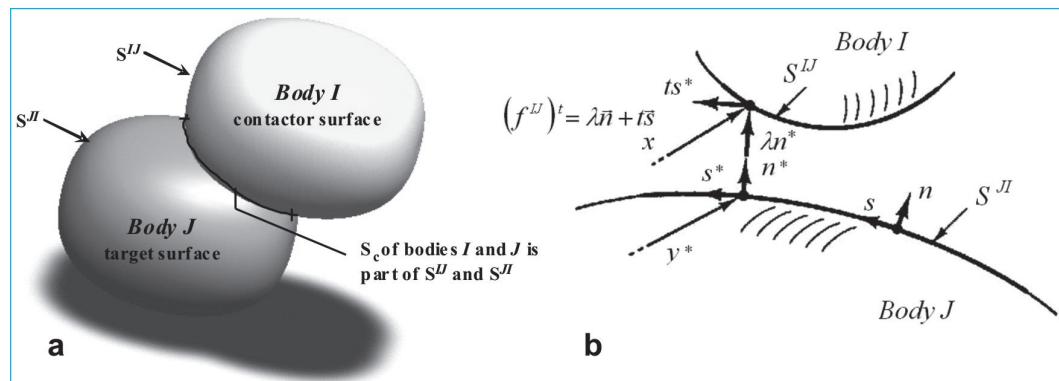
- $(f_i^B)'$ = componentes de las fuerzas aplicadas externamente por unidad de volumen en el instante t .
- $(f_i^S)'$ = componentes de las tracciones superficiales aplicadas externamente por unidad de área en el instante t .
- S_c^t = superficie en el instante t sobre la cual se aplican las tracciones externas.
- $\delta u_i^c = \delta u_i$ = evaluado sobre la superficie S_c^t (los componentes δu_i son cero y corresponden a los desplazamientos prescritos sobre la superficie S_u).

, y donde el último sumatorio en el segundo miembro de la ecuación (23) da la contribución de las fuerzas de contacto. El efecto de la fuerza de contacto se

incluye como una contribución en las tracciones aplicadas de forma externa. Los componentes de las tracciones de contacto se denotan como $(f_i^c)^t$ y actúan sobre las áreas S_{t_c} (el área real de contacto para el cuerpo en el instante t), y las componentes de las tracciones conocidas aplicadas externamente se denotan como $(f_i^s)^t$ y actúan sobre las áreas S_{t_f} . Igualmente, es posible suponer que las áreas S_{t_f} no son parte de las áreas S_{t_c} , aunque tal supuesto

no es necesario. Por ello, con el fin de resolver el problema de contacto, en este trabajo se ha empleado el método del Lagrangiano aumentado (MLA), resultando más eficiente desde el punto de vista numérico (Castro-Fresno et al., 2008; Del Coz, 2007; Laursen, 2003; Motreanu y Sofonea, 2000; Duvaut y Lions, 1976; Glowinski, 2008; Hughes, 2000).

Figura 1 Condiciones de contacto: (a) Cuerpos en contacto en el tiempo, y (b) definiciones usadas en el análisis de contacto.



