

Una metodología para la simulación de mezclas asfálticas recicladas

J.M. González · S. Oller · J. Miquel · R. Miró

Recibido: Diciembre 2010, Aceptado: Mayo 2011
©Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España 2011

Resumen En el presente artículo se presenta una nueva metodología para la caracterización mecánica de mezclas asfálticas con particular interés en las mezclas recicladas, lo que se traduce en la definición de ensayos de laboratorio idóneos y la formulación de un nuevo modelo constitutivo capaz de integrar las propiedades mecánicas del material y reproducir su respuesta en un contexto complejo.

La adición de material asfáltico reciclado sobre una mezcla convencional, varía notablemente las propiedades de dicha mezcla. El diseño de mezclas asfálticas recicladas requiere información adicional a la proporcionada por los ensayos habitualmente empleados en el diseño de mezclas convencionales, para medir la evolución de propiedades como la tenacidad o la resistencia a la fisuración, determinantes en el comportamiento de la mezcla reciclada. Para este supuesto se propone el ensayo de tracción directa como referente experimental para la caracterización del material.

Se ha formulado un modelo constitutivo en el cual se considera de forma explícita la influencia de la velocidad de deformación del material en la simulación de la respuesta del mismo. El ensayo de tracción directa permite calibrar los parámetros del modelo y por tanto caracterizar su respuesta estructural.

Como objetivo final del proceso, se aplica el modelo propuesto para la simulación de la respuesta del material asfáltico reciclado en una estructura de firme de carretera, obteniendo resultados que reproducen la medida experimental con notable aproximación.

A METHODOLOGY FOR THE SIMULATION OF THE RECYCLED ASPHALT MIXES

Summary In this article a new methodology is presented for the mechanical characterization of the asphalt mixes, specially the recycled asphalt mixes, which leads to define the adequate laboratory tests and to formulate a new constitutive model able to integrate the mechanical properties and reproduce the response of the material in a more complex context.

The addition of asphaltic recycled material over a conventional mix, change in a significant way the properties of this mix. The design of recycled asphalt mixes requires additional information far away from the usual test used in the design of conventional mixes, to pick up the evolution of the tenacity or the cracking resistance, determinant variables in the recycled asphalt mix's behavior. For this purpose, the direct tensile test is proposed as the experimental reference for the characterization of the material.

A new constitutive model is formulated considering in a explicit shape, the influence of the strain rate of the

J.M. González · S. Oller · J. Miquel
Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería
Universidad Politècnica de Catalunya
Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)
Jordi Girona 1-3, Edificio C1 Campus Norte UPC
08034 Barcelona (España)
e-mail: josem.gonzalez@cimne.upc.edu
sergio.oller@upc.edu
canet@cimne.upc.edu

R. Miró
Departamento de Infraestructura del Transporte y el Territorio
Universidad Politècnica de Catalunya
Jordi Girona 1-3, Edificio B1 Campus Norte UPC,
08034 Barcelona (España)
e-mail: r.miro@upc.edu

material in the simulation of its response. The direct tensile test is used to calibrate the parameters of the model, and so characterize its structural response.

The main objective of this development is the simulation of the behavior of the recycled asphalt mixture in a flexible pavement. The results obtained reach a good approximation to the experimental measures with the proposed model.

1. Introducción

El estudio y desarrollo de técnicas de reciclado para la construcción de firmes es una actividad de interés creciente en el ámbito de la ingeniería civil en nuestros días. Los materiales reciclados provenientes de las capas bituminosas de firmes envejecidos pueden ser empleados en la composición de nuevas mezclas bituminosas, lo que significa una reducción de la cantidad de betún y áridos a emplear y a su vez la disminución del residuo depositado, y en definitiva representa un importante beneficio tanto económico como ecológico.

Por estas razones, las técnicas de reciclado se presentan como una interesante alternativa cada vez más empleada para el mantenimiento y la rehabilitación de pavimentos [1]. El empleo de estas nuevas técnicas requiere un idóneo conocimiento del comportamiento estructural del material reciclado, que viene condicionado por las mismas propiedades mecánicas que las consideradas en el análisis y diseño de mezclas asfálticas convencionales [2,3], debido a la presencia de una fracción de material más rígido como es el betún reciclado. En consecuencia, los ensayos empleados habitualmente no ofrecen toda la información posible para entender el comportamiento de la mezcla reciclada, sino que es necesario definir ensayos complementarios específicos para las mezclas recicladas.

En este sentido se propone el ensayo de tracción directa como referencia experimental, y como herramienta de soporte para el diseño de mezclas recicladas. Se trata de un ensayo sencillo y rápido capaz de proporcionar información muy relevante acerca de la tenacidad, o de la resistencia a la fisuración de la muestra, propiedades que influyen de forma significativa en la respuesta estructural de la mezcla reciclada.

Simultáneamente, el proceso de diseño y análisis estructural del material asfáltico requieren de herramientas numéricas capaces de caracterizar las propiedades del mismo. Por ello, se propone una nueva formulación específica para materiales asfálticos, que incluye de forma explícita la dependencia del material frente a la velocidad de deformación, observada experimentalmente en las curvas de respuesta obtenidas del ensayo de tracción directa.

Una vez caracterizadas las propiedades mecánicas del material, el objetivo del presente trabajo es la simulación del comportamiento de la mezcla asfáltica como parte integrante de un firme asfáltico. Se pretende predecir su respuesta y en su caso evaluar la posibilidad de fallo del firme, bajo cargas dinámicas de tráfico, y para diferentes temperaturas.

2. Formulación de un nuevo modelo viscoplástico para la simulación de mezclas asfálticas

2.1. Introducción

El comportamiento mecánico de los pavimentos asfálticos es un fenómeno complejo condicionado por la heterogeneidad del material, compuesto por betún y áridos. Se propone para la simulación numérica del comportamiento de mezclas asfálticas, un nuevo modelo constitutivo como herramienta de soporte al diseño de mezclas asfálticas recicladas y en último término, para la mejora del diseño de pavimentos flexibles.

La mezcla asfáltica muestra un comportamiento dependiente del tiempo, por lo que la simulación numérica de su respuesta ha llevado a formulaciones viscosas basadas en el principio de correspondencia elástico – viscoelástico [4].

Por otro lado, experimentos de laboratorio realizados con el material muestran una clara dependencia de la respuesta del material de la velocidad de aplicación de carga. Con el objetivo de mejorar la modelación numérica del material asfáltico se ha desarrollado un nuevo modelo constitutivo basado en el modelo viscoplástico [5] que incluye de forma explícita esta variable en su formulación.

2.2. Modelo reológico

El modelo propuesto es una generalización de la formulación viscoplástica clásica, teniendo en cuenta la influencia de la velocidad de aplicación de carga en los parámetros constitutivos. Analizando dicha influencia, se han formulado expresiones que relacionan el módulo de elasticidad y la viscosidad con la velocidad de deformación, tomando como referencia para su calibración ensayos de laboratorio [6].

El modelo propuesto está formado por una cadena de Maxwell situada en serie con n cadenas, cada una de las cuales está formada por un elemento de fricción y un amortiguador caracterizado por su tiempo de retardo (τ_i). La cadena de Maxwell inicial modela la influencia

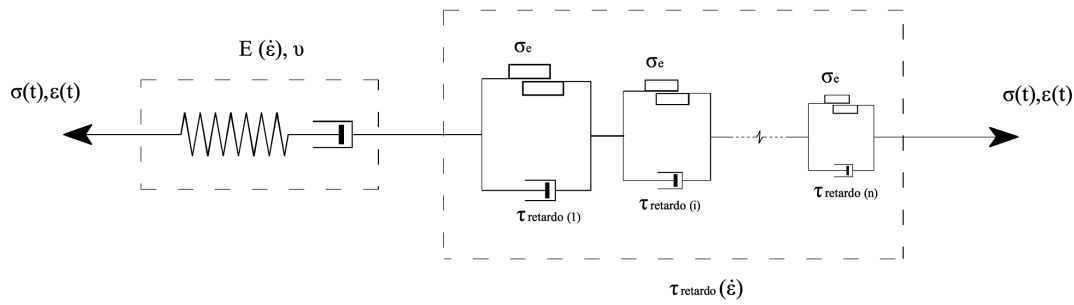


Figura 1. Esquema para el modelo viscoplástico propuesto

de la velocidad de deformación sobre el módulo de elasticidad dando lugar a un comportamiento viscoelástico [7]. El modelo reológico propuesto se muestra en la Figura 1.

Los diferentes tiempos de retardo en cada una de las cadenas, implican que para una tensión aplicada a una cierta velocidad de deformación, la respuesta de cada una de las cadenas es diferente. Dependiendo de los n tiempos de retardo, la respuesta de todo el sistema viene dada por un subconjunto de los n amortiguadores. La combinación de las n cadenas visco-friccionales permite reproducir diferentes respuestas para cada velocidad de deformación. La simulación obtenida viene caracterizada por un tiempo de retardo equivalente $\tau_{equiv} \equiv \tau(\dot{\epsilon})$. El modelo propuesto puede simplificarse por medio de un combinación de un muelle y un amortiguador cuyos parámetros (E, ξ) dependen de la velocidad de deformación en cada punto de cálculo, según se muestra en la Figura 2.

