

Estudio de los coeficientes de fatiga obtenidos según norma UNE-EN 12697-24 Anexo D

Study of the Coefficients of Fatigue Obtained According to European Standard EN 12697-24 Annex D

Jose Orencio Marrón Fernández^{1*}, Julián García Carretero², Rafael Jiménez Sáez³

Resumen

El ensayo de fatiga tiene por objeto determinar la resistencia de la mezcla bituminosa al inicio de fisuras originadas por el tráfico. Se estudian los procesos de microfisuración bajo cargas repetidas de intensidades inferiores a las de rotura, que producen un agotamiento progresivo.

En España solo hay prescripción para las mezclas de alto módulo recogida en el artículo 542 del PG-3, que señala un mínimo de 100 microdeformaciones para un millón de ciclos en el ensayo realizado a 20 °C y 30 Hz según el Anexo D de la norma UNE-EN 12697-24.

La norma referida describe el ensayo de flexión en 4 puntos sobre probetas prismáticas y la ley de fatiga se obtiene realizando varios ensayos sobre diferentes probetas del mismo material

Los resultados se representan mediante una regresión lineal entre logaritmos neperianos de la vida útil y los logaritmos neperianos de la amplitud de deformación inicial, obteniéndose dos coeficientes p y q para cada mezcla bituminosa y condición de ensayo.

En el Centro de Estudios del Transporte se han realizado 64 estudios de fatiga en 4 puntos con diversas mezclas bituminosas y en diferentes condiciones de ensayo. En ellos se ha verificado una elevada correlación entre ambos parámetros obtenidos en las leyes de fatiga.

Palabras clave: coeficientes, fatiga, 4 puntos, mezcla bituminosa.

Abstract

The fatigue test aims to determine the resistance of bituminous mixture at the moment when cracks caused by traffic begin to appear. The test studies processes of microcracks under repeated loads of intensities below the failure, which produce a progressive weakening.

In Spain there are only prescriptions for high modulus mixtures, collected in article 542 of the PG-3, a minimum of 100 microdeformations through interpolation at one million cycles for the following test configuration; 20 °C and 30 Hz, according to UNE-EN 12697-24 Annex D.

The standard referred describes the four-point bending test using prismatic shaped specimens. Fatigue relationships are obtained by doing several tests over different specimens of the same material.

The results of fatigue tests are expressed in terms of the number of cycles for the tensile strain level applied. Out of the statistical analysis of the former data, two constants p and q are obtained for each bituminous mixture and for each test condition.

At Centro de Estudios del Transporte, 64 four-point bending tests have been done with various bituminous mixtures and different test conditions, therein has been verified a high correlation between both parameters obtained in the fatigue life laws.

Keywords: coefficients, fatigue, 4 points, bituminous mixture.

1. CONSIDERACIONES GENERALES

Las mezclas bituminosas se proyectan para construir las distintas capas del firme con dos propiedades fundamentales, por un lado las que tienen que ver con resistir los efectos destructivos del tráfico y de los agentes ambientales y, por otro lado, las relacionadas con la seguridad y el confort.

Entre las primeras se encuentran: estabilidad para resistir sin deformación las cargas del tráfico, flexibilidad

para adaptarse sin rotura a las deformaciones de las capas inferiores, durabilidad para conservar todas estas características a lo largo del tiempo, y resistencia a fatiga para resistir sin rotura la repetición de cargas.

El ensayo de fatiga tiene por objeto determinar la resistencia de la mezcla bituminosa al inicio de fisuras originadas por el tráfico y se aplica a las mezclas que se emplean en capa de base.

Consiste en someter una probeta de mezcla bituminosa a la acción de una sollicitación periódica, de modo que en determinadas zonas de la probeta se produzcan tensiones de tracción y deformaciones elásticas de extensión. Estas tensiones de tracción periódicas producen daños acumulativos en la mezcla bituminosa, que se manifiestan como microfisuras y fisuras.

La ley de fatiga se obtiene realizando varios ensayos de fatiga sobre diferentes probetas del mismo material. El

* Autor de contacto: jmarron@cedex.es

¹ Licenciado en Ciencias Químicas. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX.

² Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX.

³ Licenciado en Ciencias Químicas. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX.

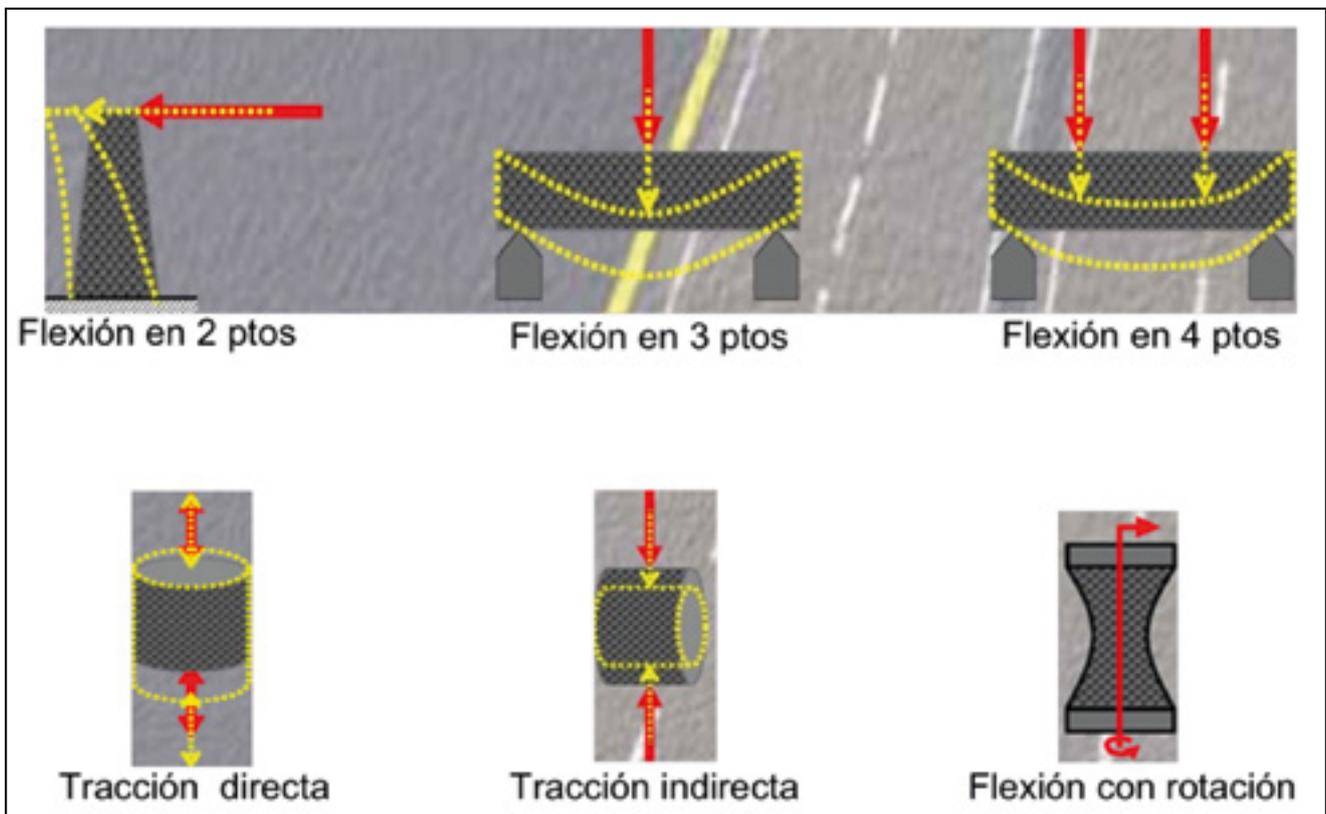


Figura 1. Diferentes métodos para evaluar resistencia a fatiga (original Andrea Simone).

ensayo concluye cuando se estima que los daños ocasionados en la probeta están próximos a producir su agrietamiento y rotura. La ley de fatiga relaciona la intensidad de la sollicitación con el número de ciclos que produce el fin de cada ensayo.

La definición de un ensayo de fatiga plantea la elección de las condiciones en que se puede realizar. Las principales condiciones de ensayo a elegir son: la forma de la probeta, su dispositivo de fijación, el tipo de sollicitación al que se somete, la temperatura de la mezcla bituminosa ensayada, la frecuencia de ensayo, el criterio que se adopta para el momento en que se considera fatigada la probeta, la ecuación a emplear para obtener la ley de fatiga.

