

El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación

El módulo dinámico es una de las propiedades más importantes de la mezcla bituminosa. En este artículo se resalta la importancia de esta variable en el diseño analítico y en la auscultación estructural de los firmes, y su utilidad como especificación fundamental en el diseño de mezclas bituminosas. Se analiza la dependencia conjunta de la temperatura y la frecuencia y se introduce la expresión sigmoïdal de la curva maestra. Se presentan así mismo los resultados de la evaluación de los modelos predictivos de Witczak y de Hirsch para una serie de mezclas bituminosas típicamente empleadas en España en capas de base e intermedias. Finalmente, se propone un modelo empírico que permite estimar el módulo dinámico a partir del contenido de huecos de la mezcla bituminosa y de la viscosidad del betún a 20 °C.

Palabras clave: mezcla bituminosa; módulo dinámico; diseño mecánico-empírico; curva maestra.

The dynamic modulus is one of the most significant properties of bituminous mixes. This paper highlights the importance of this variable in analytical design and structural monitoring of pavements, and its utility as fundamental specification in the design of bituminous mixes. The joint planning of temperature and frequency is being analyzed and the sigmoïdal function of the master curve is being introduced. At the same time, the results of the predictive models of Witczak and Hirsch are presented as to a series of bituminous mixes typically employed in Spain in base and sub-base courses. And finally, this paper proposes an empirical model which allows the estimation of the dynamic modulus based on the voids content of the bituminous mix and bitumen viscosity at 20°C.

Palabras clave: bituminous mix; dynamic modulus; mechanistic-empirical design; master curve.

Ángel Mateos Moreno, angel.mateos@cedex.es
Centro de Estudios del Transporte del CEDEX

Jorge B. Soares, jsoares@det.ufc.br
Universidade Federal do Ceará

1. Introducción

El módulo dinámico, E^* , es una de las propiedades más relevantes de la mezcla bituminosa, ya que determina su respuesta tenso-deformacional frente a acciones termo-mecánicas externas. Se define como la relación entre los picos de tensión y deformación bajo carga armónica (Fig. 1). Puede emplearse para predecir la respuesta estructural del pavimento frente a las cargas del tráfico, así como las tensiones desarrolladas bajo deformaciones impuestas por los agentes ambientales y los asientos de las capas subyacentes. La práctica totalidad de los métodos de diseño analítico de firmes se ba-

san en esta variable (1) (2), en particular los procedimientos mecánico-empíricos recursivo-incrementales de última generación como AASHTOWare Pavement ME Design (3), típicamente conocido como MEPDG, y CalME (4). En línea con esta relevancia, el módulo dinámico es una de las especificaciones de tipo fundamental contempladas por la UNE-EN

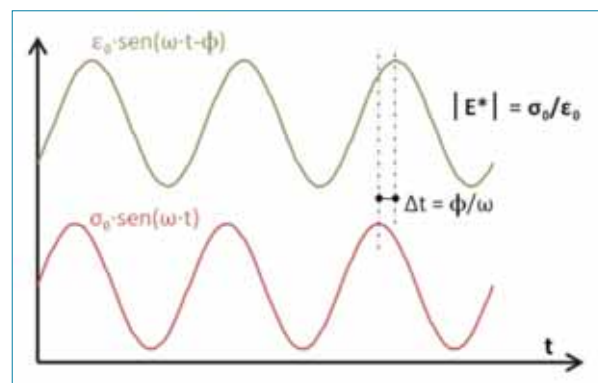


Fig. 1. Módulo dinámico de la mezcla bituminosa, E^* .

El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación

13108-1 (5) para las mezclas del tipo hormigón bituminoso y además es uno de los ensayos candidatos para complementar al diseño volumétrico de Superpave (6).

Objetivo

El presente artículo tiene como fin resaltar la importancia del módulo dinámico de la mezcla bituminosa y dar unas directrices generales que faciliten su evaluación en laboratorio y su empleo en la práctica diaria del diseño de firmes.

2. Importancia del módulo dinámico de la mezcla bituminosa

2.1 Importancia del módulo dinámico en el marco del diseño analítico

El diseño analítico concibe al firme como una estructura multicapa sometida a las cargas del tráfico y a los agentes ambientales. Las tensiones y deformaciones calculadas bajo los ejes de los vehículos pesados se emplean para estimar la vida de servicio de cada material mediante la aplicación de un modelo de deterioro, tal como refleja el esquema de la Fig. 2, representativo de un firme flexible. El cálculo de la respuesta estructural se realiza típicamente mediante un modelo elástico lineal. Este modelo define la rigidez de las capas mediante el correspondiente módulo de Young, para el que se emplean los valores más representativos de cada material teniendo en cuenta el nivel tensional, la velocidad de aplicación de la carga y la tem-

peratura. Los valores más empleados para las mezclas bituminosas son los módulos dinámicos a una frecuencia representativa de la velocidad de circulación del tráfico pesado, típicamente del orden de 10 Hz. Es costumbre en España el empleo de módulos que van desde los 4000 MPa de las mezclas drenantes y discontinuas hasta los 11000 MPa de las mezclas de alto módulo, pasando por los 5000-7000 MPa de las mezclas tipo hormigón bituminoso gruesas, semidensas y densas (7). No es habitual considerar la influencia del tipo de betún en la rigidez (por ejemplo, 50/70 versus 35/50), probablemente debido a la falta de herramientas prácticas para ello.