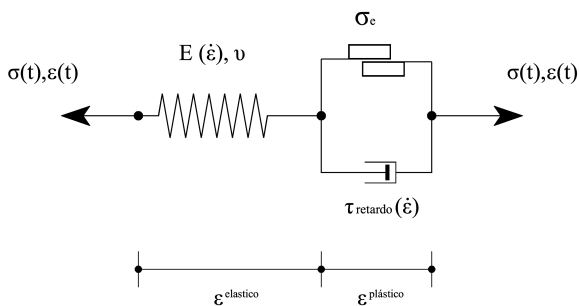


Figura 2. Esquema reducido para el modelo viscoplástico propuesto

En resumen, el modelo proporciona una respuesta dependiente de la velocidad de deformación, para una tensión fijada. Dicha dependencia se recoge de forma explícita a través de expresiones que deben ser calibradas experimentalmente, para el módulo de elasticidad y para la viscosidad.

En la formulación presentada se asume la hipótesis de pequeñas deformaciones y temperatura constante durante todo el proceso.

2.3. Formulación del modelo numérico

El modelo constitutivo propuesto se ha formulado en el marco de la teoría clásica de la termodinámica, basada en su primer y segundo principio. La energía libre se define como una función de la deformación (ϵ), de un vector de variables internas (\mathbf{q}) y un valor escalar función del tensor velocidad de deformación ($\dot{\epsilon}$), según sigue:

$$\psi(\epsilon, \mathbf{q}) = \frac{1}{2\rho} \epsilon^e : C(\dot{\epsilon}) : \epsilon^e + \psi^{vp} \quad (1)$$

donde $C(\dot{\epsilon})$ es el tensor constitutivo, $\dot{\epsilon}$ es un escalar definido en función de las componentes del tensor velocidad de deformación, y ψ^{vp} es la componente viscoplástica de la energía libre, cuya expresión tiene la siguiente forma:

$$\psi^{vp} = \frac{1}{\rho} \kappa^p \quad (2)$$

Donde κ^p es la fracción de energía viscoplástica disipada, con respecto a un valor constitutivo normalizado de la energía de fractura en tracción y compresión $\{g_t, g_c\}$.

Empleado el método de Coleman, se obtienen las expresiones para la ecuación constitutiva y la energía disipada:

$$\sigma = \rho \frac{\partial \psi}{\partial \epsilon} \quad (3)$$

$$\Xi_m = -\dot{\psi} + \frac{\sigma : \dot{\epsilon}}{\rho} \geq 0 \quad (4)$$

Donde Ξ_m es la disipación de energía expresada como función de la variación de energía libre $\dot{\psi}$ – expresión de Clausius – Duhem para problema mecánico isoterma

y adiabático – y la densidad de energía mecánica. En el modelo propuesto se considera por tanto, la temperatura como constante durante todo el proceso.

El vector de variables mecánicas escogido para la formulación del modelo propuesto es el siguiente:

Variables libres: $\boldsymbol{\varepsilon}$, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$.

Variables internas: $\mathbf{q} = \{\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}, \kappa, C\}$

siendo $\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$ la variación temporal de la deformación plástica, κ^{vp} es la fracción de energía viscoplástica disipada, y C es la resistencia uniaxial equivalente del material.

La ley de evolución para κ^{vp} es la siguiente:

$$\dot{\kappa}^{vp} = h_{\kappa} \cdot \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \left[\frac{r(\boldsymbol{\sigma})}{g_f} + \frac{1-r(\boldsymbol{\sigma})}{g_c} \right] \cdot \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} \quad (5)$$

siendo $r(\boldsymbol{\sigma})$ una función escalar del tensor de tensiones $\boldsymbol{\sigma}$ que pondera la energía disipada en tracción y compresión. $\{g_t, g_c\}$ son las energías de fracturas normalizadas, para tracción y compresión respectivamente [9].

C^{vp} es la resistencia uniaxial equivalente del material expresado como función de κ^{vp} y es tratada como una variable interna, cuya función de evolución se expresa como sigue

$$\dot{C}^{vp} = h_c \cdot \dot{\kappa}^{vp} = C^{vp} \cdot \left[\frac{r(\boldsymbol{\sigma})}{C_T} \frac{d(C^{vp})_T}{d\kappa^p} + \frac{1-r(\boldsymbol{\sigma})}{C_C} \frac{d(C^{vp})_C}{d\kappa^p} \right] \cdot \dot{\kappa}^{vp} \quad (6)$$

donde $r(\boldsymbol{\sigma})$ es la misma función escalar antes mencionada, que tiene en cuenta la relación entre las tensiones de tracción y de compresión. La variable C se define a partir de dos funciones de resistencia para estados de tracción y de compresión C_T y C_C conocidas.

La deformación total se define como la suma de dos componentes elástica o reversible y plástica o irre recuperable:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^{elastico} + \boldsymbol{\varepsilon}^{viscoplastico} \Rightarrow \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^{vp} \quad (7)$$

Se define una superficie de fluencia que delimita la frontera entre los dominios elástico y viscoplástico, dependiendo del estado tensional en cada punto de cálculo, evaluado mediante $f(\boldsymbol{\sigma})$. Dicha función es análoga a la función de fluencia plástica, salvo que en el modelo viscoplástico, los estados tensionales que exceden este límite son admisibles. Tomando esta superficie de fluencia como referencia se define una función de sobretensión según la expresión,

$$F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q}) = \frac{f(\boldsymbol{\sigma})}{C^{vp}} - 1 \quad (8)$$

La expresión $f(\boldsymbol{\sigma})$ es una función escalar dependiente del tensor de tensiones, que calcula el estado de tensiones equivalente según el criterio de fluencia considerado.

La deformación plástica se considera una variable interna cuya ley de evolución se define a partir de la forma clásica de la teoría de la plasticidad, es decir asumiendo la existencia de un potencial plástico $G(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q})$. Para el caso particular de plasticidad asociada, esta función potencial toma la expresión de la superficie de fluencia $F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q})$.

La variación temporal de la deformación plástica se define como función de dicho potencial G y de un parámetro viscoplástico λ^{vp} , según la siguiente expresión,

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \lambda^{vp} \cdot \frac{\delta G}{\delta \boldsymbol{\sigma}} = \lambda^{vp} \cdot \mathbf{g} \Rightarrow d\boldsymbol{\varepsilon}^{vp} = \lambda^{vp} \cdot \mathbf{g} \cdot dt \quad (9)$$

El parámetro λ^{vp} se calcula a partir de la función de sobretensión (8) según,

$$\lambda^{vp} = \frac{\langle \phi[F(\boldsymbol{\sigma}; \mathbf{q})] \rangle}{\xi(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}})} = \frac{\langle F(\boldsymbol{\sigma}; \mathbf{q}) \rangle}{\xi(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}})} \quad (10)$$

Según su definición, el parámetro viscoplástico es definido positivo para un comportamiento fuera de la superficie de fluencia, o nulo para comportamiento elástico. De esta forma la condición de consistencia viscoplástica [5] se garantiza en todo momento por la siguiente expresión

$$\langle F(\boldsymbol{\sigma}; \mathbf{q}) \rangle - \lambda^{vp} \cdot \xi(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) = 0 \quad (11)$$

Finalmente, definidas las leyes de evolución de las variables internas, las ecuaciones constitutivas pueden expresarse como función de las variables del modelo según sigue,

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} = C(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}) = C(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) : \boldsymbol{\varepsilon}^e \quad (12)$$

Por su parte, la disipación de energía queda determinada por la siguiente expresión,

$$\begin{aligned} \Xi_m &= \frac{\boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}{\rho} - \dot{\psi} = \frac{\boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}{\rho} - \left[\frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \right] - \left[\frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{q}} : \dot{\mathbf{q}} \right] = \\ &= \frac{\boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}{\rho} - \left[\frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \right] - \\ &- \left[\frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} + \frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}} : \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}}{\partial \kappa^{vp}} \dot{\kappa}^{vp} + \frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}} : \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}}{\partial C^{vp}} \dot{C}^{vp} \right] = \\ &= \frac{\boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}{\rho} - \frac{1}{\rho} \left[[C(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) : \boldsymbol{\varepsilon}^e] : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \left[\frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^e : \frac{\partial C(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}})}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} : \boldsymbol{\varepsilon}^e \right] : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \right] - \\ &- \frac{1}{\rho} \left[[-C(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) : \boldsymbol{\varepsilon}^e] : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} + h_{\kappa}^{-1} \dot{\kappa}^{vp} + h_{\kappa}^{-1} h_c^{-1} \dot{C}^{vp} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Ordenando los términos, se llega a la siguiente expresión:

$$\rho \Xi_m = \sigma : \dot{\epsilon}^{vp} - \underbrace{\psi_E^0 \frac{\partial f_E(\dot{\epsilon}, T)}{\partial \dot{\epsilon}} \frac{\partial \dot{\epsilon}}{\partial \epsilon}}_{\sigma^v} : \dot{\epsilon} = \sigma : \dot{\epsilon}^{vp} + \sigma^v : \dot{\epsilon} \quad (14)$$

donde σ^v puede ser entendida como una componente viscosa de la tensión, desarrollada bajo comportamiento viscoso. La variación temporal de la tensión puede calcularse a partir de las derivadas respecto a las variables del modelo

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}(\epsilon^e, \dot{\epsilon}) &= \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon^e} : \dot{\epsilon}^e + \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}} : \frac{\partial (\dot{\epsilon})}{\partial t} \\ \dot{\sigma}(\epsilon^e, \dot{\epsilon}) &= [C(\dot{\epsilon}) : (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^{vp})] + \frac{\log(K_E)}{\dot{\epsilon}} \left[\left(C(\dot{\epsilon}) \otimes \frac{\partial \dot{\epsilon}}{\partial \dot{\epsilon}} \right) : (\epsilon - \epsilon^{vp}) \right] : \frac{\partial (\dot{\epsilon})}{\partial t} \end{aligned} \quad (15)$$

El tensor constitutivo \mathbf{C} se ha definido como dependiente de un escalar $\dot{\epsilon}$, medida de la velocidad de deformación. Este valor se obtiene a partir de la siguiente relación

$$d\dot{\omega} = \sigma : d\dot{\epsilon} = \sigma : d\dot{\epsilon} \Rightarrow d\dot{\epsilon} = \frac{\sigma : d\dot{\epsilon}}{\sigma} \Rightarrow \dot{\epsilon} = \int_t d\dot{\epsilon} \quad (16)$$

donde $\sigma = f(\sigma)$ es la tensión uniaxial equivalente, según el criterio escogido.