3. Desarrollo experimental

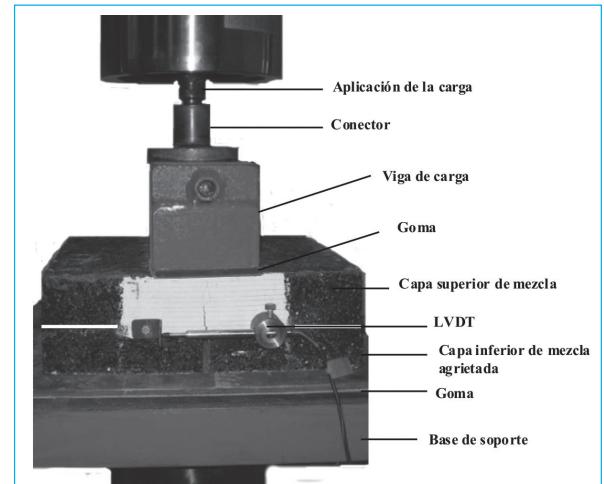
3.1 Ensayo dinámico

Para el ensayo propuesto se utilizó una probeta bicapa fabricada de mezcla bituminosa densa D-12 (equivalente, hoy en día, a una mezcla asfáltica AC16 surf D según la normativa UNE-EN 13108-1). Las dimensiones para cada capa fueron de 305 mm de lado y 50 mm de espesor, fabricada según la normativa NLT-173/00 (CEDEX, 2000). Esta probeta constaba con una grieta en la capa inferior, creada mediante el serrado con un disco de corte, con una profundidad de 40 mm de longitud y 4 mm de espesor. El propósito era que la grieta se reflejara desde la parte inferior a la superior, permitiendo así estudiar su amplitud a lo largo del ensayo. Para la aplicación de la carga, se utilizó una prensa servo-hidráulica y dos extensómetros LVDT para la medida de la deformación transversal.

Finalmente, el ensayo constó con una base de soporte indeformable y una viga prismática para la aplicación de la carga (Fig. 2). La carga aplicada fue cíclica senoidal con fuerza media igual a 11 kN, frecuencia 10 Hz y amplitud de ± 8 kN y a una temperatura específica de 20°C. La aplicación de la carga se mantuvo hasta

completar 30.000 ciclos. La toma de datos fue de tipo discreta, registrándose 200 datos cada 1.000 ciclos.

Figura 2 Ensayo dinámico para simular la reflexión de grietas.



3.2 Simulación numérica

La simulación numérica mediante MEF fue de compresión estática para la probeta bicapa agrietada (Fig. 2). Las propiedades del material se correspondieron con las de la probeta ensayada de forma mecánica. El programa de elementos finitos utilizado fue Ansys® Workbench 11.0 en su módulo Academic Teaching Mechanical (Madenci y Guven, 2005; Moaveni, 2005). El modelo geométrico de la simulación estática se realizó según las dimensiones del ensayo dinámico real.

Los materiales constituyentes utilizados para el modelo fueron: mezcla asfáltica D-12 para la probeta agrietada, acero para la viga de carga y base de soporte, y goma para los elementos intermedios de apoyo. Las propiedades de los materiales empleados en el modelo se muestran en la Tabla 1. El mallado realizado fue de tipo suave con refinamiento en la zona de la grieta y probeta bicapa, según se muestra en la Fig. 3. Finalmente, la fuerza estática aplicada en la simulación fue de 19 kN, igual a una presión de 0,63 MPa calculada según el área de la pieza prismática.

Figura 3 Modelo de elementos finitos.

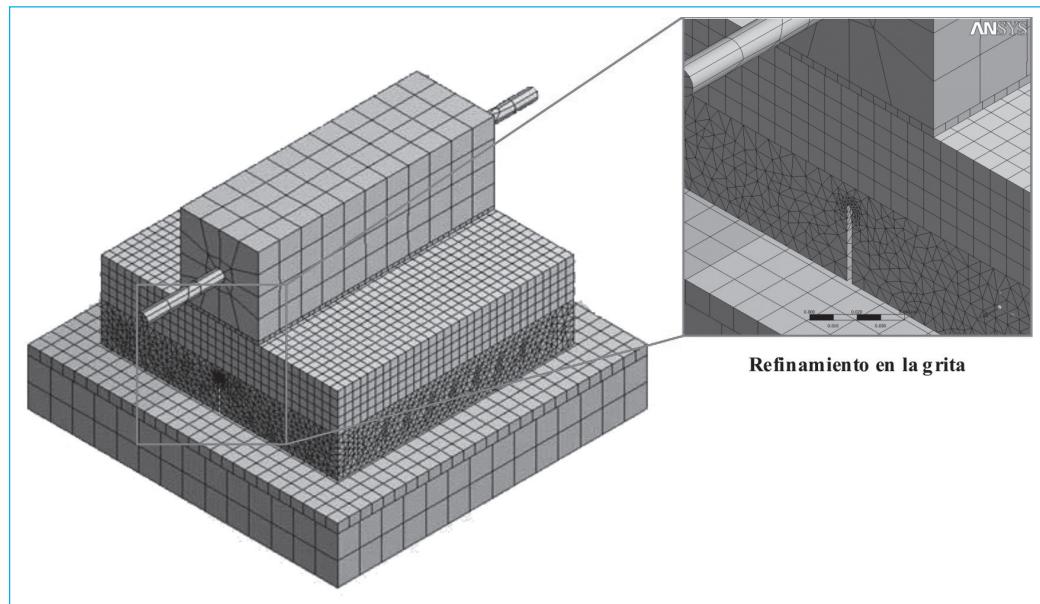


Tabla 1. Propiedades de los materiales (Norambuena-Contreras et al., 2010.)