La forma más empleada de probeta es una viga prismática, la sujeción puede ser con dos apoyos en los extremos de la viga aplicando la carga en el punto central (3 puntos de fijación) o en dos puntos centrales (4 puntos de fijación). También se puede empotrar la viga en un extremo y aplicar la carga en el otro extremo (2 puntos de fijación), en este caso la forma de la viga es trapezoidal. En el caso de utilizar una probeta cilíndrica, esta se somete a una carga de compresión diametral o bien a tracción directa. En la figura 1 aparecen los diferentes métodos.

La sollicitación que actúa sobre la probeta se compone de un proceso de carga y otro de descarga que se denomina pulso de carga, la forma es normalmente una onda sinusoidal continua o media onda sinusoidal. Tras la descarga puede seguir o no un periodo de reposo. Un ensayo constará de la aplicación de varios ciclos de carga.

En el ensayo intervienen como factores más importantes:

- La mezcla bituminosa, contenido y tipo de ligante, tipo de árido y granulometría, contenido de huecos.
- Compactación y fabricación de probetas.

- Diferentes métodos de ensayo, modo de carga, onda, períodos de descanso, frecuencia.
- Efecto de la temperatura y de la humedad.

La ley de fatiga se obtiene realizando varios ensayos sobre diferentes probetas del mismo material, el ensayo concluye cuando se estima que los daños ocasionados en la probeta están próximos a producir su agrietamiento y rotura. Relaciona la intensidad de la sollicitación con el número de ciclos que produce el fin de cada ensayo. Igualmente se usa la relación energía disipada con número de ciclos a rotura que tiene la ventaja de tener en cuenta los efectos viscoso y elástico para predecir la resistencia a fatiga de la mezcla.

Se representa relacionando el número de ciclos (N_f) frente a deformación inicial (ϵ_o) con dos coeficientes que dependen del material, ecuaciones [1] y [2].

$$N_f = K_1(1 / \epsilon_o)^{K_2} \quad [1]$$

o bien

$$\ln N_f = q + p \ln \epsilon_o \quad [2]$$

En ocasiones se añade un término de módulo dinámico de la mezcla (E^*) para tener en cuenta el efecto de frecuencia y temperatura; también se pueden añadir otros términos para considerar el contenido de betún y contenido de huecos, ecuación [3].

$$N_f = K_1(1 / \epsilon_o)^{K_2}(E^*)^b \quad [3]$$

Diversos autores han constatado la relación existente entre los coeficientes K_1 y K_2

- Cooper y Pell ecuación [4]
 $K_2 = 0,5 - 0,313 \log K_1$ [4]
- Ghuzlan y Carpenter ecuación [5]
 $K_2 = 1,1857 - 0,3269 \log K_1$ [5]
- Mello ecuación [6]
 $K_2 = 1,4816 - 0,121 \ln K_1$ [6]
- Pais ecuación [7]
 $K_2 = -0,6815 + 0,1325 \ln K_1$ [7]
- Way ecuación [8]
 $3,21K_2 = -4,674 + \log K_1$ [8]

El ensayo empleado fue en todos los trabajos fatiga en 4 puntos realizado a 20 °C y 10 Hz con control de deformación.

2. NORMA DE ENSAYO

La norma de fatiga seguida en este estudio es la UNE-EN 126974-24 Anexo D "Ensayo de flexión en 4 puntos sobre probetas prismáticas". Se caracteriza el comportamiento de las mezclas bituminosas sometidas a carga de fatiga en un equipo de ensayo de flexión en cuatro puntos, en el que las mordazas interiores y las exteriores están colocadas simétricamente, utilizándose probetas rectangulares esbeltas.

La flexión se debe realizar por aplicación de la carga en dos puntos interiores, en sentido vertical y perpendicularmente al eje longitudinal de la probeta. Se debe fijar la posición vertical de los soportes de extremo. Esta configuración de carga debe crear un momento constante, y por tanto, una deformación constante entre las dos mordazas interiores. La carga aplicada debe ser sinusoidal y la medición de la fuerza se debe realizar en la zona intermedia entre las dos mordazas interiores. El detalle del dispositivo empleado se muestra en la figura 2.

La medición del desplazamiento se debe realizar sobre la superficie superior o la inferior de la probeta entre las dos mordazas interiores. La fuerza, el desplazamiento y el desfase se deben registrar después de 100 ciclos y luego de una forma regular. El ensayo de fatiga se debe continuar hasta que el módulo calculado haya bajado hasta la mitad de su valor inicial o hasta la rotura de la probeta.

La línea de fatiga se dibuja haciendo una regresión lineal entre los logaritmos neperianos de la vida útil (N_f) para el criterio de fallo elegido y el conjunto de condiciones de ensayo y los logaritmos neperianos de la amplitud de deformación inicial (ϵ_o , amplitud de deformación en el ciclo número 100 expresada como $\mu\text{m}/\text{m}$), la ecuación tendrá la siguiente forma en ecuación [9]:

$$\ln N_f = q + p \ln \epsilon_o \quad [9]$$

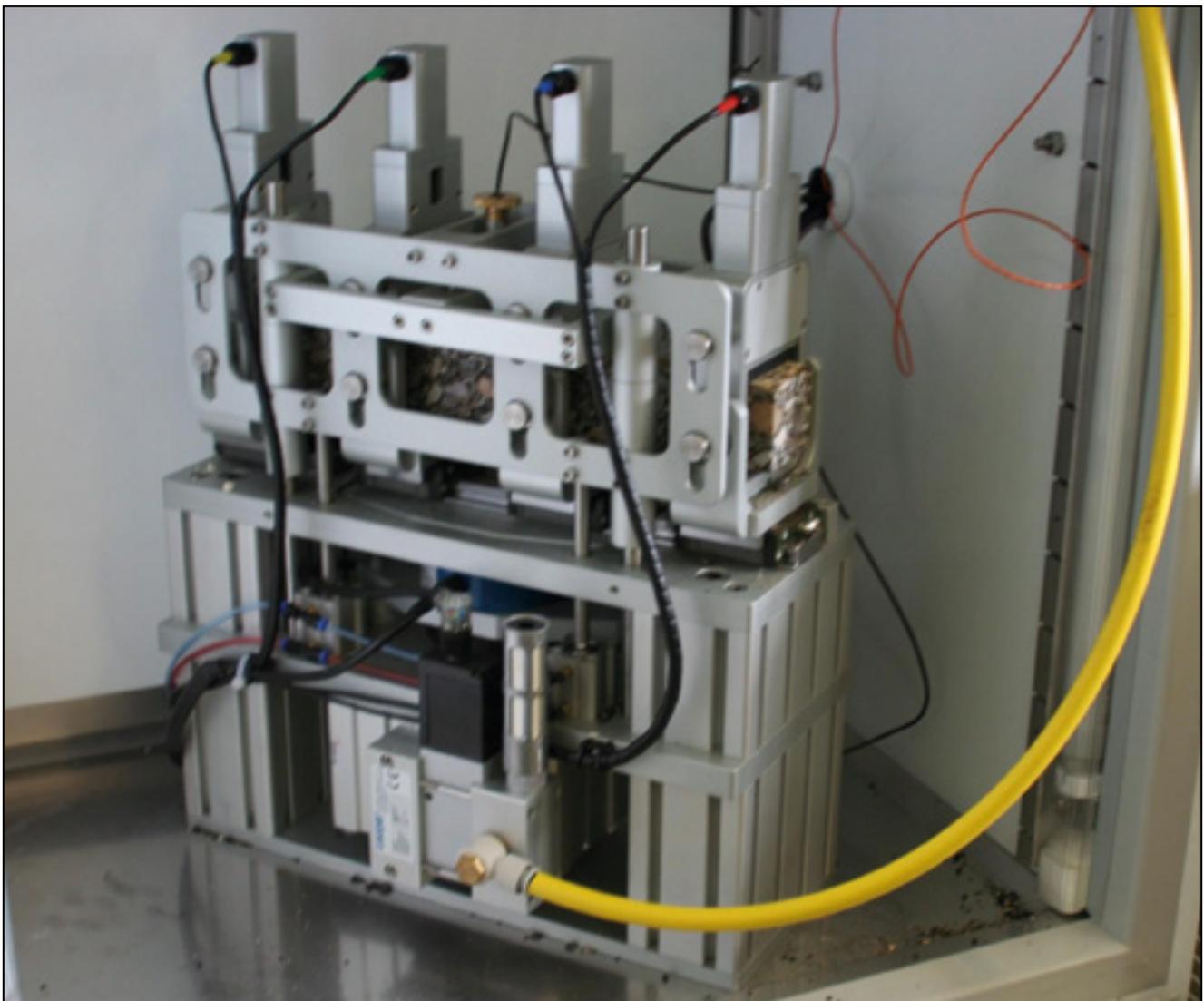


Figura 2. Equipo del CET para medida de resistencia a fatiga en 4 puntos.