El valor de $\dot{\epsilon}$ puede ser entendido como una velocidad de deformación equivalente, en cada punto de cálculo para cada instante de tiempo, que permite caracterizar los parámetros constitutivos del modelo, dependientes de la velocidad de deformación.

2.4. Variables dependientes de la velocidad de deformación

La formulación de un modelo específico para la simulación del comportamiento de las mezclas asfálticas, parte de la constatación experimental de su respuesta altamente no lineal, a lo que hay que añadir una muy significativa variación de dicha respuesta con la velocidad de aplicación de carga. Por esta razón el modelo incluye una relación explícita de algunos parámetros constitutivos con la velocidad de deformación observada en cada instante y en cada punto.

Las relaciones propuestas son funciones dependientes de constantes del modelo, que han de ser calibradas a partir de datos experimentales. La velocidad de deformación se cuantifica a partir de la variable $\dot{\epsilon}$ según (16).

Módulo de elasticidad. Se considera que el módulo de elasticidad del material es dependiente de la velocidad de deformación $E(\dot{\epsilon})$. La mayor parte del proceso se desarrolla en el rango no lineal del material debido a que el límite elástico se sitúa en valores situados en el rango $40 \leq \sigma_e \leq 60$ kN/m², relativamente bajo.

La expresión propuesta para el módulo de Young en relación con $\dot{\epsilon}$ es la siguiente:

$$\begin{aligned} E(\dot{\epsilon}, T) &= E_0 \cdot f_E(\dot{\epsilon}, T) = \\ &= E_0 \cdot K_E(T)^{\text{Log}\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)} \leq E_{\text{elastico}} \end{aligned} \quad (17)$$

donde E_0 es el módulo de Young para un valor de la velocidad de deformación de referencia $\dot{\epsilon}_0$, y K_E es una constante del material dependiente de la temperatura. Esta constante ha de ser calibrada mediante ensayos experimentales.

Viscosidad. Se trata también de un parámetro relacionado con la velocidad de deformación según la siguiente expresión

$$\xi(\dot{\epsilon}, T) = \xi_0 \cdot K_\xi(T)^{\text{Log}\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)} \quad (18)$$

donde ξ_0 es la viscosidad para una velocidad de deformación de referencia $\dot{\epsilon}_0$ y K_ξ es igualmente una constante del material, dependiente de la temperatura, y que ha de ser calibrada a partir de resultados experimentales.

El modelo ha sido implementado en un código computacional basado en el método de los elementos finitos [10,11] que resuelve la ecuación de equilibrio estático para un sólido sometido a solicitaciones externas determinadas, y bajo determinadas condiciones de contorno. El problema es no lineal, lo que supone la resolución mediante un esquema iterativo según se muestra en la Figura 3.

3. Caracterización mecánica de las mezclas asfálticas

3.1. Propiedades de las mezclas asfálticas recicladas

En el proceso de reciclaje de mezclas bituminosas, se añade a la mezcla asfáltica una fracción de material procedente de la demolición de pavimento envejecido, denominado Pavimento Asfáltico Reciclado (en adelante RAP). Se trata de un elemento cuya influencia es fundamental en las características mecánicas del producto final que es la mezcla asfáltica reciclada.

El RAP, es esencialmente betún envejecido, por lo que influye en las propiedades de la mezcla reciclada

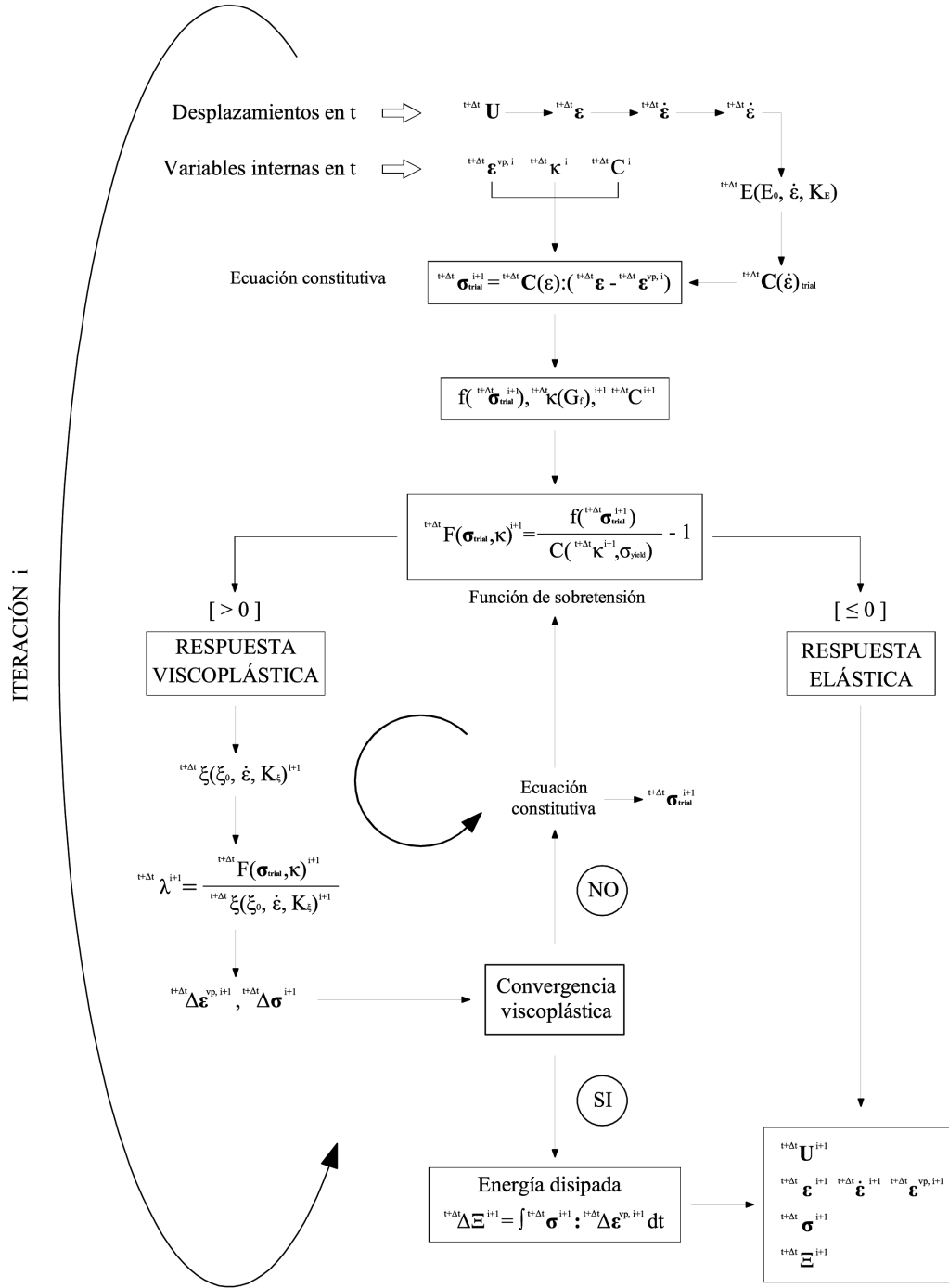


Figura 3. Algoritmo del modelo constitutivo viscoplástico propuesto

disminuyendo su flexibilidad y su resistencia a la fisuración. En la fabricación de la mezcla se añade una fracción de betún blando o betún con aditivos, con el objetivo de que la mezcla reciclada resultante presente propiedades similares a las mezclas convencionales.

A pesar del empleo cada vez más generalizado del reciclaje de pavimentos, no existen métodos para caracterizar mecánicamente estas nuevas mezclas basadas en

la adición de RAP, por lo cual en el diseño de mezclas recicladas se emplean los métodos y los criterios habituales en el caso de mezclas convencionales. Sin embargo no se ha constatado la idoneidad de dichos métodos en el caso de las mezclas recicladas.