La importancia del módulo dinámico en los procedimientos analíticos de última generación va aún más allá, ya que no sólo se emplea para predecir la respuesta del firme bajo las cargas del tráfico, sino que interviene directamente en los modelos de deterioro. Además, en mayor o menor medida, tanto MEPDG como CalME consideran al módulo dinámico como una variable que evoluciona durante la vida de servicio a consecuencia del envejecimiento del betún y de la fatiga y densificación de la mezcla bituminosa bajo las cargas del tráfico (8). Ambos procedimientos requieren la definición de la curva maestra del módulo dinámico de las mezclas empleadas en el pavimento, lo que permite determinar su rigidez para cualquier combinación de frecuencia y temperatura. Téngase en cuenta que la naturaleza incremental de estos procedimientos de diseño implica el cálculo de la respuesta estructural bajo condiciones cambiantes de temperatura (a lo largo del día y a lo largo del año) y para diferentes velocidades de circulación del tráfico pesado.

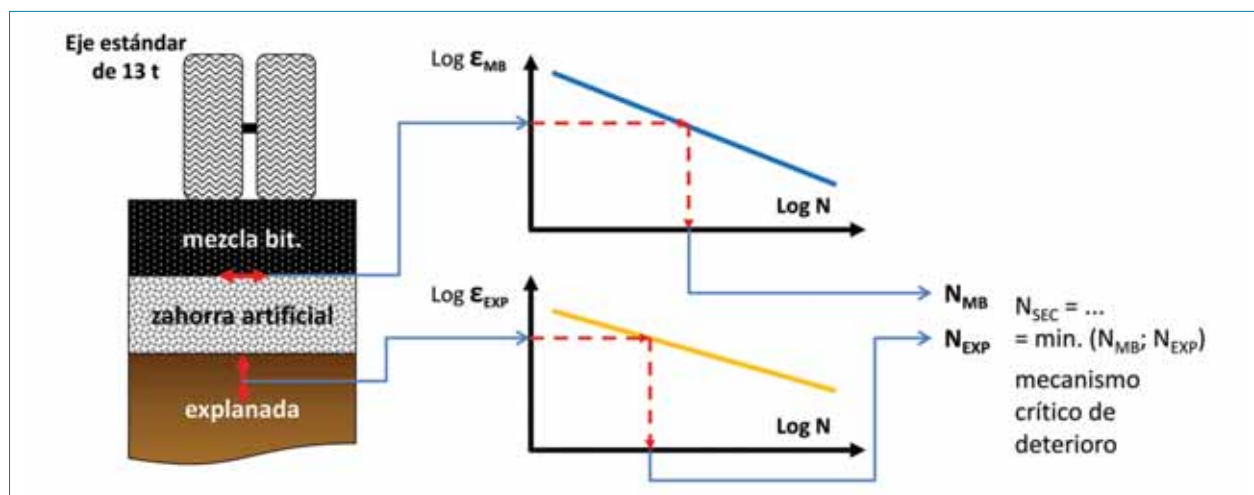


Fig. 2. Planteamiento del diseño analítico convencional de un firme flexible.

2.2 Importancia del módulo dinámico en el marco del diseño de mezclas bituminosas

El ensayo de módulo dinámico es uno de los recomendados a resultas del proyecto NCHRP 9-19 "Superpave Support and Performance Models Management" (9) para complementar al procedimiento Superpave de diseño de mezclas bituminosas. La mayor limitación de este procedimiento es, precisamente, la ausencia de un ensayo mecánico relacionado con el comportamiento de la mezcla en servicio, al estilo del ensayo de estabilidad y flujo Marshall. Otros ensayos recomendados en el marco del proyecto NCHRP 9-19 fueron el Flow Number y el Flow Time (10), en relación con las roderas, y el ensayo de rotura en tracción indirecta, en relación con la fatiga. El módulo dinámico fue recomendado en relación con ambos mecanismos de deterioro, si bien parece claro que es su correlación con las roderas que se desarrollan a alta temperatura lo que hace de este ensayo uno de los más relevantes en el diseño de las mezclas bituminosas. También parece claro que, a día de hoy, uno de los mayores obstáculos para su implementación práctica es la ausencia de unos valores de referencia exigibles, sí disponibles para otros ensayos alternativos como los dos citados anteriormente, Flow Number y Flow Time, la rueda de Hamburgo o el Asphalt Pavement Analyzer (11). Uno de los hitos más relevantes en el empleo del módulo dinámico como especificación relacionada con el comportamiento (performance related specification), es el software E* SPT SpecificationCriteria Program (12). Este software emplea el modelo de roderas de MEPDG, en base al cual establece el módulo mínimo que ha de tener una mezcla bituminosa con el fin de limitar este mecanismo de deterioro a un valor predeterminado. El software tiene en cuenta las condiciones climáticas de la carretera, el tráfico previsto y el espesor de mezclas bituminosas del pavimento.

En el marco de la normativa europea, el ensayo de módulo dinámico es uno de los requisitos de tipo fundamental contemplados para los hormigones bituminosos. Sin embargo, la temperatura para la cual se establece su determinación en la UNE-EN 13108-20:2007 (13), 15 ó 20 °C, resulta demasiado baja como para reflejar la susceptibilidad a las roderas y, probablemente, demasiado alta como para reflejar la susceptibilidad a la fatiga. En este marco, su aplicación más oportuna parece en relación con la definición de un tipo específico de mezcla bituminosa, más que en relación con un mecanismo de deterioro en

particular. Es el caso del requisito de módulo resiliente (pariente cuasi-empírico del módulo dinámico) recogido por el art. 542 del PG-3 (14) para las mezclas de alto módulo.