Material	Módulo de elasticidad (MPa)	Módulo de Poisson	Densidad específica (kg/m ³)
Mezcla asfáltica	6.000	0,35	2.372
Acero	200.000	0,30	7.850
Goma	70	0,40	-

3.3 Diseño experimental

Con el fin de estudiar la influencia de los parámetros elásticos (módulo de elasticidad y de Poisson) con la amplitud de grieta, se llevó a cabo un diseño de optimización basado en el diseño de experimentos (DoE) (Antony, 2003; Barrentine, 1999; Madenci y Guven, 2005; Moaveni, 2005).

En un diseño de optimización basado en el DoE (usado en el método determinístico) cada cambio de valor de cualquier variable de entrada requiere un nuevo análisis de elementos finitos. De esta forma, se genera una superficie de respuesta siendo esta una función de aproximación explícita de los resultados a partir de los elementos finitos expresados como una función de todas las variables de entrada. Asimismo, la superficie de respuesta del método DoE se genera usando algoritmos de ajuste de curvas y superficies, estableciendo datos de salida en función de los datos de entrada. Esto requiere un grupo de puntos de diseño, donde cada punto se genera mediante una solución de elementos finitos.

Para determinar las superficies de respuesta, es necesario evaluar las derivadas de orden superior de

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{123} X_1 X_2 X_3 + \xi_o \quad (25)$$

Los tres términos con " X' s" simples son los términos correspondientes a los efectos principales. Hay $k(k-1)/2 = 3 \times 2 / 2 = 3$ tres términos de interacción de "dos vías" y 1 término de interacción de "tres vías" (que se omite aquí por simplicidad). Cuando los datos experimentales son analizados, todos los parámetros incógnita " β " son estimados y los coeficientes de los términos " X " se comprueban para ver si son significativamente diferentes de cero.

En este caso, se usa un modelo de segundo orden (o cuadrático). Este modelo se usa típicamente en superficies de respuesta DoE con curvatura esperada, y no incluye el término de interacción de tres formas pero añade tres términos más al modelo lineal, a saber:

$$\beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 \quad (26)$$

Claramente, un modelo completo incluiría muchos términos con productos cruzados (o interacciones) implicando " X' s" al cuadrado. Sin embargo, en general estos términos no son necesarios y, en este análisis DoE, estos términos se dejan fuera del modelo. Los siguientes tipos de parámetros son usados en un análisis DoE:

los resultados de elementos finitos con respecto a las variables de entrada seleccionadas, donde el orden de las derivadas corresponde al orden de la función de aproximación. Este método puede aplicarse en problemas de tipo estructural, así como en análisis lineales y no lineales (Reddy, 2004; Antony, 2003; Barrentine, 1999). Finalmente, los modelos empíricos más comunes ajustan los datos experimentales tomando una forma lineal o una forma cuadrática. Por ejemplo, un modelo lineal con dos factores (o parámetros de entrada), X_1 y X_2 , puede ser escrito como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \xi_o \quad (24)$$

Donde Y es la respuesta (o parámetro de salida) para los niveles dados de los efectos principales X_1 y X_2 y el término $X_1 X_2$ se incluye para tener en cuenta un posible efecto de interacción entre X_1 y X_2 . Por último, la constante β_0 es la respuesta de Y cuando ambos efectos principales son cero, siendo ξ_o el error experimental. Para un ejemplo más complicado, un modelo lineal con tres factores X_1 , X_2 , X_3 y una respuesta, Y , sería (si todos los términos posibles son incluidos en el modelo):

- Parámetros de entrada: Las propiedades elásticas del material (módulo de elasticidad y el de Poisson) han sido variadas de dos formas diferentes. Para el módulo de Poisson se ha adoptado una variación continua en el rango $0,35 \pm 10\%$ siguiendo una variación lineal cuyo valor medio es el valor estándard. El módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica se ha variado de una forma discreta, entre 4.000 y 6.500 MPa, con un incremento de 0,5 MPa (Norambuena-Contreras et al., 2010). Con respecto a las solicitudes, se ha aplicado en forma de rampa una fuerza media de 11 kN, tal y como se ha llevado a cabo en los experimentos (Zamora-Barraza et al., 2010).