Ensayos como el Marshall [12] o el ensayo de pista [13], son ampliamente utilizados para la dosificación de mezclas convencionales. Este ensayo se orienta especial-

mente a cuantificar la estabilidad del material frente a la deformación plástica. Sin embargo, este no es un problema específico de las mezclas recicladas puesto que la adición de material envejecido significa un aumento de la rigidez. En consecuencia la estabilidad no es una propiedad determinante en la medida que lo es en el caso de una mezcla convencional. Consideraciones similares pueden hacerse para el ensayo de pista.

La diferencia esencial que se deriva de la presencia del RAP en una mezcla reciclada, frente a una convencional se da en la importancia adquirida de propiedades como la tenacidad o la resistencia a la fisuración.

La resistencia a la fisuración puede ser evaluada de forma apropiada mediante un ensayo dinámico para obtener una ley de fatiga del material, y en definitiva estimar la durabilidad de la mezcla. No obstante, se trata de un ensayo largo y complejo, por lo que no es muy utilizado en la fase de diseño.

Frente a esta situación, se propone un ensayo alternativo para el análisis de mezclas asfálticas recicladas, como es el ensayo de tracción directa. Se trata de un ensayo sencillo y rápido, que ha demostrado su capacidad para ofrecer información adicional a la proporcionada por los ensayos convencionales [14], en cuanto a propiedades específicas de las mezclas recicladas como son la tenacidad y la resistencia a la fisuración [15], a través de curvas de respuesta de una probeta normalizada. Por esta razón se ha optado por el ensayo de tracción directa como referencia experimental para la realización de este trabajo.

La fisuración se produce debido a la propagación de microfisuras existentes en un material heterogéneo formado por una matriz bituminosa en la que se embeben los áridos, y en la cual existen pequeños poros. Se trata de uno de los mecanismos de fallo más habituales en el material asfáltico.

Cuando el pavimento se ve sometido a las cargas de tráfico o a variaciones de temperatura, se producen estados tensionales y deformaciones permanentes, que derivan en nuevas fisuras y en la propagación de las existentes, con la consiguiente pérdida de rigidez. En este trabajo se ha considerado la deformación horizontal como la variable determinante del fallo por fisuración en el material asfáltico colocado en una estructura multicapa.

La caracterización mecánica de la mezcla asfáltica se complementa con la simulación numérica de su respuesta estructural, lo que significa captar/medir las propiedades mecánicas que gobiernan su comportamiento e integrarlas en el modelo constitutivo formulado, para predecir la respuesta del material asfáltico reciclado, tanto en la fase de diseño como en el análisis del firme flexible del que es parte integrante.

La calibración del modelo se realiza para una composición de la muestra reciclada conocida, y una temperatura fija y constante durante todo el proceso. Se requieren al menos dos ensayos de tracción directa para dos velocidades de aplicación de carga distintas, con un orden de magnitud de diferencia ($\dot{\epsilon}$ y $10\dot{\epsilon}$). Los experimentos de laboratorio pueden reproducirse numéricamente, obteniendo los valores constitutivos del modelo, considerando la influencia de cada parámetro en la evolución de la respuesta. A continuación se describe el proceso de calibración del modelo, a partir de una muestra asfáltica reciclada, cuyas propiedades se muestran seguidamente.

3.2. Definición de la muestra

La mezcla escogida para la simulación numérica está compuesta por una fracción de RAP conocida del 30 %. Esta fracción de material reciclado se añade sobre una mezcla base de tipo S-20 con un tamaño máximo de árido de 20 mm y compuesta por betún de tipo B-80/100. Las propiedades de los betunes de aportación y reciclado se muestran en las Tablas 1a y 1b.

Tabla 1.

Parámetro	Betún RAP
Contenido de betún (%)	4.3
Penetración a 25 °C (0,1 mm)	9
Punto de reblandecimiento B (°C)	83.0
Índice de penetración	0.4
Solubilidad (% residuo)	0.075

(a) Propiedades del betún presente en el RAP

Propiedad	B-80/100
Penetración, 25 °C (0,1 mm)	90
Temperatura (°C)	48.6
Fragilidad Fraas (°C)	-15
Recuperación elástica a 25 °C (%)	-
Punto de ignición (°C)	268

(b) Propiedades del betún de aportación

Como consecuencia de la mezcla del material reciclado y de la mezcla base, se obtiene una mezcla asfáltica reciclada cuyas propiedades que se muestran en la Tabla 2.

Se acepta de forma general que la temperatura influye significativamente en la respuesta del material asfáltico [16], por lo que se han considerado dos temperaturas de ensayo, para caracterizar el material en relación a dicha variable. La temperatura habitual del ensayo de tracción directa es de 20°C. Adicionalmente se han obtenido curvas de respuesta para una temperatura de 8.3°C.

Tabla 2. Composición de la mezcla reciclada

Propiedad	Mezcla
Contenido de betún (%)	4.5
Relación filler/betún (masa)	1.22
Densidad máxima (t/m ³)	2.508
Índice de poros (%)	6.3

La muestra ensayada ha sido empleada en la pavimentación de un tramo real de carretera con el objetivo de evaluar las capacidades mecánicas de las mezclas recicladas. La ejecución se complementó con un plan de auscultación para obtener resultados experimentales in situ, como base para la calibración y mejora del modelo numérico desarrollado, bajo diferentes velocidades de carga y temperatura.

3.3. Simulación numérica del ensayo de tracción directa

Se han llevado a cabo ensayos de tracción directa para dos temperaturas, y para tres velocidades de aplicación de carga. Las características de las probetas empleadas se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones y temperaturas para las probetas de ensayo

	Probeta 1	Probeta 2
Altura	140 mm	80 mm
Base cuadrada	50 x 50 mm	60 x 60 mm
Profundidad de entalla	5,0 mm	5,0 mm
Temperatura	20,0°C	8,3°C

La carga se aplica sobre cada probeta mediante un desplazamiento prescrito, para diferentes incrementos de tiempo, de modo que la velocidad de deformación permanece constante según se detalla en la Tabla 4.

La respuesta obtenida en cada ensayo se traduce en una curva fuerza – desplazamiento, variables realmente medidas en el ensayo, obviando la definición de tensiones o deformaciones sometidas a errores en la determinación de áreas y longitudes, variables a lo largo del ensayo. Las curvas obtenidas se muestran en la Figura 4.

La mezcla asfáltica incrementa su estado tensional a medida que se incrementa la carga hasta alcanzar un valor máximo de carga. Más allá del máximo, el material se relaja. El material se caracteriza por tanto, por un comportamiento no lineal con ablandamiento. Otra información relevante obtenida del ensayo es la diferente respuesta observada en función de la velocidad de

Tabla 4. Desplazamientos prescritos y velocidad de deformación

		Probeta 1	Probeta 2
Vel. deformación ($\cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)		20.0 °C	8.3 °C
Rápido	120	1,00 mm/m	0,5700 mm/m
Lento	12	0,10 mm/m	0,0570 mm/m
Cuasi-estático	1.2	0,01 mm/m	0,0057 mm/m

carga, especificidad del material que se pretende estudiar y modelar explícitamente.

El ensayo de tracción directa se ha reproducido numéricamente empleando el método de los elementos finitos. Se ha aprovechado la simetría del problema para diseñar un modelo numérico correspondiente a un cuarto de probeta, que con las condiciones de simetría adecuadas según se aprecia en la Figura 5, permite simplificar el problema aumentando la precisión de los resultados, sin pérdida de generalidad.

El modelo numérico incluye la entalla, para reproducir el efecto de concentración de tensiones en este punto. La modelación se ha realizado mediante un contorno redondeado con la profundidad real de 5 mm.

Las simulaciones numéricas de los ensayos de laboratorio permiten calibrar los parámetros constitutivos del modelo, para las tres velocidades de aplicación de carga y para las dos temperaturas de referencia. Para determinar las constantes K_E y K_ξ de las expresiones (17) y (18) se ha asumido una relación geométrica entre los parámetros constitutivos, módulo de elasticidad y viscosidad. En la Tabla 5 se detallan todos los valores obtenidos y la calibración de las constantes referidas.

Se ha asumido el límite elástico como valor constante para cada temperatura, dada su bajo nivel de influencia en el resultado, ya que para las cargas aplicadas la práctica totalidad del ensayo se desarrolla en rango no lineal.

Una vez determinadas las constantes del modelo, el módulo de elasticidad y la viscosidad están definidos para cada punto de cálculo en el rango no lineal, para temperatura constante a través de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 E_{20^\circ\text{C}}(\dot{\varepsilon}) &= 0,15 \cdot 10^6 \cdot [3,056]^{Log\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)} \\
 \xi_{20^\circ\text{C}}(\dot{\varepsilon}) &= 4,00 \cdot 10^6 [0,206]^{Log\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)} \\
 E_{8,3^\circ\text{C}}(\dot{\varepsilon}) &= 1,20 \cdot 10^6 \cdot [1,173]^{Log\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)} \\
 \xi_{8,3^\circ\text{C}}(\dot{\varepsilon}) &= 7,0 \cdot 10^6 \cdot [0,170]^{Log\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)}
 \end{aligned} \tag{19}$$

siendo $\dot{\varepsilon}_0 = 1.2 \cdot 10^{-6} \text{ seg}^{-1}$ la velocidad de deformación de referencia para todos los experimentos, y E_0 y ξ_0 son los correspondientes módulos de elasticidad y viscosidad asociados a $\dot{\varepsilon}_0$ para cada temperatura. Las funciones (19) se han representado en la Figura 6.