2.3 Importancia del módulo dinámico en el marco de la auscultación de firmes

La deflexión de un firme bajo una carga predeterminada depende no sólo de la rigidez del pavimento bituminoso, sino también de la rigidez del resto de las capas del firme y la explanada. No obstante, la elevada rigidez de la mezcla bituminosa en comparación con los suelos y los materiales granulares, así como su ubicación superficial, hacen que la deflexión de los firmes se vea especialmente influenciada ésta, más que por cualquier otro material, quizá con la excepción de las capas tratadas con cemento. Así mismo, la mezcla bituminosa es el material del firme que más disminuye su rigidez como consecuencia del daño acumulado, quizá –nuevamente– con la excepción de las capas tratadas con cemento. Por ello, una correcta interpretación de la deflexión en las auscultaciones estructurales pasa por una estimación realista de las deflexiones del firme con un pavimento bituminoso sin fatigar. Se puede cuantificar el deterioro del pavimento a partir de la comparación de ambos valores de la deflexión (medida versus teórica sin fatiga) o, mejor aún, a partir de la comparación de la rigidez aparente del pavimento bituminoso con la que correspondería si las mezclas bituminosas no estuvieran fatigadas. La primera puede estimarse mediante las técnicas de cálculo inverso mientras que la segunda requiere conocer el módulo dinámico de las mezclas bituminosas para la frecuencia representativa de la carga aplicada por el deflectómetro. Se incluye a título de ejemplo la Fig. 3, que muestra

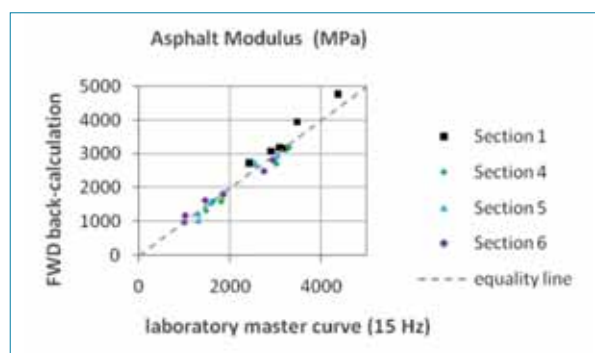


Fig. 3. Concordancia entre auscultación estructural y ensayos de laboratorio; figura tomada de (17).

El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación

la concordancia existente entre ambos valores en pavimentos sin fatigar. De ahí la importancia del módulo dinámico de las mezclas bituminosas y el interés en poder estimarlo con cierta fiabilidad.

3. Manejo práctico del módulo dinámico

El módulo dinámico depende de la temperatura de la mezcla bituminosa y de la frecuencia de la carga aplicada. Esta doble dependencia haría engorroso su manejo si no fuera porque, en realidad, ambas variables tienen un efecto equivalente sobre la rigidez: un aumento de la frecuencia es equivalente a una disminución de la temperatura y viceversa. Esta equivalencia, recogida en el principio de superposición tiempo-temperatura, permite definir el módulo dinámico en términos de una única variable, la frecuencia reducida.

3.1 Principio de superposición del tiempo y la temperatura

La rigidez de las mezclas bituminosas disminuye al aumentar la temperatura y al disminuir la frecuencia de la carga aplicada. Este hecho es conocido desde hace décadas. También se conoce desde hace décadas la naturaleza reológica de este

material, que implica la existencia de una equivalencia entre ambas variables. En términos mecánicos, para la mezcla es indistinto aumentar (/reducir) la temperatura que comprimir (/extender) la escala temporal. Este hecho se muestra en el ejemplo de la Fig. 4, que refleja la deformación medida en una probeta de mezcla bituminosa bajo el mismo escalón de carga aplicado a distintas temperaturas. La deformación que experimenta la mezcla a 40°C (por ejemplo), es la misma que la que experimentaría a 20°C si comprimiésemos la escala de tiempo dividiéndola por aproximadamente 20. Del mismo modo, la que experimenta a 10°C es la que experimentaría a 20°C si expandiésemos la escala de tiempo multiplicándola por aproximadamente 10. El factor de escala temporal, a_T , es conocido como factor de correspondencia tiempo-temperatura, y es una función que depende únicamente de la temperatura y es característica de cada mezcla bituminosa. La variable tiempo pasa a denominarse “tiempo reducido” tras la aplicación del factor a_T : $t_{red} = t/a_T$. Esta variable puede interpretarse como el tiempo desde el punto de vista del reloj interno de la mezcla bituminosa. Para este material, el tiempo corre muy despacio a altas temperaturas y muy rápido a bajas temperaturas; por eso en el primer caso tiene más tiempo para deformarse que en el segundo, lo que para un observador externo –nosotros– se interpreta como una menor rigidez.