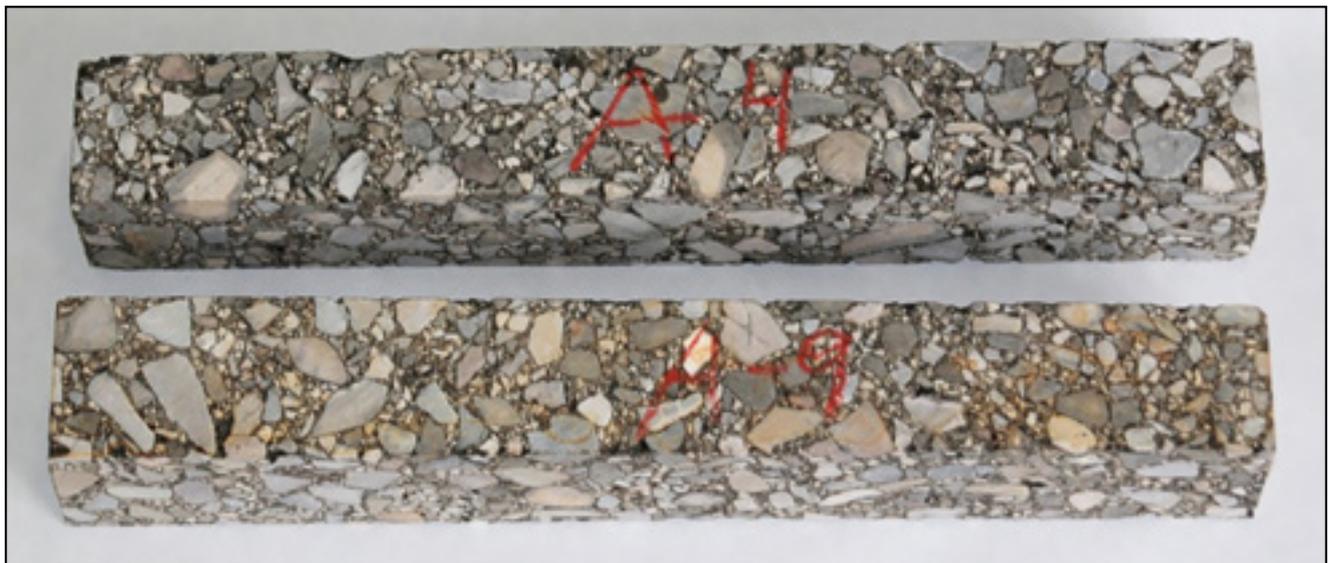


Figura 3. Probetas cortadas para ensayo de fatiga.



Figura 4. Dispositivo de ensayo para resistencia a fatiga en cuatro puntos.

Se calculan los valores de p , q y la deformación inicial (ϵ_6) para la que se puede esperar una vida a fatiga de un millón de ciclos para el conjunto de condiciones de ensayo estipulado. Con este parámetro se realiza la valoración simplificada de la resistencia al agrietamiento por fatiga de una mezcla bituminosa en ecuación [10].

$$\epsilon_6 = e^{(((\ln 1000000) - q) / (p))} \quad [10]$$

Las probetas que se vayan a ensayar se obtienen del aserrado de capas de la carretera o de placas preparadas en laboratorio, figura 3, que se compactan según la norma UNE-EN 12697-33 “Elaboración de probetas con compactador de placa”. El eje longitudinal de la probeta debe ser paralelo al eje de compactación y se aplican cargas de magnitud variable mediante un rodillo de acero de sector circular, haciendo pasadas a velocidad constante.

La anchura y la altura de la probeta deberán ser al menos 2,5 veces más grandes que el tamaño máximo nominal D del árido en la mezcla, además la longitud efectiva entre las mordazas exteriores deberá ser al menos seis veces el valor máximo de anchura y/o altura. Las probetas se deben ensayar cuando haya transcurrido un tiempo comprendido entre 2 y 8 semanas desde la fecha de corte.

Para la realización del ensayo debe utilizarse una cámara termostática que debe estar ventilada y ser capaz de fijar la temperatura media a 10 mm de las probetas con una precisión de ± 1 °C. La cámara debe regularse con una precisión de 0,5 °C y el tiempo de climatización no debe ser superior a las 6 horas y mínimo de 2 horas. Se ha empleado un equipo servoneumático que se muestra en la figura 4.

3. MATERIALES EMPLEADOS

Se han realizado 64 ensayos de fatiga de 55 mezclas bituminosas diferentes, 23 de las cuales se fabricaron en el laboratorio y el resto en diferentes plantas de fabricación a escala industrial.

En su mayoría, la compactación de las probetas se realizó siguiendo la norma UNE-EN 12697-33 “Elaboración de probetas con compactador de placa”, excepto para 9 leyes de fatiga que se extrajeron directamente placas de firme, véase figura 5, que habían sido extendidas y compactadas con los métodos usados habitualmente para la construcción de carreteras.

Según la temperatura de fabricación, 8 eran mezclas bituminosas templadas fabricadas a temperatura inferior a 100 °C y las otras 47 eran mezclas bituminosas en caliente.

En 25 de las mezclas utilizadas se han sustituido parcial o totalmente los áridos naturales por diferentes materiales como:

- Árido reciclado procedente del fresado de mezclas bituminosas (RAP).
- Áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD).
- Escorias de acería.
- Caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU), incorporado en vía seca y húmeda.
- Diversos residuos poliméricos como polipropileno.

La gran mayoría se fabricaron con ligantes convencionales 35/50 y 50/70 aunque también se emplearon betunes modificados tipo PMB 45/80-65 en 4 mezclas, betunes duros 15/25 en 3 formulaciones y 7 de las mezclas utilizadas

se fabricaron empleando una emulsión bituminosa como ligante.

Debido a limitaciones operativas de la máquina de ensayo, ésta no admite probetas con alturas superiores a 5,8 cm. Según la norma UNE-EN 12697-24 apartado D.3 de preparación de probetas, el ancho y canto de la misma será 2,5 veces el tamaño máximo nominal del árido en la mezcla por lo que no han podido ensayarse mezclas con tamaño máximo de árido superior a 22 mm.

Los tipos de mezclas bituminosas que se han empleado son:

- AC22S MAM 3 formulaciones.
- AC22G 12 mezclas.
- AC22S 18 formulaciones.
- AC16S 7 mezclas.
- AC16D 13 formulaciones.
- BBTM11B 2 mezclas.

En 2 de las mezclas analizadas se añadieron aditivos rejuvenecedores y en otras tantas se agregaron fibras acrílicas.

4. RESULTADOS

Los ensayos de fatiga ejecutados corresponden a diversos trabajos llevados a cabo en el Centro de Estudios del Transporte, todos ellos realizados con control de deformación pero con diferentes condiciones de temperaturas y frecuencias.

En el caso de 2 mezclas bituminosas se ensayaron para cada una 5 leyes de fatiga, tres de ellas a 3 temperaturas 10, 20 y 30 °C con frecuencia de 10 Hz, y otras dos en las que se mantuvo la temperatura constante a 20 °C ensayándose a frecuencias de 3,3 y 30 Hz. En las figuras 6 y 7 se presentan, respectivamente, los resultados obtenidos para la mezcla AC22G 50/70 a partir de catas extraídas de firme y para la mezcla AC22S 50/70 recogida en planta de fabricación.

Otras 27 leyes de fatiga se obtuvieron de ensayos realizados a 20 °C y 10 Hz que son las condiciones de ensayo utilizadas en los estudios llevados a cabo internacionalmente. En las figuras 8 y 9 se presentan algunos de los resultados obtenidos con diferentes mezclas bituminosas.

Se han realizado 27 ensayos de fatiga a 20 °C y 30 Hz que son las establecidas en el Anejo D.9 de la norma UNE-EN 12697-20 para el ensayo de resistencia a fatiga en 4 puntos. Algunas de las leyes obtenidas aparecen en las figuras 10 y 11.



Figura 5. Extracción de catas de mezcla bituminosa.