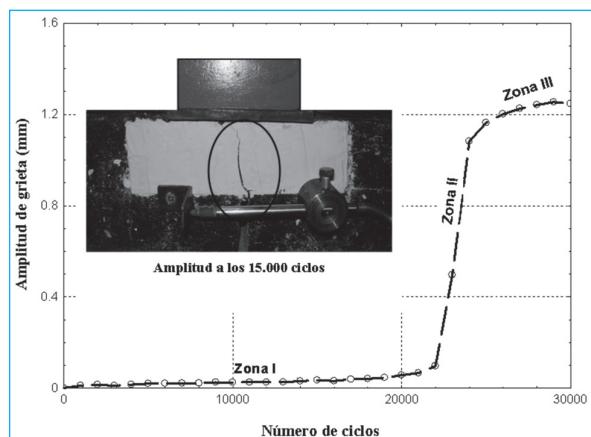
- Parámetros de salida: Se ha adoptado como variable de estudio la amplitud de la grieta que se mide en el ensayo, para lo cual se han seleccionado los nodos en la posición más próxima al extensómetro en el modelo de elementos finitos, y se ha definido una función a partir de la diferencia de los desplazamientos absolutos en la dirección global X.

4. Resultados y análisis

4.1 Ensayo dinámico

La amplitud de grieta registrada según el tiempo de ensayo se muestra en la Fig. 4. Analizando los valores obtenidos, se resuelve que la magnitud del esfuerzo se encontró dentro del orden de los 5,2 MPa, registrándose amplitudes de grietas con un mínimo de 0,001 mm y máximo de 1,3 mm. Estos resultados son coherentes si se comparan con el trabajo publicado por Zamora-Barraza *et al.*, 2010.

Figura 4 Curva de amplitud de grieta registrada para el ensayo.



Además, analizando la tendencia de la curva mostrada en la Fig. 4 es posible identificar tres zonas características:

- Zona I: corresponde a la zona del inicio del ensayo, con una variación lineal de la amplitud frente al número de ciclos (pendiente baja), en la cual la amplitud de grieta no es notoria. El límite de esta zona se alcanza cuando la amplitud de la deformación en la zona de interfase está próxima a 0,1 mm en los primeros 22.000 ciclos de carga. Esto puede deberse a una adaptación lenta del material frente a la solicitud cíclica de la carga.
- Zona II: es la zona de mayor pendiente de la curva y ocupa un menor tiempo de ensayo. Así, la amplitud de grieta se hace más rápida comparada con el intervalo anterior, pasando esta de una amplitud de 0,5 mm en el ciclo 23.000 a 1,16 mm al finalizar el ciclo 25.000, alcanzando de esta forma un incremento de la amplitud de grieta.

- Zona III: en esta se produce una disminución de la pendiente incrementando la deformación. Este fenómeno se corresponde con una velocidad de propagación alta, agrietándose la probeta hasta alcanzar los 1,3 mm al finalizar el ensayo (ciclo 30.000) provocándose la rotura de la probeta.

Finalmente, a medida que avanza el ensayo, las grietas por plastificación del material se acentúan y descienden hasta encontrarse con una grieta mayor ascendente, formando así un sistema de equilibrio entre las compresiones de la probeta plastificada y las tracciones en la zona de interfase. A partir de este momento se comienza a generar la grieta de plastificación bajo carga cíclica en la cara superior de la probeta, provocando su rotura.