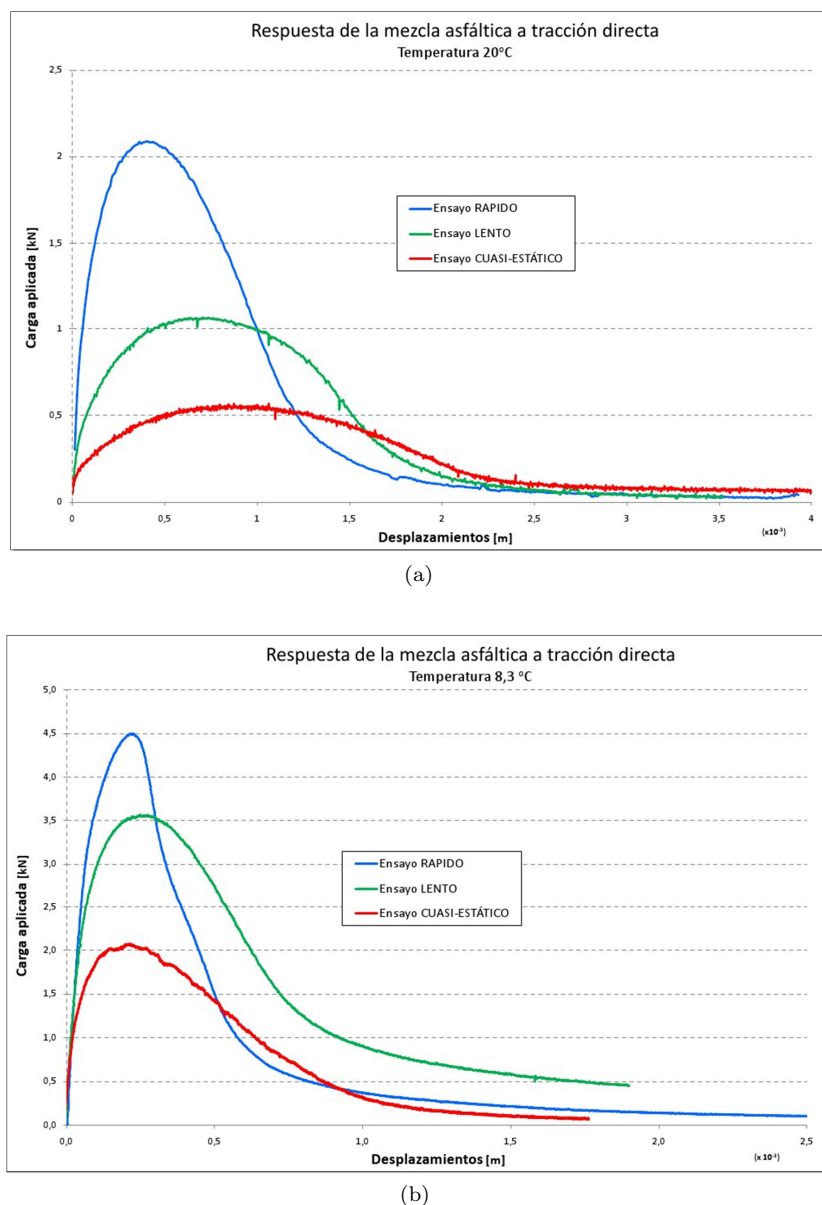


Figura 4. Curva fuerza desplazamiento. (a) Temperatura 20°C. (b) Temperatura 8.3°C

La curva obtenida para el módulo de elasticidad muestra una elevada dependencia de la temperatura. En ambos casos la rigidez aumenta con la velocidad de deformación, sin embargo esta variación es mucho más acusada para altas temperaturas.

La evolución del parámetro viscosidad con la velocidad de deformación se muestra en la Figura 6b. En ella se aprecia cómo la variación de la viscosidad es mayor para bajas velocidades de deformación mientras que aumentando la misma, el valor de la viscosidad se estabiliza.

En esta segunda gráfica se observa cómo la influencia de la temperatura no es tan alta como en el caso del módulo de elasticidad. Ambas curvas son similares,

más allá de la diferente sensibilidad de la viscosidad en función del valor de la velocidad de deformación.

3.4. Parámetros constitutivos para las mezclas asfálticas

Una vez calibrado y a modo de validación se muestran los resultados obtenidos para la simulación de la respuesta del material reciclado frente al ensayo de tracción directa. En la Figura 7 se comparan las curvas experimentales con las obtenidas en la simulación numérica definitiva, para tres velocidades de ensayo y dos temperaturas.

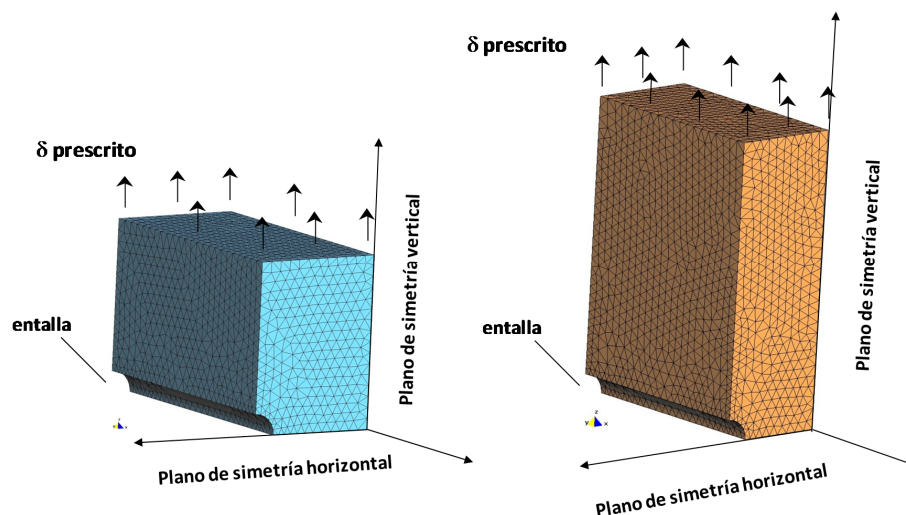


Figura 5. Modelos numéricos para las probetas 1 / 2 del ensayo de tracción directa

Tabla 5.

	Velocidad deformación [$\cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$]	Módulo elástico [KN/m^2]	Límite elástico [KN/m^2]	Viscosidad [$\text{KN}\cdot\text{s/m}^2$]	Energía de fractura [KN/m]
Rápido	120	$1,40\cdot 10^6$	40	$0,175\cdot 10^6$	0,021
Lento	12	$0,45\cdot 10^6$	40	$0,80\cdot 10^6$	0,018
Cuasi-estático	1.2	$0,15\cdot 10^6$	40	$4,00\cdot 10^6$	0,017
	R/L	3,111		0,213	
	L/CE	3,000		0,200	
	K_E	3,06	K_ξ	0,210	

(a) Parámetros constitutivos para temperatura 20,0°C

	Velocidad deformación [$\cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$]	Módulo elástico [KN/m^2]	Límite elástico [KN/m^2]	Viscosidad [$\text{KN}\cdot\text{s/m}^2$]	Energía de fractura [KN/m]
Rápido	120	$1,65\cdot 10^6$	60	$0,20\cdot 10^6$	0,020
Lento	12	$1,50\cdot 10^6$	60	$1,30\cdot 10^6$	0,022
Cuasi-estático	1.2	$1,20\cdot 10^6$	60	$7,00\cdot 10^6$	0,016
	R/L	1,100		0,154	
	L/CE	1,250		0,186	
	K_E	1,173	K_ξ	0,170	

(b) Parámetros constitutivos para temperatura 8,3°C

La aproximación numérica de las curvas experimentales es muy notable para los valores constitutivos y expresiones adoptadas, teniendo en cuenta el alto nivel de variabilidad de la respuesta del material.

4. Simulación del comportamiento de un firme flexible

4.1. Descripción de la simulación propuesta

El modelo propuesto se ha utilizado para simular la respuesta de la mezcla asfáltica reciclada en un firme real. Se ha construido un tramo experimental para e-

valuar los progresos alcanzados en la investigación del análisis, diseño, puesta en obra y simulación numérica de mezclas asfálticas. El tramo experimental seleccionado se construyó en la carretera C-58, en la provincia de Barcelona (España).

El tramo experimental consistió en una estructura multicapa compuesta por dos capas asfálticas sobre bases granulares. La primera capa asfáltica situada sobre la capa granular está compuesta por mezcla asfáltica existente. La capa de rodadura se ejecutó empleando mezcla asfáltica reciclada. La geometría y los módulos de elasticidad de las distintas capas se detallan en la Tabla 6.