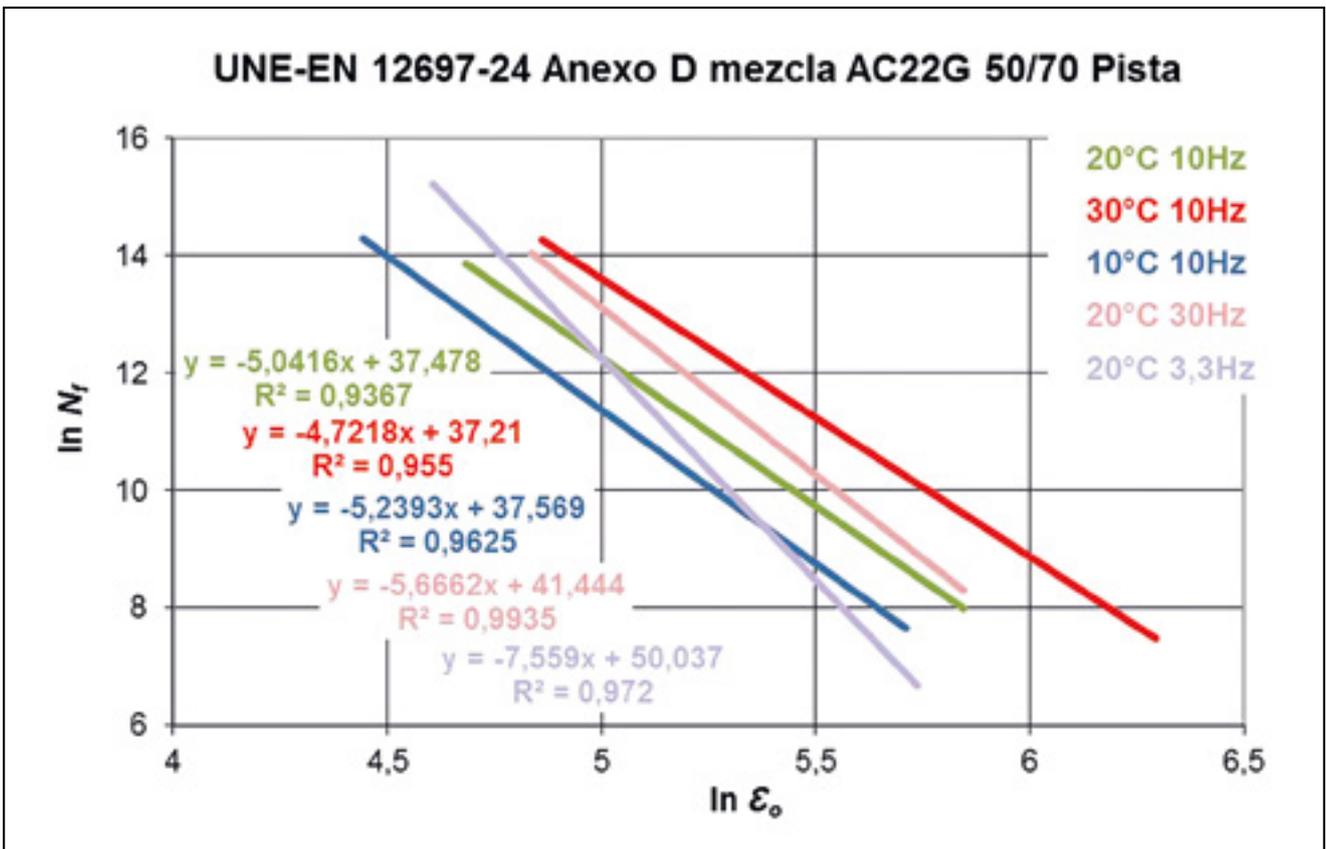


Figura 6. Ensayo de fatiga en 4 puntos con diferentes temperaturas y frecuencias.

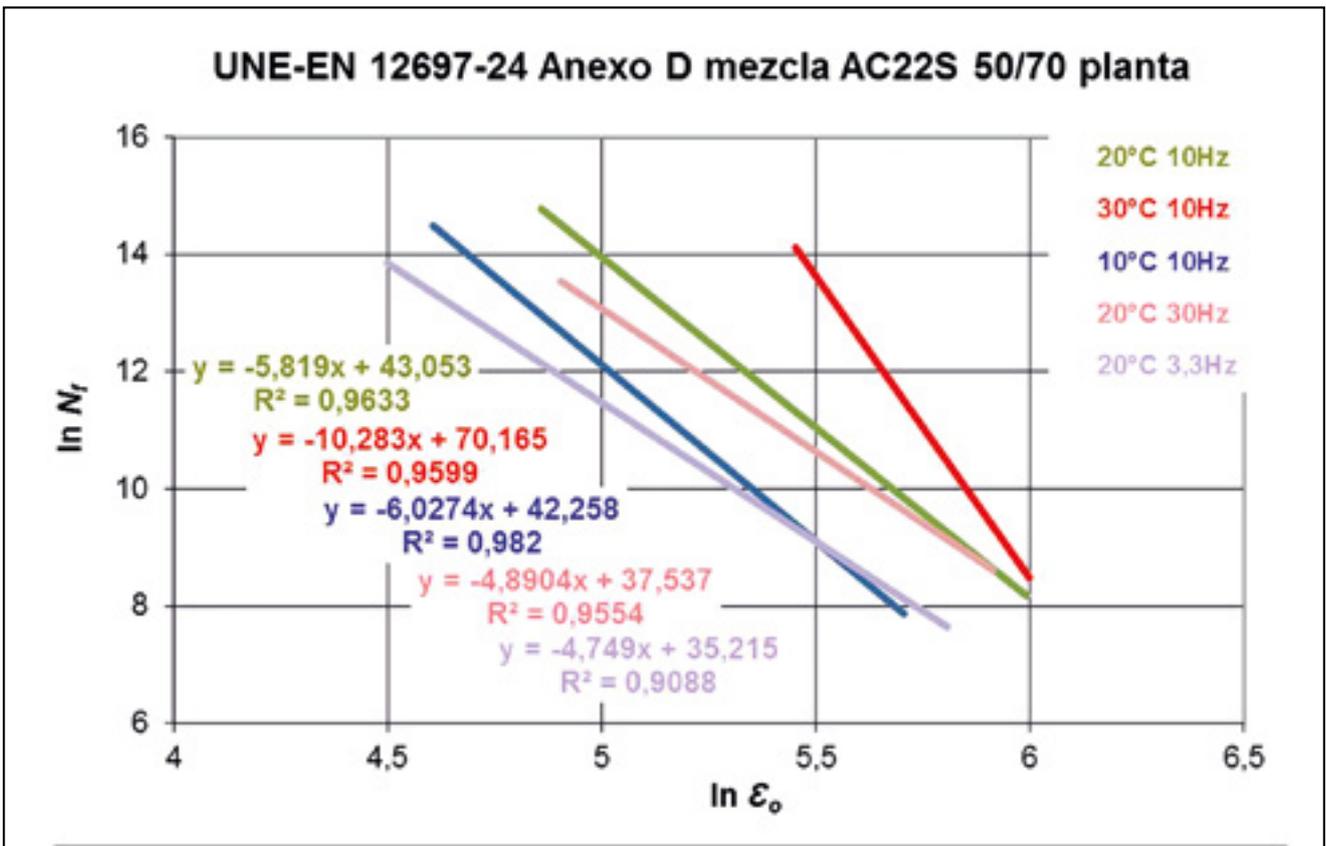


Figura 7. Ensayo de fatiga en 4 puntos con diferentes temperaturas y frecuencias.