4.2 Simulación mediante MEF y DoE

Mediante el modelo de elementos finitos y la metodología basada en el diseño de experimentos DoE, se han obtenido los valores de respuesta de la amplitud de grieta en función de las propiedades elásticas de la mezcla asfáltica. El resultado de la superficie de respuesta para la amplitud de grieta variando el módulo de elasticidad y de Poisson, se muestran en la Fig. 5. Se observa que los valores de amplitud de grieta obtenidos en la simulación por MEF manifiestan una tendencia lineal esperada. Es decir, que considerando las propiedades elásticas de la mezcla empleada, módulo de elasticidad de 6.000 MPa y Poisson de 0,35 (Norambuena-Contreras *et al.*, 2010), el valor de la amplitud de grieta calculado es de 0,0673 mm, valor comparable con la amplitud de grieta manifestada en el ciclo 21.000 del ensayo dinámico (Zona I de la Fig. 4).

De igual forma, en la Fig. 6 se muestran los resultados numéricos obtenidos de la simulación mediante MEF. Los valores de tensión de Von Mises mostrados en la Fig. 6(a) alcanzan un valor máximo de 4,9 MPa, que resulta ligeramente inferior al obtenido en el ensayo dinámico (5,2 MPa). Las Figs. 6(b) y 6(c) muestran los valores de la deformación direccional transversal representativos del ensayo dinámico y, la Fig. 6(d) representa la forma en que se propaga la presión estática en el interior de la probeta de mezcla asfáltica, representación la cual no sería posible visualizar de no ser simulada mediante un programa de elementos finitos.

Figura 5 Superficie de respuesta de la amplitud de grieta en función de las propiedades elásticas de la mezcla asfáltica densa.

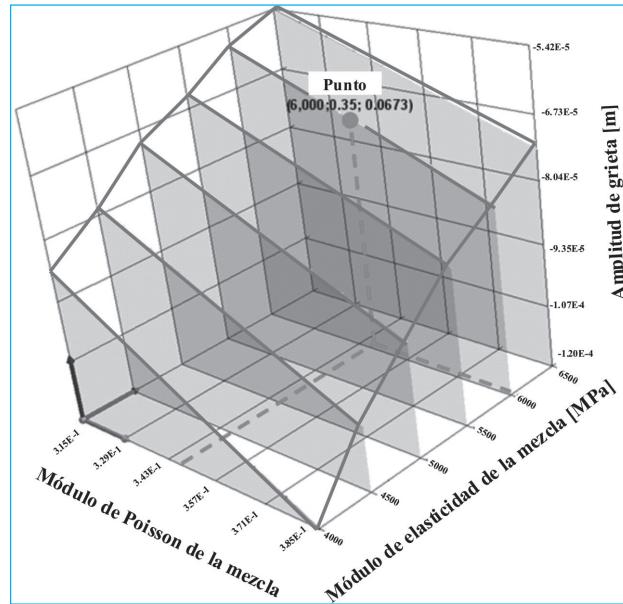
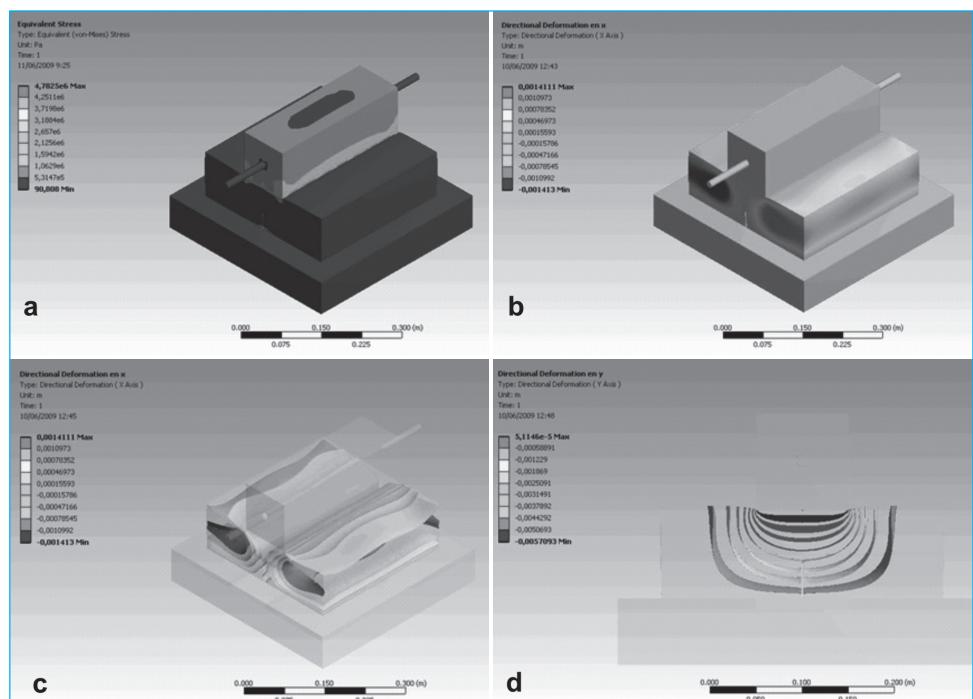