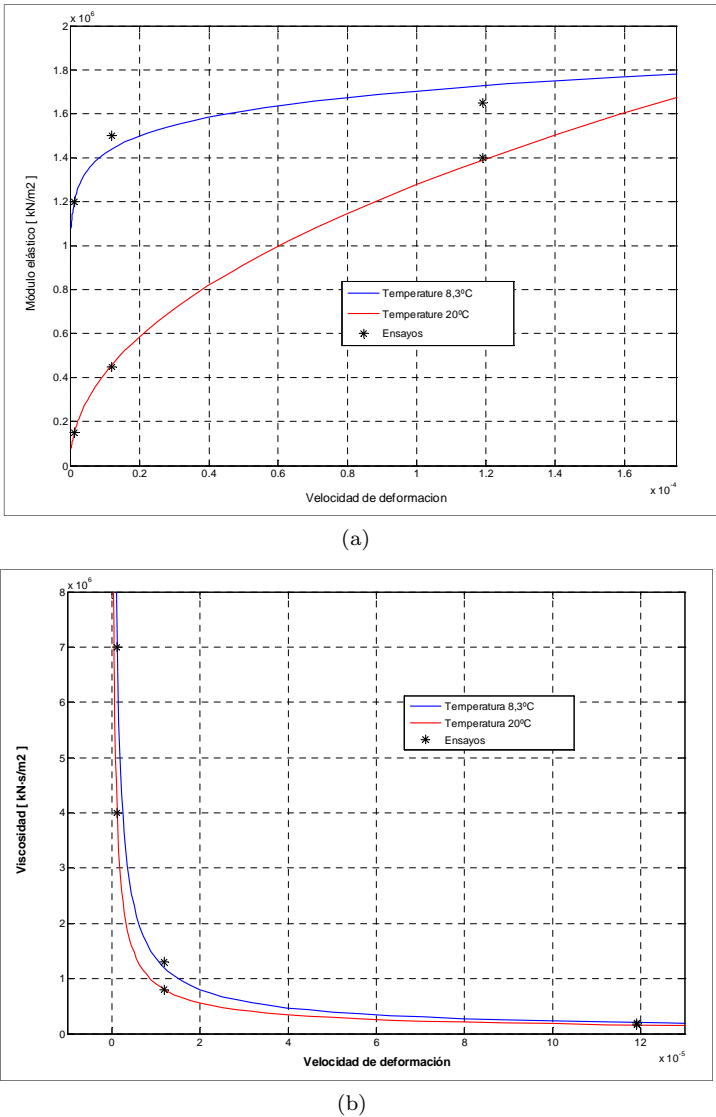


Figura 6. (a) Relación entre el módulo de elasticidad y la velocidad de deformación. (b) Relación entre la viscosidad y la velocidad de deformación

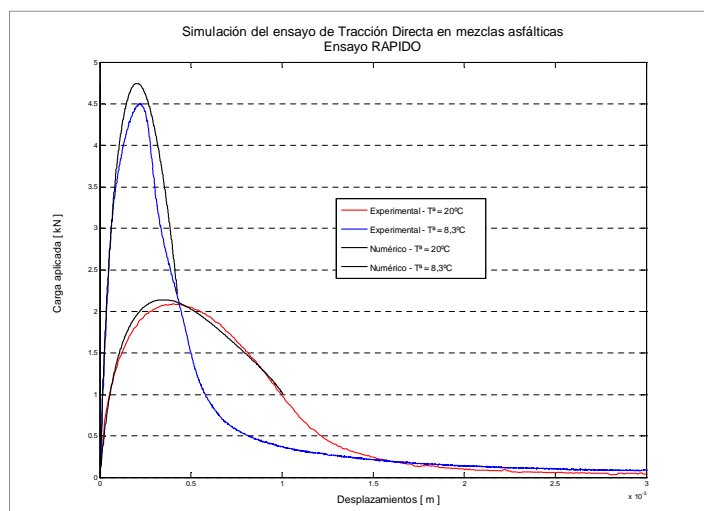
Tabla 6. Estructura multicapa. Potencias y módulos de elasticidad

	Potencia [cm]	Módulo de Young [MPa]
Mezclas asfáltica reciclada	15,0	5.000
Mezcla asfáltica pre-existente	15,0	5.000
Base granular	20,0	530
Subbase granular	50,0	200

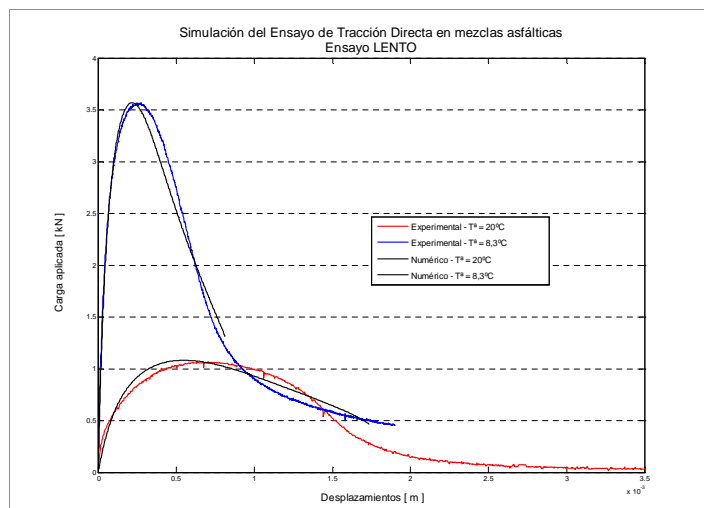
En el tramo de carretera ejecutado se han dispuesto diversos dispositivos de auscultación para medir deflexiones y deformaciones horizontales durante la vida útil del proyecto. Se han recopilado datos para dos temperaturas 20°C y 8.3°C, correspondientes con las fijadas en el laboratorio.

Se ha escogido como variable de referencia para el estudio del fallo del firme, la deformación horizontal producida en la interfase entre las dos capas asfálticas, como indicativo del fallo del material [4]. Se ha considerado además la posibilidad de que el material esté fracturado, ya que las microfracturas existentes en el asfalto y su propagación, son la principal causa del fallo del material.

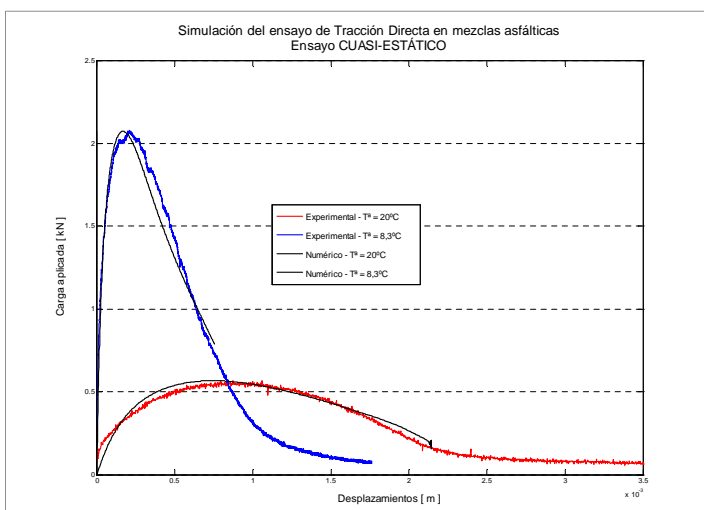
En el tramo experimental se han dispuesto galgas extensométricas en la interfase de ambas capas asfálticas para medir la deformación horizontal. Tres de ellas sobre un corte de 5 mm de ancho y 5 cm de profundidad, provocado para simular la posible fractura en el material. La localización de las galgas y las dimensiones correspondientes se muestran en la Figura 8.



(a)



(b)



(c)

Figura 7. (a) Simulación numérica Vs curva experimental. Ensayo **Rápido** (b) Ensayo **Lento** (c) Ensayo **Cuasi-estático**

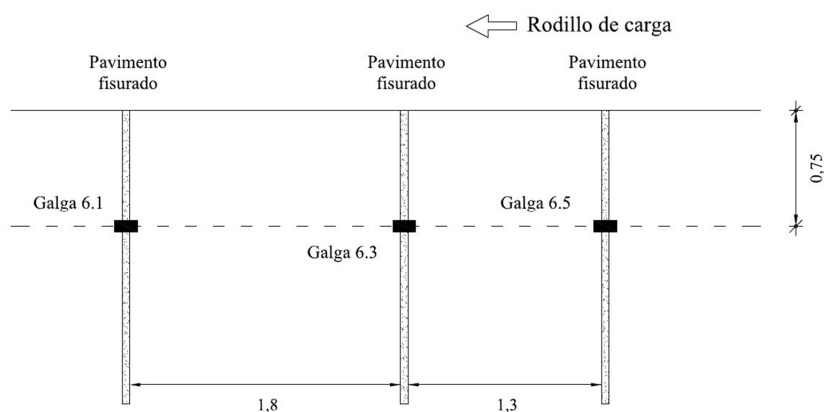


Figura 8. Localización de las galgas

Las galgas se instalaron sobre una lámina de Kapton para asegurar una superficie plana para el sensor. Esta película se encuentra embebida sobre una pequeña cantidad de mezcla de arena y betún con un recubrimiento de 1 cm de espesor, que protege al sensor y asegura una buena adherencia con la capa asfáltica (Figura 9).

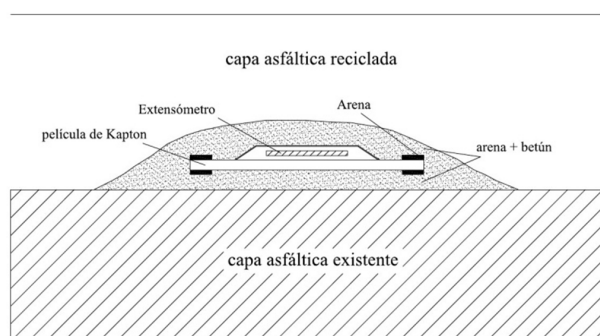


Figura 9. Detalle de galga embebida en el asfalto

La carga se aplica mediante un rodillo compactador que circula sobre la capa de rodadura de mezcla reciclada (Figura 10). Se han realizado medidas de deformaciones horizontales para diversas velocidades de pasada, con el objeto de estudiar la influencia de esta variable en la respuesta observada.