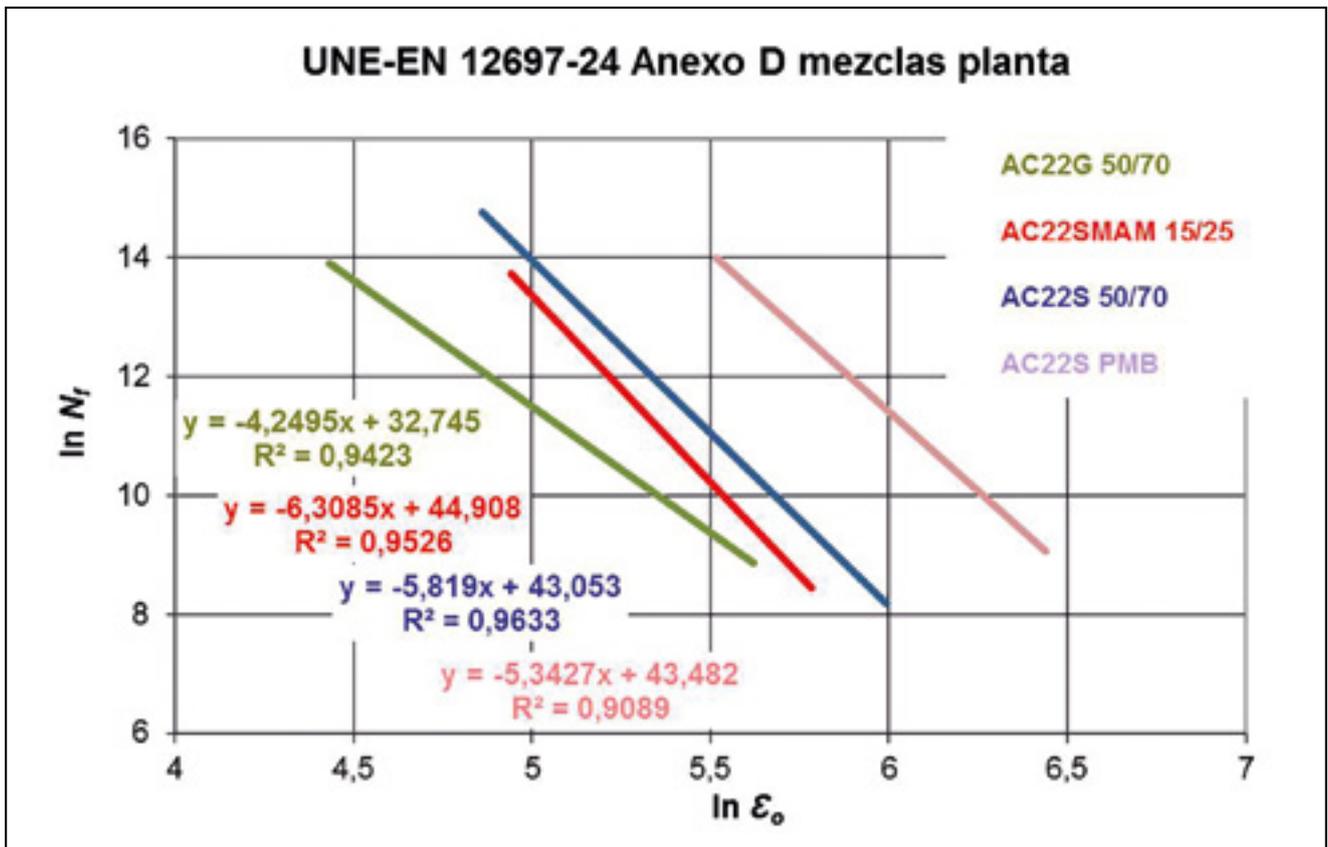


Figura 8. Ensayo de fatiga en 4 puntos a 20 °C y 10 Hz de mezclas fabricadas en planta.

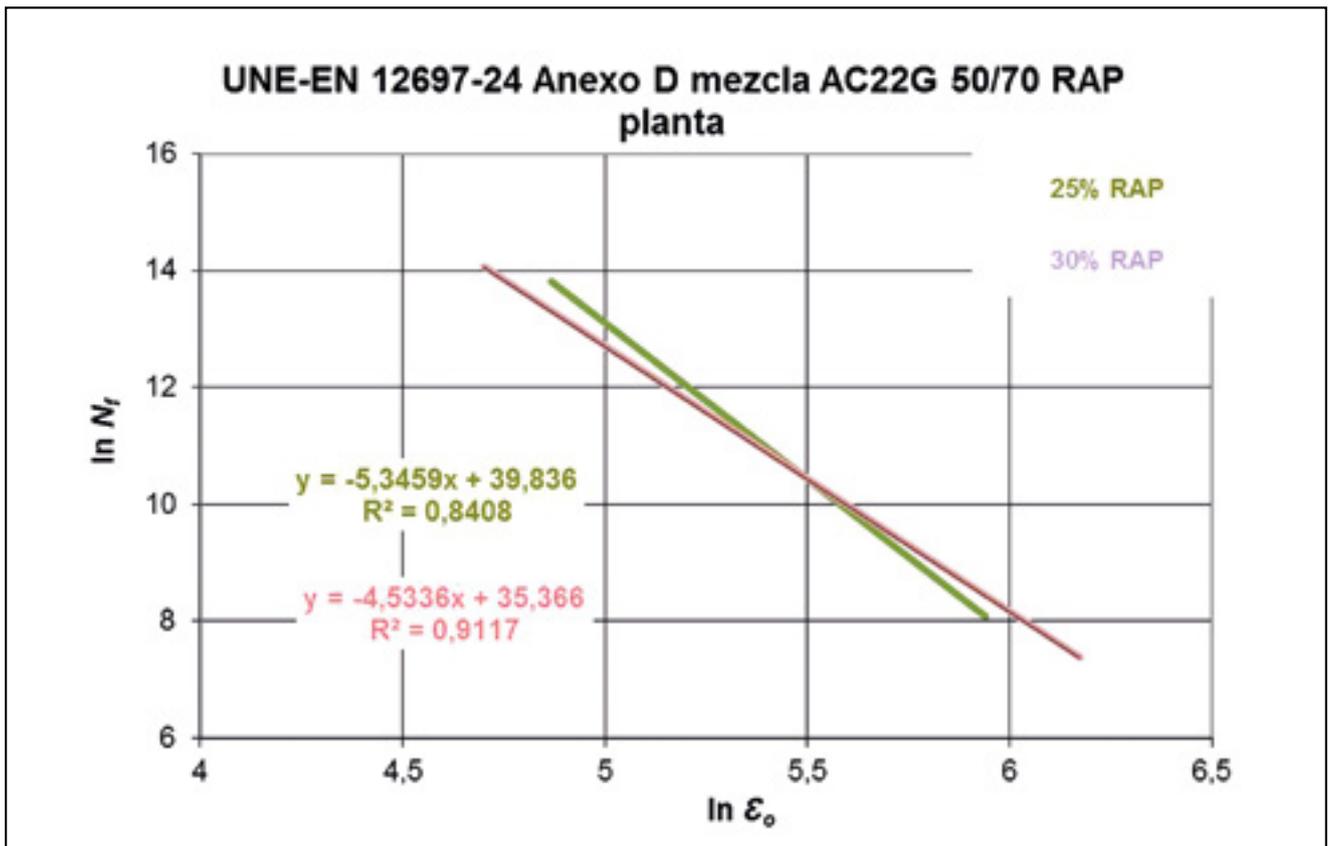


Figura 9. Ensayo de fatiga en 4 puntos a 20 °C y 10 Hz de mezclas fabricadas en planta con material procedente de fresado.