Figura 6 Resultados numéricos mediante MEF: (a) Tensiones de von Mises en (Pa); (b) Deformación direccional transversal en (m); (c) Iso superficies de la deformación direccional transversal en (m); (d) Iso superficies de la deformación direccional longitudinal en (m).



5. Conclusiones

Este trabajo logró establecer y aplicar una simulación numérica simplificada en un ensayo dinámico de mezclas asfálticas, por medio del método de elementos finitos (MEF). Asimismo, se utilizó el diseño de experimentos (DoE) permitiendo desarrollar un diseño de optimización potencialmente utilizable en la medición y evaluación de los parámetros de una mezcla asfáltica densa (control de calidad y diseño estructural). En síntesis, las siguientes observaciones pueden ser establecidas sobre la base de este trabajo.

El ensayo dinámico descrito en este trabajo proporciona información valiosa en lo referente al comportamiento esfuerzo-deformación de una mezcla asfáltica. También, se pueden obtener resultados mediante una curva de amplitud de grieta, pudiendo ser correlacionada con modelos explícitos en un programa de elementos finitos.

Por otra parte, la realización y correlación de resultados entre el ensayo dinámico experimental y su simulación, permitió dar una aproximación numérica de los estados tensionales generados en el material ante la acción de una carga, sirviendo como ayuda complementaria al diseño y evaluación numérica de ensayos reales.

La metodología basada en el diseño de experimentos DoE, permitió conocer la influencia de los parámetros constitutivos del material sobre el comportamiento estructural de la mezcla, presentan un ajuste significativo en comparación a los resultados experimentales extraídos del ensayo en laboratorio.

Finalmente y aunque la metodología numérica presentada en este trabajo se centró en la simulación de una mezcla asfáltica densa, más variedades de mezclas asfálticas deben de ser consideradas para demostrar su aplicabilidad general.

Agradecimientos

Sus autores desean agradecer el apoyo brindado por el Departamento de Construcción de la Universidad de Oviedo, el Grupo de Investigación GITECO y Grupo de Caminos Santander (GCS) de la Universidad de Cantabria. Además, también agradecer a Swanson Ltda. por el empleo del programa ANSYS Worbench Universitario en su entorno de simulación. Finalmente, agradecer al Programa de Formación del Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Ciencia e Innovación de España, la beca otorgada al primer firmante.

Referencias

1. Antony, J. (2003). Design of experiments for engineers and scientists. 1º edition. New York: Butterworth-Heinemann, pp. 29-92.
2. Barrentine, L.B. (1999). An introduction to design of experiments: a simplified approach. 1º edition. New York: ASQ Quality Press, pp. 5-34.
3. Bathe, K.J. (2007). Finite element procedures. 5ºedition. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, pp. 622-628.
4. Beer, F., Johnston, E.R., DeWolf, J., and Mazurek, D. (2009). Mechanics of materials. 5º edition. New York: McGraw-Hill, pp. 25-120.
5. Brenner, S.C., and Scott L.R. (2006). The mathematical theory of finite element methods. 3º edition. New York: Springer-Verlag, pp. 1-66.
6. Callister, W.D., and Rethwisch D.G. (2010). Materials science and engineering: an introduction. 8º edition. New York: Wiley, pp. 131-172.
7. Castro-Fresno, D., Del Coz Díaz J.J., García Nieto P.J., and Norambuena-Contreras, J. (2009). Comparative analysis of mechanical tensile tests and the explicit simulation of a brake energy dissipater by FEM. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, Vol.10-8, pp. 1059-1085.
8. Castro-Fresno, D., Del Coz Díaz J.J., López, L.A, and García Nieto, P.J. (2008). Evaluation of the resistant capacity of cable nets using the finite element method and experimental validation. Engineering Geology, Vol.100-1-2, pp. 1-10.
9. CEDEX (2000). Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio. NLT-173/00. Madrid: Dirección General de Carreteras.