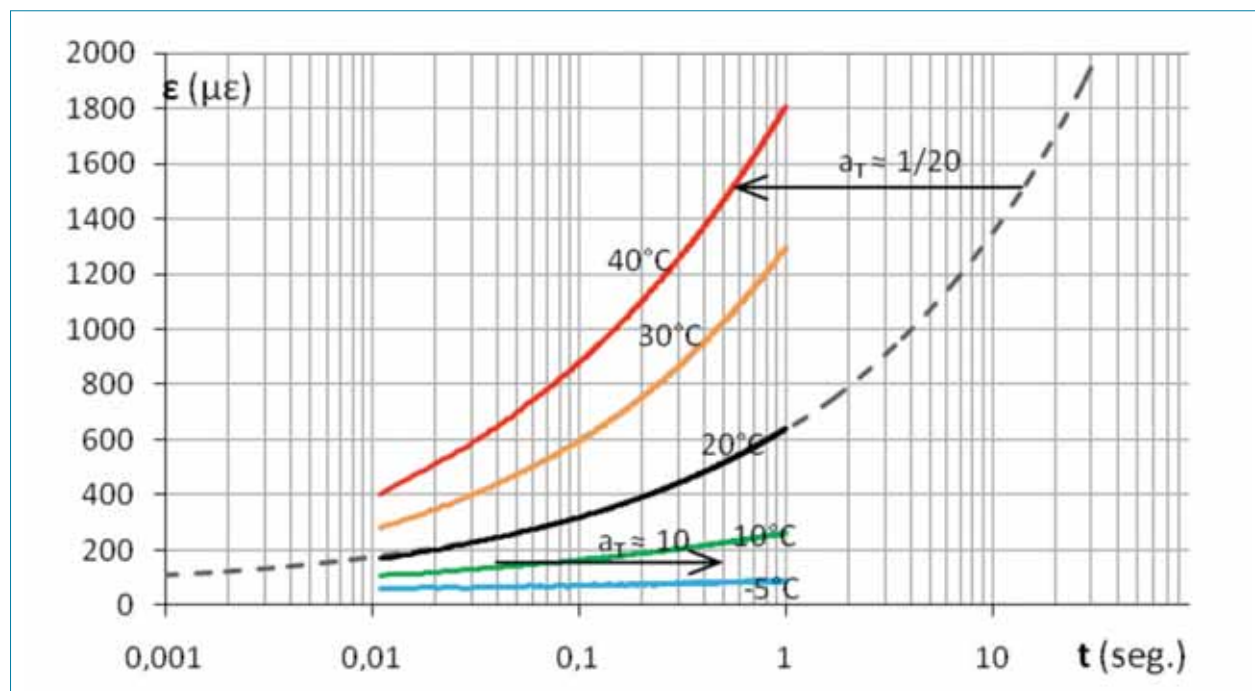


Fig. 4. Ensayo de fluencia a distintas temperaturas.

3.2 La curva maestra del módulo dinámico

El ejemplo de la Fig. 5 muestra el módulo dinámico medido en una probeta de mezcla bituminosa a diferentes temperaturas y frecuencias. Los datos reflejan la susceptibilidad de este material respecto a ambas variables, temperatura y frecuencia. El principio de correspondencia tiempo-temperatura también puede apreciarse en esta figura. Téngase en cuenta que una extensión o una compresión de la escala temporal implica un desplazamiento en la escala logarítmica, y por eso los conjuntos de módulos medidos a las diferentes temperaturas pueden desplazarse horizontalmente hasta converger en una única curva, la curva maestra del módulo dinámico. Ésta es, en definitiva, el módulo dinámico de la mezcla bituminosa a una temperatura de referencia que, normalmente, es de 20°C. Se han propuesto diferentes expresiones para la misma, si bien la más ampliamente aceptada es la expresión sigmoideal reflejada en la ecuación [1]. Nótese que la frecuencia reducida es, simplemente, el resultado de aplicar el principio de correspondencia tiempo-temperatura a la frecuencia real: $f_{red} = f \cdot a_T$.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot \log(f_{red})}} \quad [1]$$

siendo,

- f_{red} : frecuencia reducida $\log(f_{red}) = \log(f) + \log(a_T)$
- f : frecuencia (Hz)
- a_T : factor de correspondencia tiempo-temperatura; 20°C es la temperatura de referencia, T_{ref} , para la cual $a_T = 1$
- δ α β γ : parámetros del modelo

Nota: log se refiere a logaritmo decimal

Cada uno de los parámetros de la curva maestra tiene un significado físico (Fig. 6). δ representa el módulo mínimo de la mezcla bituminosa (10^δ), esto es, la asíntota inferior de la curva. $\delta + \alpha$ representa el módulo máximo ($10^{\delta + \alpha}$), la asíntota superior. β , conocido como parámetro de localización, determina la posición horizontal del punto de inflexión de la curva sigmoideal. Finalmente, γ representa la pendiente máxima de la curva, que tiene lugar en el punto de inflexión. Respecto al factor a_T , se han propuesto dife-

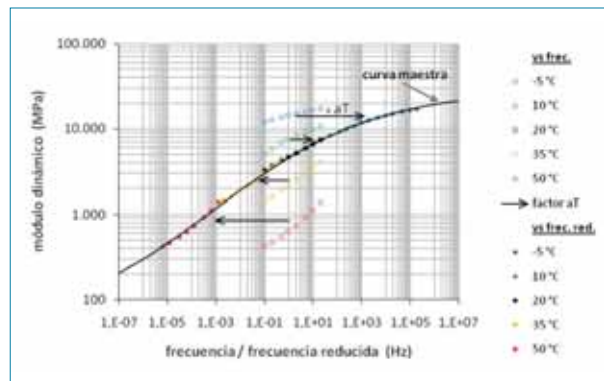


Fig. 5. Determinación de la curva maestra del módulo dinámico.

rentes expresiones, algunas basadas en las fórmulas de Arrhenius y Williams-Landel-Ferry. No obstante, en la práctica se obtienen los mismos resultados empleando una sencilla expresión log-lineal, $\log(a_T) = k \cdot (T - T_{ref})$, que depende de un único parámetro, k . Este parámetro se obtiene, junto con los cuatro de la curva maestra, mediante un proceso iterativo cuyo fin es la minimización del error de ajuste (véase Fig. 5). La herramienta Solver de Excel resulta idónea para ello. Este procedimiento resulta mucho más sencillo que el recogido en la norma UNE-EN 12697-26:2012 (15), anexo G. Además, la formulación de la curva maestra en el dominio de la frecuencia presenta dos grandes ventajas frente a la formulación en el dominio de la temperatura que emplea la norma EN: la primera es la bondad del ajuste alcanzado sistemáticamente con la función sigmoideal y la segunda es el claro significado físico de los parámetros de dicha función. Exactitud y simplicidad, en definitiva, es lo que persigue la formulación sigmoideal en términos de la frecuencia reducida.