El mecanismo de deformación que tiene lugar en cada punto de la interfase entre las capas asfálticas, es un ciclo de tracción – compresión correspondiente al paso de cada eje del rodillo compactador. La carga produce una tensión horizontal de tracción máxima en la vertical del punto de aplicación, y tensiones de compresión en las cercanías.

El sensor mide la evolución de la deformación horizontal durante el proceso de carga, ofreciendo la curva deformación tiempo, producida por el paso del rodillo con sus dos ejes. Así que la curva obtenida puede ca-



Figura 10. Rodillo aplicando la carga sobre el pavimento

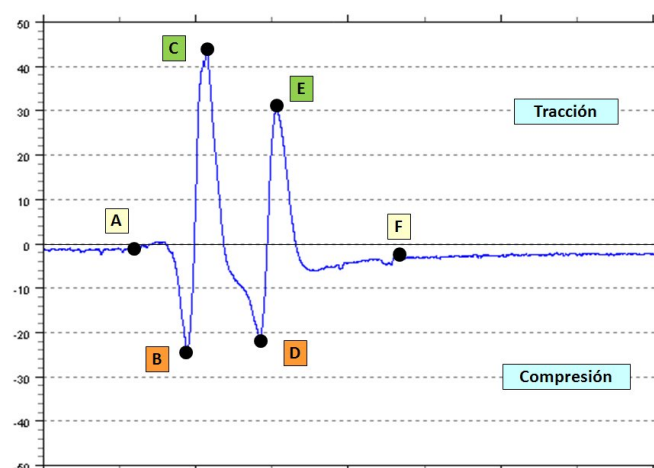


Figura 11. Evolución de la deformación horizontal. Puntos críticos

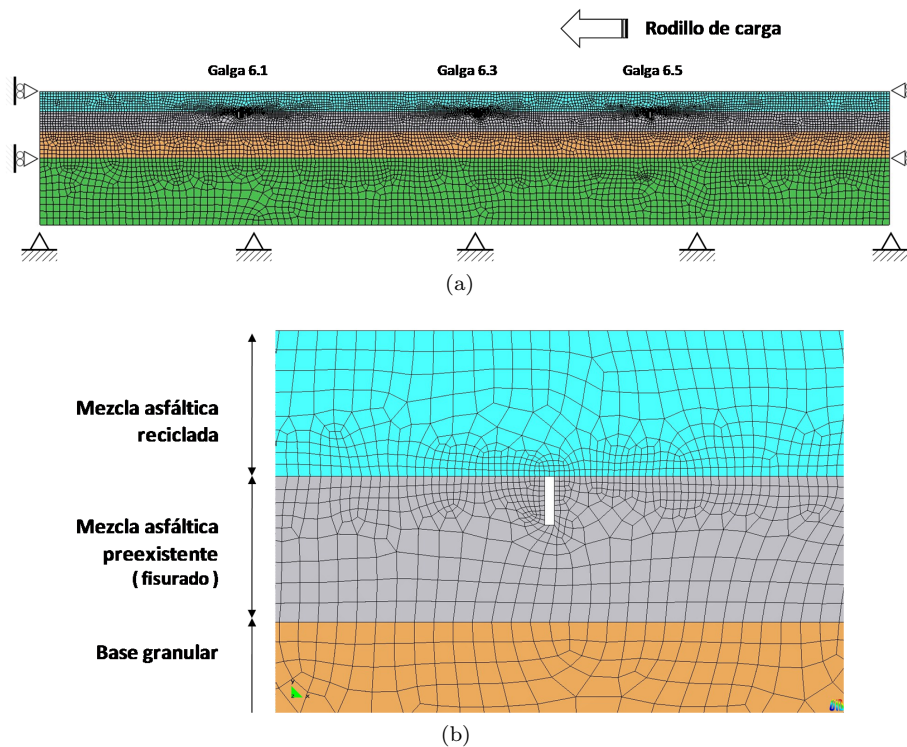


Figura 12. (a) Modelo numérico de la estructura de firme. (b) Simulación de la fisura en la capa asfáltica preexistente

racterizarse por varios puntos críticos (Figura 11) explicitados a continuación:

- Inicio (A) del proceso de deformación
- Máxima tensión de compresión (B,D) cuando el rodillo se aproxima o se aleja de la galga.
- Máxima tensión de tracción (C,E) cuando el rodillo se sitúa sobre el punto de auscultación, produciendo un aplastamiento en la interfase entre las capas asfálticas.
- Final del proceso de deformación (G) después de un proceso de estabilización de la deformación horizontal (F)

Estas curvas han sido obtenidas periódicamente, para diferentes temperaturas, condiciones climáticas y velocidades – baja y alta – del rodillo.

4.2. Simulación del comportamiento de una capa de mezcla asfáltica reciclada

Para la simulación de la respuesta del firme, se ha diseñado un modelo numérico del sistema multicapa reproduciendo el esquema de galgas, con los valores constitutivos obtenidos del proceso de calibración, y con las condiciones de contorno que se explicitan en la Figura 12a.

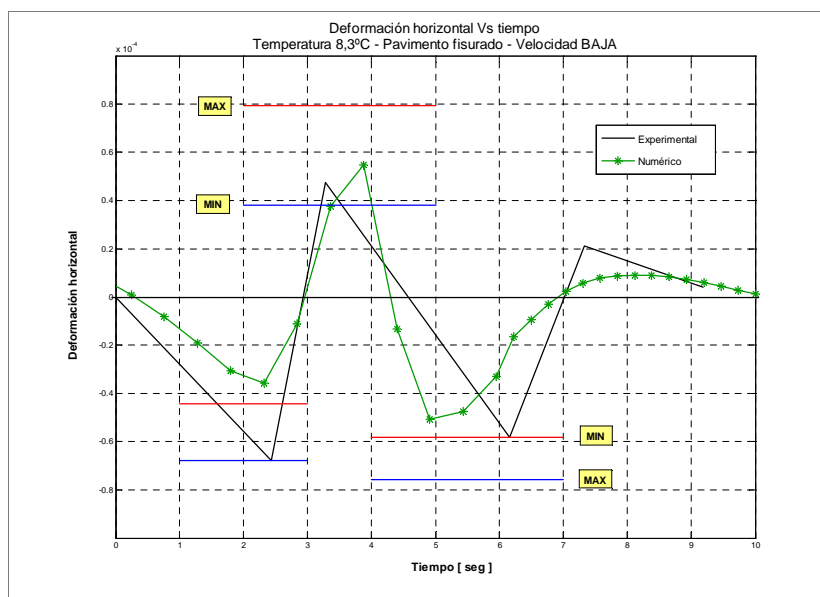
A una distancia suficiente de la actuación del rodillo la deformación horizontal es despreciable, por lo que se ha supuesto que el movimiento horizontal queda coartado a una distancia de 1.5 metros por ambos lados.

Se asume que a una profundidad suficiente, los desplazamientos verticales en la capa subbase son nulos.

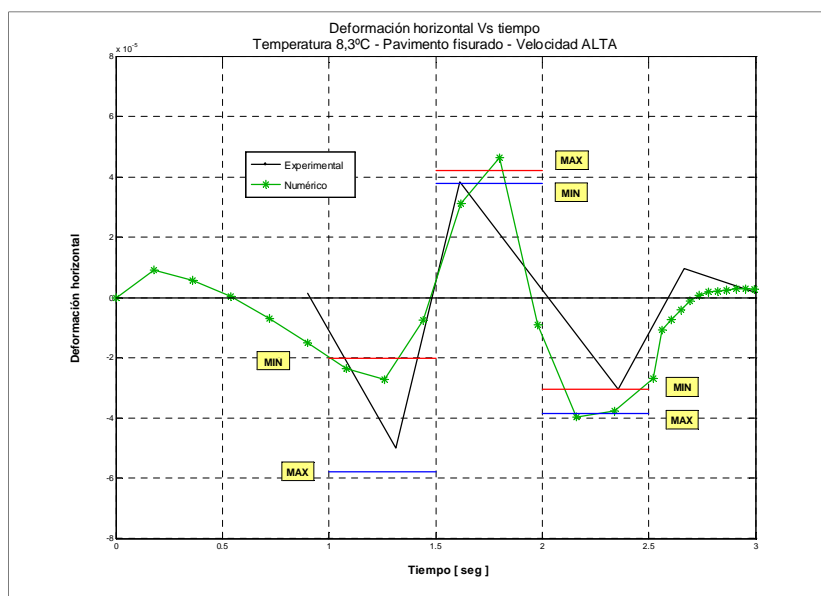
La fisuración del pavimento se simula según se observa en la Figura 12b, mediante una fisura de 5 cm de profundidad y 1 cm de ancho, ligeramente más ancha que la real por una cuestión de simplicidad en la malla y claridad en los resultados.