10. Chandrupatla, T.R., and Belegundu, A.D. (2002). Introduction to finite element in engineering. 3º edition. Prentice-Hall, New York, pp. 1-85.
11. Craig, R.R. (2001). Mechanics of materials. 2º edition. New York: Wiley, pp. 10-752.
12. Del Coz Díaz, J.J., García Nieto, P.J., Fernández Rico, M., and Suárez Sierra, J.L. (2007). Non-linear analysis of the tubular 'heart' joint by FEM and experimental validation. Journal of Constructional Steel Research, Vol.63-8, pp. 1077-1090.
13. Duvaut, G., and Lions, J.L. (1976). Inequalities in mechanics and physics. 1º edition. Berlin: Springer-Verlag, pp. 1-397.
14. Gere, J.M., and Goodno, B.J. (2008). Mechanics of materials. 7º edition. New York: CL-Engineering, pp. 5-57.
15. Glowinski, R. (2008). Numerical Methods for Non-linear Variational Problems. 1º edition. New York. Springer, pp.1-96.
16. Hibbeler, R.C. (2010). Mechanics of materials. 8º edition. New York: Prentice Hall, pp. 110-215.
17. Hughes, JR. (2000). The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis. 1º edition. New York: Dover Publications, pp. 1-182.
18. Laursen, T.A. (2010). Computational contact and impact mechanics: fundamentals of modelling interfacial phenomena in non-linear finite element analysis. 2º edition. New York: Springer, pp. 145-196.
19. Madenci, E., and Guven, I. (2005). The finite element method and applications in Engineering using ANSYS. New York: Springer-Verlag, pp. 329-459.
20. Moaveni, S. (2007). Finite element analysis: theory and applications with ANSYS. 3º edition. New York: Prentice-Hall, pp.10-880.
21. Molenaar, A.A.A. (1993). Evaluation of pavement structure with emphasis on reflective cracking in pavements. In: State of the Art and Design Recommendations, Second International RILEM Conference. Taylor & Francis, pp. 21-48.
22. Motreanu, D., and Sofonea, M. (2000). Quasivariational inequalities and applications in frictional contact problems with normal compliance. Advances in Mathematical Sciences and Applications. Vol.10-1, pp. 103-118.
23. Norambuena-Contreras, J., Castro-Fresno, D., Vega Zamanillo, Celaya, M., and Lombillo, I., (2010). Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test, NDT & E International, Vol. 43, pp. 629-634.
24. Norambuena-Contreras, J., Rodríguez-Hernández, J., Vega-Zamanillo, A., y Castro-Fresno, D., Calzada-Pérez, M. (2008). Estudio y análisis del comportamiento dinámico de pavimentos flexibles mediante la modelización y el desarrollo de ensayos no destructivos. En: VIII Congreso Nacional de Firmes, Tomo I, 1ª edición, Valladolid: Asociación Española de la Carretera, pp. 505-518.
25. Reddy, J.N. (2004). An introduction to non-linear finite element analysis. 1º edition. New York: Oxford University Press, pp. 13-225.
26. Zamora-Barraza, D., Calzada-Pérez, M., Castro-Fresno, D., and Vega-Zamanillo, A. (2010). Evaluation of anti-reflective cracking systems using geosynthetics in the interlayer zone. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 29, pp. 130-136.
27. Zienkiewicz O.C., and Taylor, R.L. (2005). The finite element method for solid and structural mechanics. 6º edition. New York: Butterworth-Heinemann, pp. 17-224.