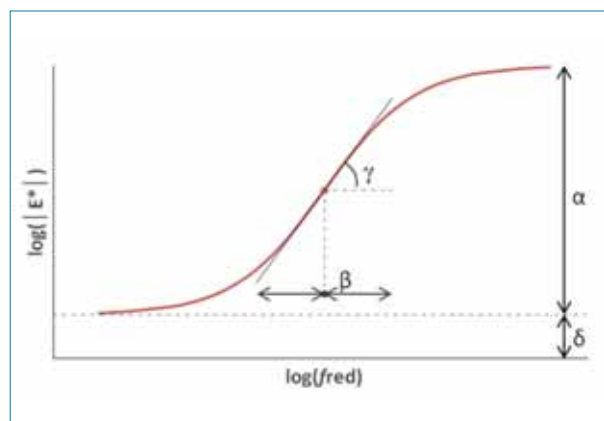


Fig. 6. Curva maestra del módulo dinámico.

El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación

4. Medida del módulo dinámico en laboratorio

Existen dos normas de referencia para determinar el módulo dinámico de la mezcla bituminosa en el laboratorio: la EN 12697-26 y la AASHTO T342 (16). Esta última aplica una carga senoidal en compresión sobre una probeta cilíndrica, mientras que la norma europea contempla otras alternativas: flexión sobre diferentes tipos de probetas así como tracción-compresión sobre especímenes cilíndricos. El denominador común a todas las alternativas es la carga cíclica armónica. Es muy importante mantener el nivel de deformaciones lo más bajo posible en este ensayo, a ser posible no superar $\pm 35 \mu\epsilon$. La EN recomienda no superar $50 \mu\epsilon$, mientras que la AASHTO recomienda aplicar entre 50 y $150 \mu\epsilon$. De lo contrario, podríamos entrar en el rango de comportamiento no-lineal del material, donde el concepto de módulo dinámico no es aplicable, dañando al mismo tiempo la probeta por fatiga. Respecto al tipo de carga, parece claro que la opción de la norma europea sobre probetas cilíndricas, tracción-compresión, causa menos deterioro al material ya que las deformaciones no se van acumulando durante el ensayo, cosa que sí ocurre cuando la carga es de compresión. Otra diferencia importante entre ambas normas reside en el requisito de la norma AASHTO de esperar de 2 a 30 minutos entre el ensayo de dos frecuencias consecutivas. Ambas normas establecen rangos de frecuencias de ensayo de 0.1 a 25/50 Hz. En la práctica, conviene aplicar una serie de razón aproximada 2, empezando por 0.1 Hz y alcanzando el máximo posible compatible con la potencia de la máquina de ensayo; por ejemplo: 0.1 / 0.2 / 0.5 / 1 / 2 / 5 / 10 / 20 Hz. Respecto al rango de temperaturas, la norma AASHTO establece [-10;54 °C] y la norma EN [-15;30 °C], con el fin de determinar la curva maestra, en ambos casos a intervalos de unos 15 °C. Dicho intervalo parece razonable, ya que es conveniente que las series de módulos obtenidas a dos temperaturas consecutivas se solapen ligeramente al conformar la curva maestra (véase Fig. 5). Respecto al límite superior de 30 °C establecido por la norma EN, es debido a los problemas de fluencia y no linealidad que tienen lugar al superar la mezcla bituminosa dicha temperatura. Es claro que el módulo dinámico será una propiedad intrínseca del material sólo a temperaturas intermedias y bajas; a altas temperaturas, la relación entre los picos de tensión y deformación deja de ser una constante para pasar a depender del nivel tensional. No obstante, los traba-

jos desarrollados en la Pista de Ensayo de Firmes a Escala Real del CEDEX han mostrado una excelente concordancia entre la respuesta estructural medida en los firmes y la predicha empleando el módulo dinámico de la mezcla bituminosa incluso a temperaturas por encima de 40 °C. Dicha concordancia se manifestaba en términos de deflexión bajo la carga del deflectómetro de impacto (17) y en términos de respuesta estructural medida con sensores bajo el paso de los vehículos simuladores del tráfico (18).

La norma EN 12697-26, en su anexo F, contempla la posibilidad de determinar el módulo dinámico a partir del ensayo de tracción indirecta. Es preciso resaltar que la fórmula empleada en este ensayo, $E^* = F \cdot (u + 0.27) / (z \cdot b)$, implica tener que asumir el coeficiente de Poisson, ν . Esto podría parecer relativamente simple, de hecho la propia norma recomienda un valor de 0.35 en caso de no medirlo, pero en realidad es mucho más complejo. Como mínimo, ν dependerá de la temperatura y de la frecuencia. Además, resulta casi inevitable dañar por fatiga al espécimen en este ensayo, lo que se puede traducir en coeficientes de Poisson incluso por encima de 0.5. La dilatación que experimentan los materiales con fuerte esqueleto mineral, como las mezclas bituminosas, al ser sometidos a niveles tensionales relativamente altos implica del mismo modo coeficientes de Poisson mucho más elevados de lo que cabría esperar de un material elástico. De esta forma, al asumir $\nu = 0.30 - 0.35$, tal como se hace habitualmente, se tiende a infraestimar el módulo del material.