El punto de cálculo se sitúa justo encima de la fisura, lo que permite reproducir la respuesta del material, comparándolo con los resultados experimentales. La variabilidad observada en los resultados experimentales es elevada. Por esta razón y considerando que para cada medida se han realizado hasta cuatro pasadas, se ha considerado en cada gráfica una banda que delimita los valores máximo y mínimo de las medidas experimentales.

La simulación numérica proporciona la deformación horizontal producida por un eje del rodillo, comparada con los puntos B y C de las curvas experimentales. Se ha reproducido un ciclo compresión – tracción – compresión para dos velocidades del rodillo:



(a)



(b)

Figura 13. Simulación numérica. Temperatura 8,3°C. (a) Velocidad de carga **BAJA**. (b) Velocidad de carga **ALTA**

- Velocidad baja: 4.52 km/h, a 8.3°C y 2.50 km/h a 20°C
- Velocidad alta: 10.59 km/h, a 8.3°C y 8.30 km/h a 20°C

Las amplitudes de la deformación horizontal en tracción y compresión obtenidas simulan razonablemente bien la amplitud máxima y mínima de los valores experimentales, como se muestra en la Figura 13 para las curvas obtenidas a 8,3°C y en la Figura 14, para las obtenidas a 20°C.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado un nuevo modelo constitutivo para la simulación del comportamiento mecánico del material asfáltico, en particular de las mezclas asfálticas recicladas, considerando de forma explícita la dependencia de la respuesta del material, con la velocidad de deformación observada en los ensayos experimentales.

La influencia de dicha variable se hace efectiva en la evolución del módulo de elasticidad y la viscosidad

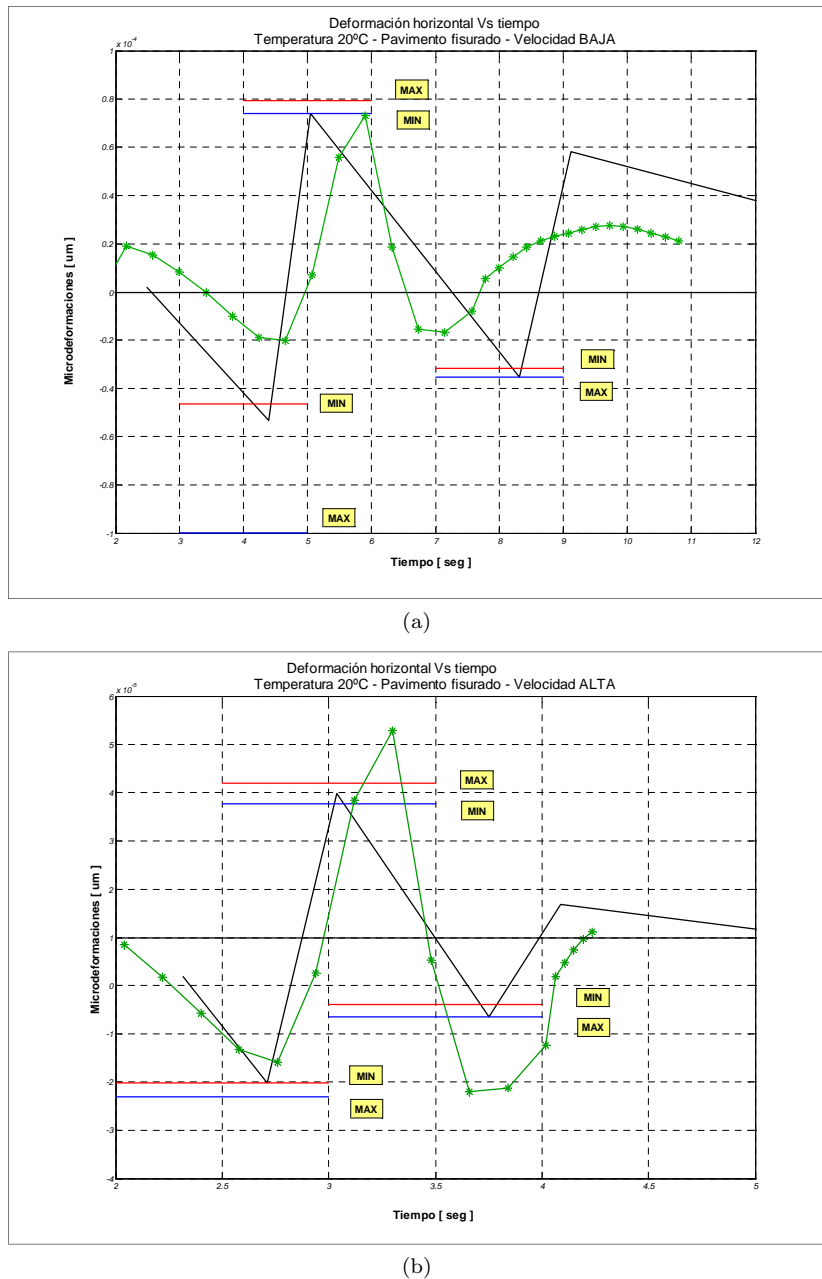


Figura 14. Simulación numérica. Temperatura 20°C. (a) Velocidad de carga **BAJA**. (b) Velocidad de carga **ALTA**

del material, a través de dos expresiones que han de ser calibradas experimentalmente.

Se ha tomado el ensayo de tracción directa como referente experimental por su capacidad para captar la evolución de propiedades como la tenacidad o la resistencia a la fisuración, que determinan de forma significativa el comportamiento de las mezclas recicladas, más allá de la información aportada por ensayos habituales en la caracterización de mezclas asfálticas convencionales.

A partir de este ensayo y analizando la influencia de cada parámetro constitutivo, se ha procedido a la calibración del modelo a través de las curvas experimentales obtenidas, para diversas velocidades y para dos temperaturas.

Una vez calibrado el modelo y caracterizado el material y sus propiedades, el modelo ha sido aplicado a la simulación de la respuesta de un firme multicapa conformado por dos capas asfálticas, la primera de las cuales – la de rodadura – responde al modelo de comporta-

miento propuesto, con los parámetros obtenidos de la calibración descrita.

La respuesta estructural obtenida con el modelo muestra una buena aproximación a los valores experimentales en los puntos críticos de la curva, considerando la elevada dispersión de los resultados de campo.

Agradecimientos

Los desarrollos incluidos en este trabajo son fruto de diversos proyectos de investigación. Los autores agradecen encarecidamente el apoyo recibido por parte de las instituciones responsables de dichos proyectos. Dichas instituciones son, la UE en su programa Growth (proyecto PARAMIX GRD1-2000-25168), el gobierno español a través de su ministerio de Ciencia y Tecnología (proyecto RECOMP ref. BIA2005-06952, proyecto DECOMAR ref. AT2003-08700-C03-02, proyecto DELCOM ref. MAT2008-02232), el ministerio de medio ambiente, y medio rural y marino (proyecto SEPRISIS ref. 048/RN08/04.5), la compañía Airbus a través del proyecto FEMCOM y la compañía Acciona Infraestructuras, a través del proyecto SPHERA. Nuestro más sincero agradecimiento a todos ellos por el apoyo recibido.

Referencias

1. Centeno M., Martínez A., Miró Recasens R. (2004). Análisis del comportamiento de firmes con material reciclado a partir de tramos experimentales. *Proceedings VI Congreso Nacional de Firmes*. León, España.
2. Miró R. (2004) Diseño y caracterización de mezclas recicladas en caliente con elevados porcentajes de mezcla recuperada. *Reunión del Asfalto*. Mendoza, Argentina.
3. Pérez Jiménez F., *et al.* (2004) Design and performance of hot mix asphalts with high percentages of reclaimed asphalt *Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Vienna, (Austria).
4. Yang H. Huang (1993) *Pavement Analysis and Design*, Englewoods Cliff, New Jersey (EE UU).
5. Oller S. (2001) *Dinámica No lineal*. CIMNE – Ediciones UPC. Barcelona, España.
6. González J.M. *et al.* (2007) A numerical-experimental method for characterizing the recycled asphalt mixes. *International Journal on Road Materials and Pavement Design*. 9(4):711 – 730
7. Creus G. (1986) *Viscoelasticity – Basic theory and applications to concrete structures*. In: Brebbia, C.A., Orszag, S.A. (eds.). *Lecture Notes in Engineering*. v.17. Springer, Heidelberg
8. Oller S. (2001) *Mecánica de fractura. Un enfoque global* CIMNE – Ediciones UPC. Barcelona, España
9. Oñate E. (1995) *Cálculo de Estructuras por el Método de los Elementos Finitos. Análisis estático lineal*. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE). Barcelona, España
10. Zienkiewicz O.C., Taylor R. (1989). *The finite element method*. Vol I y II. McGraw-Hill.
11. Norma NLT-159/86. Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall
12. Norma NLT-173/84. Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio
13. González J.M., *et al.* (2007) A viscoplastic constitutive model with strain rate variables for asphalt mixtures numerical simulation. *Computational Material Science* 38(4):543-560
14. Pérez Jiménez F, Miró Recasens R, Martínez A. (2004) Characterization and Design of Hot-Recycled Bituminous Mixtures. *Use of the Recycled Materials in Building and Structures – RILEM 2004*. Barcelona, España
15. Kamyar C.M, *et al.* (2004) Evaluation of temperature responses in concrete pavement. *Journal of transportation engineering* (ASCE). pp. 395-401