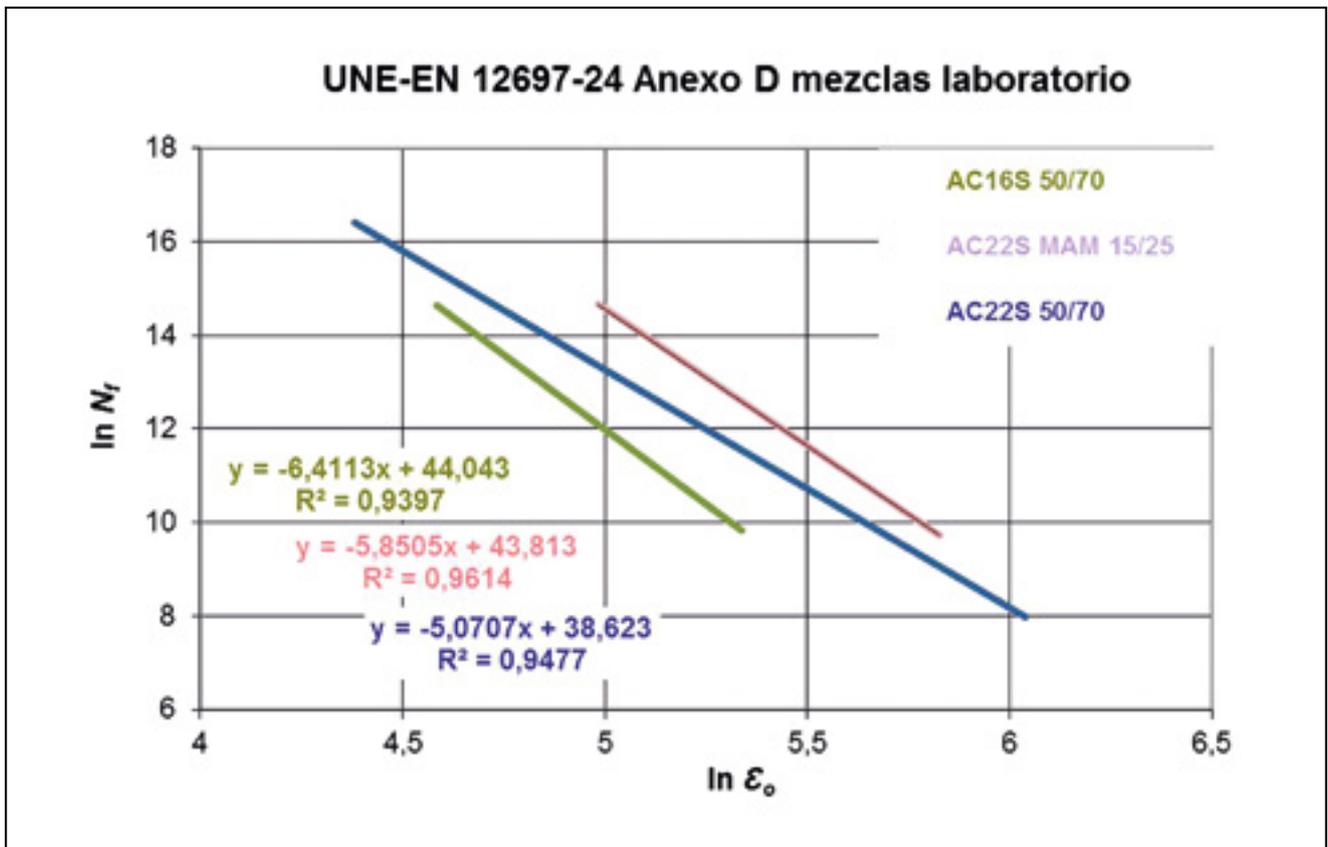


Figura 10. Ensayo de fatiga en 4 puntos a 20 °C y 30 Hz de mezclas fabricadas en laboratorio.

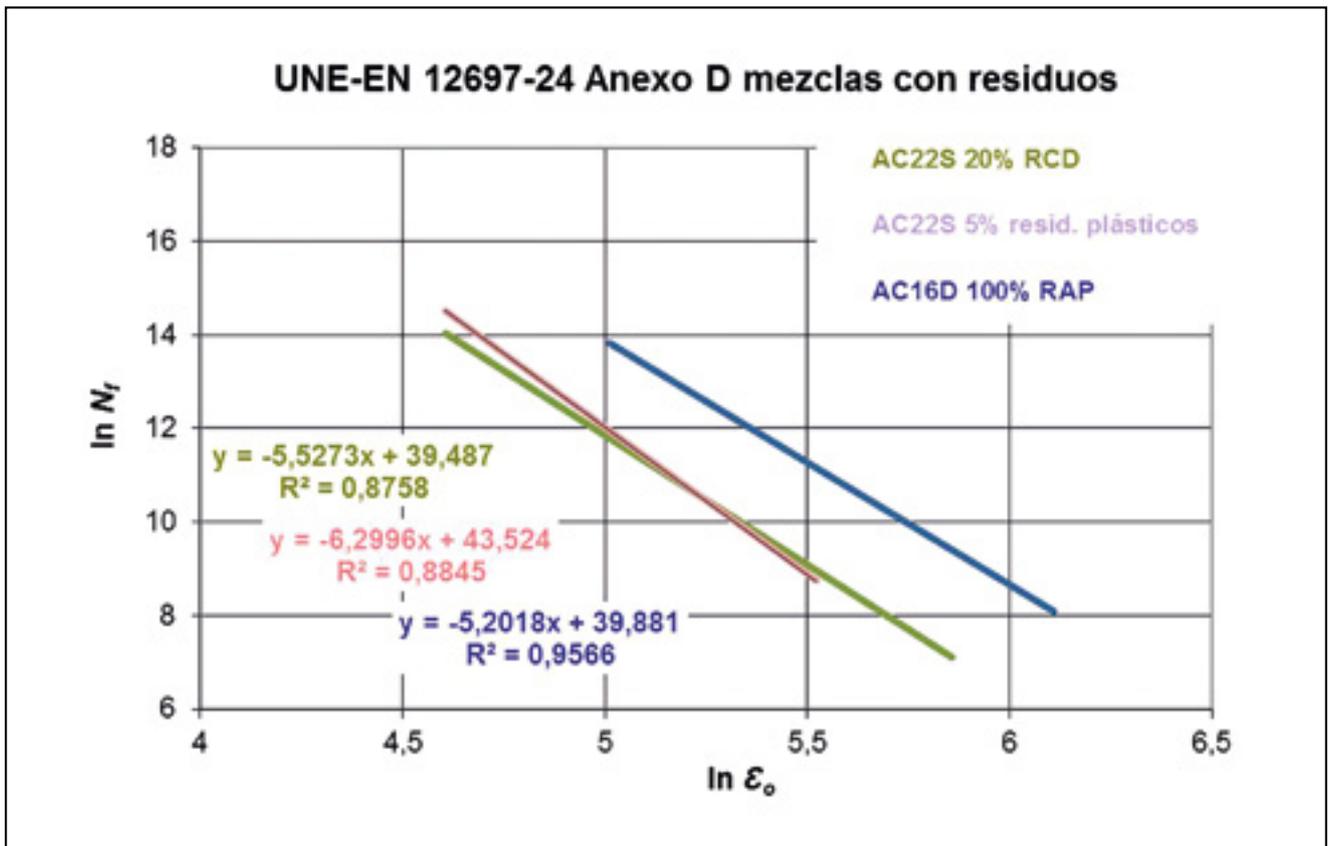


Figura 11. Ensayo de fatiga en 4 puntos a 20 °C y 30 Hz de mezclas fabricadas en planta con subproductos.

4.1. Relación entre los coeficientes p y q de las leyes de fatiga

4.1.1. Relación coeficientes de fatiga para ensayos realizados según UNE-EN 12697-24 Anexo D

En las tablas 1 y 2 se exponen todos los coeficientes obtenidos en los ensayos de fatiga realizados según norma UNE-EN 12697-24 Anexo D.

Al estudiar por separado los ensayos realizados a 20 °C - 30 Hz y 20 °C - 10 Hz se han obtenido las siguientes relaciones entre parámetros de fatiga, ecuaciones [11] y [12], que se presentan gráficamente en la figura 12.

$$\text{Ensayos realizados a 20 °C y 30 Hz} \\ p = -0,1899q + 2,0399 \quad [11]$$

$$\text{Ensayos realizados a 20 °C y 10 Hz} \\ p = -0,1573q + 1,0507 \quad [12]$$

Al relacionar los parámetros p y q de todas las leyes de fatiga se obtiene una correlación muy elevada de 0,95 lo

que indica una clara relación entre ambos, independientemente de las condiciones de ensayo empleadas. En la figura 13 se representan los coeficientes de todas las leyes de fatiga obtenidas.

En los resultados obtenidos el coeficiente p oscila entre -3,2117 y -10,592 mientras que los valores alcanzados para q se encuentran en el rango de 29,19 a 70,1651.

Con la relación obtenida, el parámetro p puede deducirse a partir de q como ecuación [13]:

$$p = -0,1732q + 1,5307 \quad [13]$$

y la ley de fatiga podría determinarse a partir de sólo un parámetro, al igual que la deformación para un millón de ciclos ε_6 en ecuaciones [14] y [15]:

$$\ln N_f = q + (1,5307 - 0,1732q) \ln \varepsilon_6 \quad [14]$$

$$\varepsilon_6 = e^{((\ln 1000000) - q) / (1,5307 - 0,1732q)} \quad [15]$$

Tabla 1. Resultados ensayo fatiga según UNE-EN 12697-24 Anexo D obtenidos en laboratorio del Centro de Estudios del Transporte