5. Estimación del módulo dinámico

No es habitual disponer de la curva maestra de las mezclas empleadas en un pavimento, ya que se trata de un ensayo relativamente costoso. Por otro lado, en el campo del diseño analítico de firmes se requiere el empleo del módulo dinámico antes de la construcción del propio pavimento o refuerzo. Por ello, diferentes autores han propuesto modelos que permiten estimar esta propiedad de las mezclas bituminosas a partir de su composición y de las propiedades mecánicas de sus constituyentes, esqueleto mineral y betún.

5.1 Modelos de estimación del módulo dinámico

Probablemente el modelo más empleado a día de hoy sea el conocido como "ecuación predictiva del módulo dinámico de

El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación

Pc: factor de contacto del esqueleto mineral, obtenido mediante la siguiente ecuación (G^* en psi)

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{VFA \cdot 3 \cdot G^*}{VMA}\right)^{0.25}}{650 + \left(\frac{VFA \cdot 3 \cdot G^*}{VMA}\right)^{0.5}}$$

Nota: salvo por la expresión Pc, se trata de una ecuación adimensional

5.2 Modelo de estimación del módulo dinámico calibrado a partir de mezclas españolas

Todo modelo empírico –como los de Witczak– o semi-empírico –como el de Hirsch– requiere una evaluación previa antes de ser aplicado a unas condiciones distintas de aquéllas empleadas en su calibración. Dicha evaluación fue llevada a cabo para las mezclas bituminosas típicamente utilizadas en España en capas de base e intermedias (22). Esta evaluación mostró que el modelo de Witczak basado en G^* sobrestimaba el módulo dinámico en un 95% de media. Por el contrario, el error cuadrático medio de los modelos de Hirsch y de Witczak basado en η fue, respectivamente, del 20.6% y del 21.1%. Estos valores no son muy superiores a los obtenidos por los autores de los modelos en el propio proceso de calibración. No obstante, se observaba un patrón claro en dichos errores, de forma que ambos modelos infraestimaban el módulo dinámico para bajas frecuencias reducidas (altas temperaturas) mientras que el de Witczak, además, lo sobrestimaba a altas frecuencias reducidas (bajas temperaturas). Así mismo, se observaba una reducida sensibilidad respecto a la composición volumétrica de la mezcla bituminosa, aspecto ya mostrado por otras investigaciones (23). Otra limitación importante de ambos modelos es que requieren una información reológica del betún de la que habitualmente no se dispone en España: la viscosidad y el módulo de rigidez transversal, G^* , ambos en función de la temperatura. Por todo ello, Mateos y Soares (22) desarrollaron un nuevo modelo empírico, cuya expresión es la recogida en las ecuaciones [5]. Este modelo requiere una información mínima de la reología del betún. La calibración se realizó a partir de una base de datos que contenía los módulos dinámicos, medidos en compresión, de un amplio abanico de hormigones bituminosos típicamente empleados en España en capas de base e

intermedias. El modelo presentó un R^2 del 98.7% en la escala logarítmica (96.0% en la escala aritmética) y un error cuadrático medio del 12.5% en la escala aritmética.

$$\begin{aligned} \delta &= 1.572 \\ \alpha &= 2.894 \\ \beta &= 1.609 + 9.316 \cdot VA - 0.3352 \cdot \log(\eta_{ref}) \\ \gamma &= -0.2094 + 0.09201 \cdot \beta \\ \log(a_T) &= -0.1304 \cdot (T - 20) \end{aligned} \quad [5]$$

siendo,

δ α β γ : parámetros de la curva maestra, ecuación [1]; resulta E^* en MPa

VA: huecos de la mezcla, expresados como ratio

η_{ref} : viscosidad del betún en centipoises (cP) a 20 °C; en caso de no disponer de este dato, puede estimarse a partir de la penetración, P (mm/10), a 25°C, mediante la ecuación empírica:

$$\log(\eta_{ref}) = 12.91 - 2.412 \cdot \log(P) \quad [6]$$

T: temperatura (°C)

Nota: log se refiere a logaritmo decimal

Ejemplo de aplicación

Supongamos una mezcla semidensa genérica con betún 50/70. Ha de asumirse un contenido de huecos, por ejemplo del 5%, y una penetración del betún. Es preciso resaltar que la penetración del betún ha de ser la que corresponde a la mezcla bituminosa cuya rigidez se está estimando, no la del betún original. Si se trata de estimar la rigidez de la mezcla tras la construcción, se puede adoptar la penetración del betún tras el ensayo de envejecimiento rolling. Supongamos que sea éste el caso que nos ocupa. Si se asume una penetración inicial de 60 y una pérdida por envejecimiento durante la fabricación de la mezcla del 35% (la máxima pérdida que el art. 211 del PG-3 (24) permite para un betún 50/70 es del 47%), resulta una penetración de 39 mm/10. Aplicando la ecuación [6] resulta $\log(\eta_{ref}) = 9.072$. Si se tratase de estimar la rigidez de la mezcla envejecida, tras una serie de años en servicio, ha-

bríamos de suponer una pérdida adicional de penetración respecto a 39 mm/10. Continuando con el ejemplo que nos ocupa, podemos calcular los parámetros β y γ de la curva maestra: $\beta = 1.609 + 9.316 \cdot 0.05 - 0.3352 \cdot 9.072 = -0.9661$; $\gamma = -0.2094 + 0.09201 \cdot (-0.9661) = -0.2983$. Una vez conocidos los cuatro parámetros de la curva maestra, podemos obtener el módulo dinámico para cualquier combinación de frecuencia y temperatura. Por ejemplo, para 15 °C y 8 Hz.

$$\log(a_T) = -0.1304 \cdot (15 - 20) = +0.6520$$

$$\log(f_{red}) = \log(8) + 0.6520 = 1.555$$

$$\log(|E^*|) = 1.572 + \frac{2.894}{1 + e^{-2.3441 - 0.2283 \cdot 1.555}} = 3.907$$

$$|E^*| = 8075 \text{ MPa}$$

Corrección por huecos en el esqueleto mineral (VMA)

El esqueleto mineral de la mezcla bituminosa influye en el módulo dinámico, si bien los esfuerzos experimentales para relacionar las propiedades de dicho esqueleto (en particular su granulometría) con los parámetros de la curva maestra no han arrojado resultados concluyentes hasta la fecha. La única propiedad sobre la que existe unanimidad respecto a la forma en que influye sobre el módulo dinámico es el contenido de huecos en el esqueleto mineral (VMA): un mayor contenido de huecos resulta en un menor módulo y viceversa (21) (25). Para tener en cuenta esta variable en el marco de la fórmula predictiva de la ecuación [5], se propone emplear: $\alpha = 3.168 - 2.158 \cdot \text{VMA}$. Por ejemplo: si suponemos que el esqueleto mineral tiene un 13.5% de huecos, resulta $\alpha = 3.168 - 2.158 \cdot 0.135 = 2.877$. Manteniendo los parámetros δ , β y γ anteriores y aplicando de nuevo la ecuación [1], resulta un módulo de 7824 MPa. Como valores de referencia para VMA, pueden adoptarse los recomendados por Advanced Asphalt Technologies (11), que son reflejados en la Tabla 1. Los valores mínimos de esta tabla coinciden con los indicados por Superpave (AASHTO M323-13).

Corrección por susceptibilidad térmica del betún (VTS)

La base de datos empleada para la calibración de la ecuación [5] incluye betunes de los tipos 15/25, 50/70 y PMB

Tabla 1. Valores de referencia para VMA en mezclas tipo hormigón bituminoso.

Tamaño máximo nominal (mm)	Mínimo VMA	Máximo VMA
4.75	16%	18%
9.5	15%	17%
12.5	14%	16%
19	13%	15%
25	12%	14%
37.5	11%	13%

45/80-65 (antiguo BM-3c). Sin embargo, el rango de variación de la susceptibilidad térmica de dichos betunes fue relativamente estrecho, estando el parámetro VTS entre -2.85 y -2.75. VTS "viscosity temperature susceptibility" es la pendiente de la conocida relación lineal que existe entre el doble logaritmo de la viscosidad (cP) y el logaritmo de la temperatura en grados Rankine ($TR = 491.67 + 9/5 \cdot T^{\circ}C$). Con el fin de ampliar el campo de aplicación de la ecuación [5], se propone añadir el término "-0.1536 \cdot (VTSI - 2.824)" a la fórmula de γ . En caso de no disponer de datos de viscosidad a diferentes temperaturas, VTS puede estimarse a partir de la viscosidad a 20 °C (ecuación [6]) y asumiendo que la viscosidad para la temperatura de reblandecimiento (anillo y bola) del betún es de 13.000 Poises (26). Así por ejemplo, si la temperatura anillo y bola del betún del 50/70 anterior fuese de 50 °C y experimentase un incremento de 8 °C durante el proceso constructivo (el art. 211 del PG-3 limita este incremento a un máximo de 10 °C), obtendríamos $VTS = [\log(\log(13 \cdot 105)) - \log(9.072)] / [\log(491.67 + 9/5 \cdot 58) - \log(491.67 + 9/5 \cdot 20)] = -3.238$. Al calcular VTS se ha tenido en cuenta que a 20 °C, $\log(\eta) = 9.072$, y a 58 °C, $\eta = 13 \cdot 105$ cP. El nuevo parámetro γ valdría: $-0.2983 - 0.1536 \cdot (3.238 - 2.824) = -0.3619$. Ahora, el módulo dinámico, para 15 °C y 8 Hz, resulta 8638 MPa.

Es preciso indicar que ambas correcciones, en función de VMA y VTS, han sido establecidas ampliando la base de datos del módulo dinámico con mezclas y ensayos realizados en otros países. En particular, la corrección por huecos en el esqueleto mineral empleó ensayos realizados por Shen y Yu (25) en el estado de Washington, mientras que la corrección por susceptibilidad térmica empleó módulos dinámicos medidos en la Universidad Federal de Ceará (27). Es evidente

El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación

que la robustez de ambas correcciones para las mezclas españolas será inferior a la de la ecuación [5].

6. Conclusiones

El módulo dinámico es una de las propiedades más importantes de las mezclas bituminosas, ya que determina la respuesta tenso-deformacional de este material bajo las cargas del tráfico, los agentes ambientales y los asentamientos de las capas subyacentes. Constituye una variable necesaria en el diseño analítico de firmes, y una referencia de gran utilidad en el diseño de mezclas bituminosas y en la auscultación estructural de pavimentos.

La rigidez de las mezclas bituminosas depende de la temperatura y de la frecuencia, si bien ambas variables tienen un efecto equivalente. De esta forma, el módulo dinámico puede expresarse en función de una única variable, la frecuencia reducida, que engloba los efectos de temperatura y frecuencia. La expresión de esta dependencia se conoce como curva maestra del módulo dinámico, para la cual se emplea con frecuencia una función de tipo sigmoideal definida por cuatro parámetros.