Condiciones ensayo	Mezcla bituminosa	p	q	Observaciones
20 °C 30 Hz	AC22 S	-4,7490	35,2150	Fabricada en planta
20 °C 30 Hz	AC22 G	-7,5590	50,0370	Extraída del firme
20 °C 30 Hz	AC16 S	-6,4113	44,0430	Fabricada en laboratorio
20 °C 30 Hz	AC22 S MAM	-5,8505	43,8130	Fabricada en laboratorio
20 °C 30 Hz	AC22 S	-5,0707	38,6230	Fabricada en laboratorio
20 °C 30 Hz	AC22 S	-5,4230	38,2855	Fabricada en laboratorio
20 °C 30 Hz	AC16 D	-5,2714	39,2800	Fabricada en laboratorio
20 °C 30 Hz	AC16 D	-10,5920	67,1070	Fabricada en laboratorio
20 °C 30 Hz	AC16 D	-5,9631	43,8720	Fabricada en laboratorio
20 °C 30 Hz	AC16 D	-3,2117	29,1900	Fabricada en laboratorio
20 °C 30 Hz	BBTM 11B	-3,4769	31,1547	Extraída del firme
20 °C 30 Hz	BBTM 11B	-4,7502	35,4607	Extraída del firme
20 °C 30 Hz	AC16 S	-4,9212	35,3997	Extraída del firme
20 °C 30 Hz	AC16 S	-4,6683	34,3935	Extraída del firme
20 °C 30 Hz	AC22 S	-4,2956	33,5250	Fabricada en laboratorio
20 °C 30 Hz	AC22 S	-5,5273	39,4870	Fabricada en laboratorio
20 °C 30 Hz	AC22 S	-7,0287	45,9210	Fabricada en laboratorio
20 °C 30 Hz	AC22 S	-5,7232	39,9710	Fabricada en laboratorio
20 °C 30 Hz	AC16 D	-3,8768	30,6190	Fabricada en planta
20 °C 30 Hz	AC16 D	-4,6507	35,3920	Fabricada en planta
20 °C 30 Hz	AC22 S	-5,6680	38,8410	Fabricada en planta
20 °C 30 Hz	AC22 S	-6,7340	45,9640	Fabricada en planta
20 °C 30 Hz	AC22 S	-4,3790	31,9380	Fabricada en planta
20 °C 30 Hz	AC22 S	-6,3000	43,5240	Fabricada en planta
20 °C 30 Hz	AC22 S	-7,0400	46,6090	Fabricada en planta
20 °C 30 Hz	AC16 D	-5,4990	40,8410	Fabricada en planta
20 °C 30 Hz	AC16 D	-5,2018	39,8810	Fabricada en planta
20 °C 30 Hz	AC16 D	-4,4088	34,5640	Fabricada en planta

Tabla 2. Resultados ensayo fatiga según UNE-EN 12697-24 Anexo D obtenidos en laboratorio del Centro de Estudios del Transporte

Condiciones ensayo	Mezcla bituminosa	p	q	Observaciones
20 °C 10 Hz	AC16 S	-5,9560	45,2590	Fabricada en laboratorio
20 °C 10 Hz	AC16 S	-4,0640	35,1910	Fabricada en laboratorio
20 °C 10 Hz	AC22 S	-5,8190	43,0529	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 S	-5,6205	43,3232	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 G	-4,2495	32,7454	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 G	-7,1306	49,0021	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 S	-5,2069	42,6132	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 S	-7,6297	58,4630	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 S MAM	-6,3085	44,9084	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 S MAM	-7,1408	49,8874	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 G	-5,0416	37,4776	Extraída del firme
20 °C 10 Hz	AC22 S	-4,0561	33,6007	Fabricada en laboratorio
20 °C 10 Hz	AC22 S	-4,7703	37,5036	Fabricada en laboratorio
20 °C 10 Hz	AC22 G	-5,3459	39,8361	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 G	-4,5336	35,3664	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 S	-4,7333	36,8313	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 G	-5,3459	39,8361	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 G	-4,5336	35,3664	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 G	-5,5834	40,3016	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 G	-5,5936	40,4977	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 G	-4,8008	35,8632	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC22 G	-5,3902	39,2896	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC16 S	-5,9561	45,2589	Fabricada en laboratorio
20 °C 10 Hz	AC16 S	-4,0640	35,1909	Fabricada en laboratorio
20 °C 10 Hz	AC22 G	-4,2495	32,7454	Fabricada en planta
20 °C 10 Hz	AC16 D	-5,3910	41,5836	Fabricada en laboratorio
20 °C 10 Hz	AC16 D	-5,4831	41,8125	Fabricada en laboratorio
20 °C 10 Hz	AC16 D	-3,7344	32,1677	Fabricada en laboratorio
20 °C 10 Hz	AC16 D	-5,4926	43,0619	Fabricada en laboratorio
20 °C 3,3 Hz	AC22 S	-4,8904	37,5372	Fabricada en planta
20 °C 3,3 Hz	AC22 G	-5,6662	41,4440	Extraída del firme
30 °C 10 Hz	AC22 S	-10,2830	70,1651	Fabricada en planta
30 °C 10 Hz	AC22 G	-4,7218	37,2100	Extraída del firme
10 °C 10 Hz	AC22 S	-6,0274	42,2584	Fabricada en planta
10 °C 10 Hz	AC22 G	-5,2393	37,5690	Extraída del firme
10 °C 10 Hz	AC16 S	-6,4620	44,1890	Fabricada en laboratorio

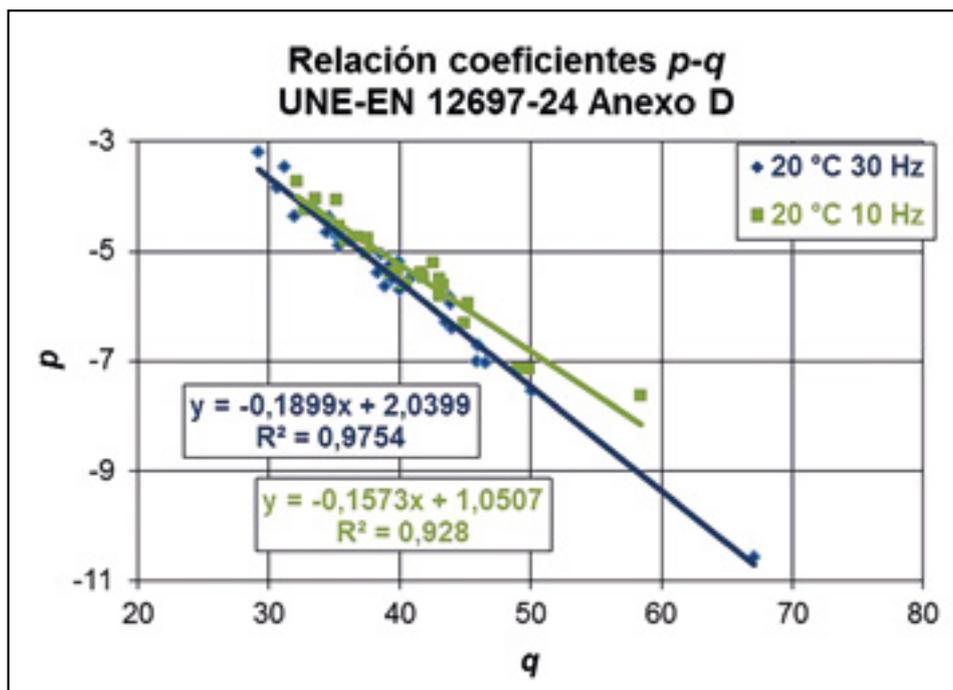


Figura 12. Relación parámetros p y q de las leyes de fatiga obtenidas según condiciones de ensayo.

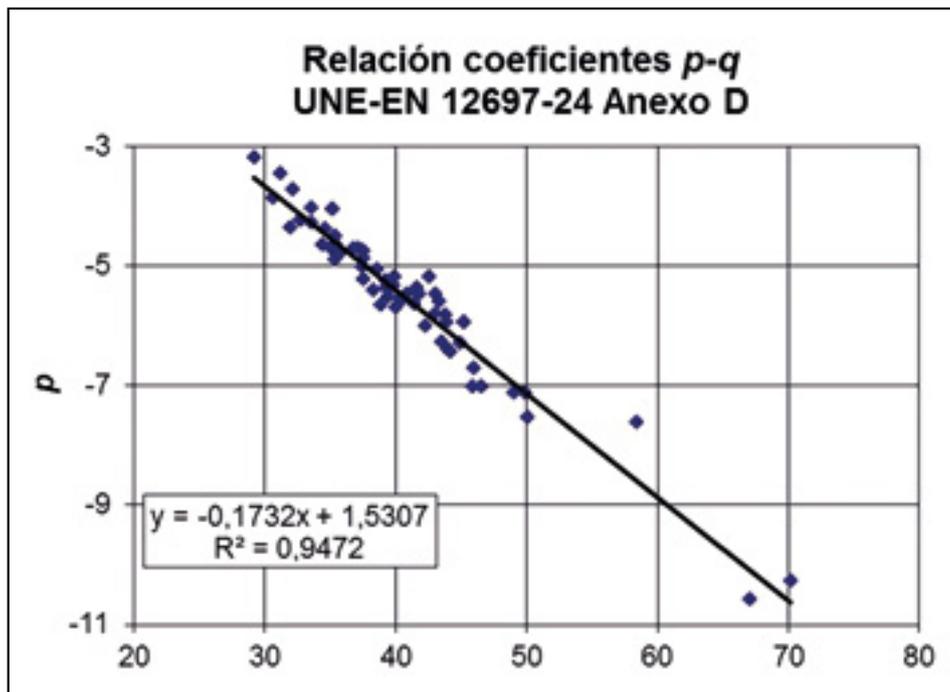


Figura 13. Relación parámetros leyes de fatiga ensayadas en el Centro de Estudios del Transporte.