El módulo dinámico puede medirse en laboratorio. Los ensayos más habituales son en compresión, de acuerdo con la norma AASHTO T 342, o en tracción-compresión, de acuerdo con la norma EN12697-26, ambos realizados sobre especímenes cilíndricos. No obstante, no es habitual disponer de la curva maestra medida en laboratorio, de forma que se han propuesto diferentes expresiones empíricas o semi-empíricas que permiten predecirla en función de las propiedades y proporciones de los materiales constituyentes de la mezcla bituminosa. Tres de los modelos predictivos más ampliamente aceptados son los de Witczak y el de Hirsch. El modelo de Witczak basado en el módulo de rigidez transversal del betún sobreestimó en un 95% el módulo dinámico de una serie de mezclas bituminosas típicamente empleadas en capas intermedias y de base en España. Por el contrario, el modelo de Hirsch y el de Witczak basado en viscosidad resultaron en predicciones razonables, con errores cuadráticos medios del orden del 20%. No obstante, ambos modelos mostraron patrones de error de tipo sistemático.

En este artículo se propone un modelo empírico que permite estimar el módulo dinámico de la mezcla bituminosa a partir del contenido de huecos y de la viscosidad del betún a 20 °C.

El modelo presentó un error cuadrático medio del 12.5%, y es aplicable a los hormigones bituminosos típicamente empleados en España en las capas intermedia y de base. Se incluyen así mismo correcciones para tener en cuenta el contenido de huecos en árido y la susceptibilidad térmica del betún.

Agradecimientos

Los estudios reflejados en este artículo conllevan una importante labor experimental de laboratorio. Los autores desean expresar su agradecimiento a los trabajadores que lo hicieron posible.

Referencias

- (1) Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía (2007). Consejería de Obras Públicas y Transportes.
- (2) Norma de secciones de firme de la Comunidad Valenciana (2009). Conselleria d'Infraestructures i Transport.
- (3) Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice (2008). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C.
- (4) CalME Version 1.0 (2010). California Department of Transportation, Sacramento.
- (5) UNE-EN 13108-1:2007. Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 1: Hormigón bituminoso.
- (6) Bonaquist, R. (2011). NCHRP Report 702: Precision of the Dynamic Modulus and Flow Number Tests Conducted with the Asphalt Mixture Performance Tester. Transportation Research Board.
- (7) Dimensionamiento analítico de firmes. Curso práctico (2010). CEDEX e Intevia. 5ª Edición.
- (8) Mateos, A., Ayuso, J. P., & Jáuregui, B. C. (2012). Evolution of Asphalt Mixture Stiffness Under Combined Effects of Damage, Aging, and Densification Under Traffic. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2304(1), 185-194.
- (9) Witczak, M.W., Kaloush, K.E., Pellinen, T., El-Basyouny, M., and Von Quintus, H. (2002). NCHRP Report 465: Simple Performance Test for Superpave Mix Design. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- (10) Witczak, M. (2005). NCHRP Report 547: Simple Performance Tests: Summary of Recommended Methods and

Database. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

- (11) Advanced Asphalt Technologies, LLC (2012). NCHRP Report, 673: A manual for the design of hot mix asphalt with commentary. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- (12) Witczak, M. (2005). NCHRP Report 580: Specification Criteria for Simple Performance Tests for Rutting. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- (13) UNE-EN 13108-20:2007. Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 20: Ensayos de tipo.
- (14) art. 542 PG-3. Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso.
- (15) UNE-EN 12697-26:2012. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez.
- (16) AASHTO T 342-11. Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures.
- (17) Mateos, A., Ayuso, J. P., Jáuregui, B. C., & Fernández, P. J. O. M. (2012). Lessons learned from the application of CalME asphalt fatigue model to experimental data from CEDEX test track. *Advances in Pavement Design through Full-scale Accelerated Pavement Testing*, 483.
- (18) Mateos, A., Ayuso, J. P., & Jáuregui, B. C. (2013). Evaluation of Structural Response of Cracked Pavements at CEDEX Transport Research Center Test Track. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2367(1), 84-94.
- (19) Andrei, D., Witczak, M. W., & Mirza, M. W. (1999). Development of a revised predictive model for the dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures. Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP.
- (20) Bari, J., & Witczak, M. W. (2006). Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures (With Discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 75.
- (21) Christensen Jr, D. W., Pellinen, T., & Bonaquist, R. F. (2003). Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 72.
- (22) Mateos Moreno, A., & Soares, J. B. (2015). Validation of a dynamic modulus predictive equation on the basis of Spanish asphalt concrete mixtures. *Materiales de Construcción*, Vol. 65, Issue 317.
- (23) Schwartz, C. W. (2005). Evaluation of the Witczak dynamic modulus prediction model. *Proceedings of the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC (No. 05-2112).
- (24) art. 211 PG-3. Betunes asfálticos.
- (25) Shen, S., & Yu, H. (2011). An investigation of dynamic modulus and flow number properties of asphalt mixtures in Washington state. *United States Department of Transportation*, Washington, D.C.
- (26) Mirza, M. W., & Witczak, M. W. (1995). Development of a Global Aging System for Short and Long Term Aging of Asphalt Cements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 64.
- (27) Onofre, F. C. (2012). Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente. M.SC. Thesis. Universidade Federal do Ceará.

#14

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

**“Las mezclas bituminosas han permitido construir y conservar carreteras durante décadas de forma cada vez más eficiente”
(Alberto Bardesi; carta de presentación de Eurobitume)**

#HECHOS_ECONÓMICOS