4.1.2. Relación coeficientes de fatiga para ensayos realizados según NLT-350 y UNE-EN 12697-24 Anexo D

La correlación entre coeficientes de la ley de fatiga se había verificado previamente con los resultados obtenidos en el laboratorio del Centro de Estudios del Transporte para el ensayo de fatiga en 3 puntos realizado según norma NLT-350, análogo al procedimiento descrito en el Anexo C de UNE-EN 12697-24.

En la norma NLT la ley de fatiga se formula de la siguiente manera en ecuación [16]

$$\log \varepsilon_o = A + B \log N_f \quad [16]$$

Relacionando las ecuaciones anteriores se pueden deducir los coeficientes p y q a partir de los parámetros A y B en ecuaciones [17] y [18]

$$p = 1/B \quad [17]$$

$$q = -(A/B \ln 10) \quad [18]$$

Utilizando los datos de fatiga en 3 puntos de 108 mezclas (tipo S, G y alto módulo) ensayadas en el laboratorio del CET y empleando las ecuaciones de transformación anteriores, se obtiene de nuevo una alta correlación entre los parámetros de la ley de fatiga expresada según

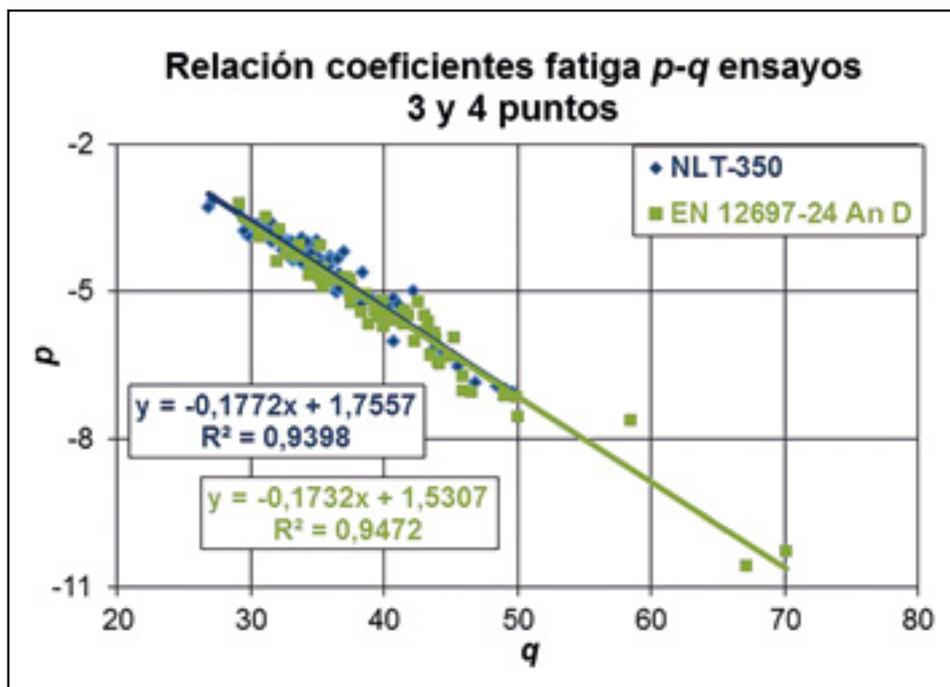


Figura 14. Relación parámetros de fatiga en ensayos realizados según NLT-350 y UNE-EN 12697-24 Anexo D.

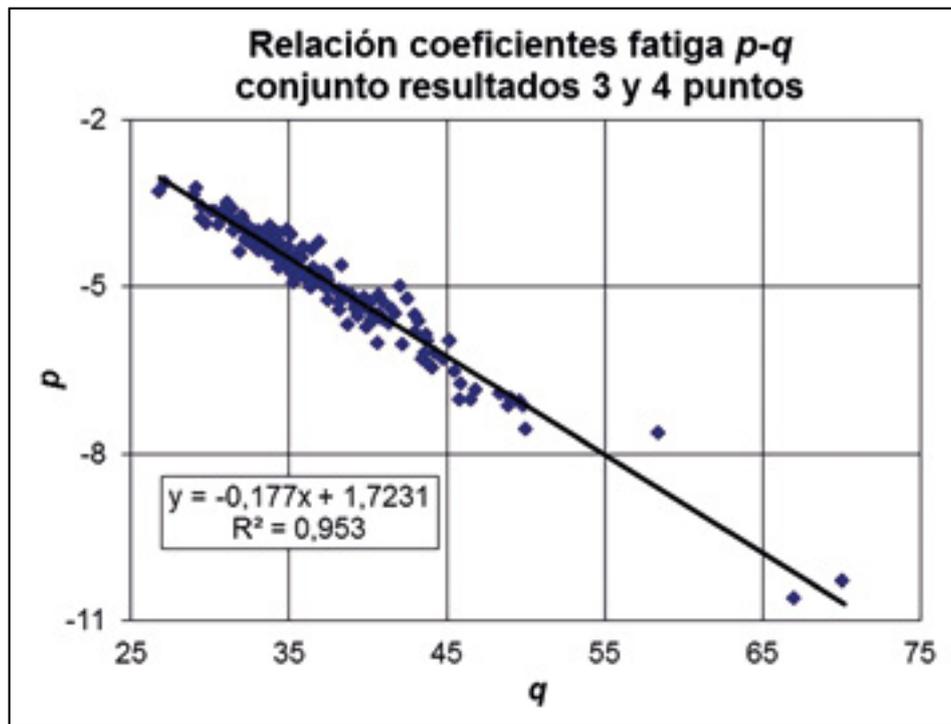


Figura 15. Relación parámetros ley de fatiga en análisis conjunto resultados según NLT-350 y UNE-EN 12697-24 Anexo D.

UNE-EN 12697-24 Anexo D. En la figura 14 se observa la relación obtenida.

Al estudiar globalmente todos los datos se alcanza una alta correlación que se presenta en la figura 15.

5. CONCLUSIONES

Desde la puesta en marcha del ensayo de fatiga en 4 puntos según norma UNE-EN 12697-24 Anexo D se han realizado en el laboratorio del Centro de Estudios del Transporte más de 60 leyes de fatiga de diferentes mezclas bituminosas aunque en la actualidad en España la normativa solo fija un umbral para las mezclas de alto módulo.

Los resultados proceden de diversos proyectos internos del laboratorio y también de trabajos realizados para otras entidades españolas, por ello las condiciones de ensayo han variado en cuanto a temperatura y frecuencia, pero siempre han sido realizados con deformación controlada.

Las mezclas empleadas fueron fabricadas tanto en el laboratorio como en diferentes plantas de fabricación, a partir de catas extraídas del firme o compactadas en laboratorio; se emplearon diferentes granulometrías, áridos vírgenes y reciclados, varios tipos de ligantes y en algunos casos se incorporaron aditivos procedentes de residuos.

Al estudiar los resultados obtenidos se ha verificado:

- El coeficiente p de la ley de fatiga oscila entre valores de -3 y -11 , aunque la gran mayoría se encuentra entre -4 y -7 .
- Para el parámetro q , los resultados se encuentran entre 30 y 70 , la mayor parte en el intervalo de 35 a 45 .
- En las leyes de fatiga obtenidas, los valores de los coeficientes p y q resultantes no dependen de las condiciones de ensayo utilizadas, que en este caso han

sido: $20\text{ °C}-30\text{ Hz}$, $20\text{ °C}-10\text{ Hz}$, $20\text{ °C}-3.3\text{ Hz}$, $30\text{ °C}-10\text{ Hz}$, $10\text{ °C}-10\text{ Hz}$.

- Se ha comprobado una alta relación entre p y q de todas las leyes de fatiga obtenidas para 55 mezclas bituminosas diferentes, ambos coinciden en una línea recta con un coeficiente de correlación de $0,95$ mostrada en ecuación [19].

$$p = -0,1732q + 1,5307 \quad [19]$$

- La ley de fatiga podría determinarse en este caso en función de un único parámetro q y del mismo modo la deformación para un millón de ciclos en ecuaciones [20] y [21]

$$\ln N_f = q + (1,5307 - 0,1732q) \ln \varepsilon_0 \quad [20]$$

$$\varepsilon_6 = e^{((\ln 1000000) - q) / (1,5307 - 0,1732q)} \quad [21]$$

- La relación entre parámetros obtenida podría utilizarse para validar cualquier ley de fatiga obtenida según ensayo en 4 puntos con deformación controlada para mezclas bituminosas que se hayan formulado de acuerdo a las prescripciones exigidas en España.
- Del mismo modo, podría evaluarse rápidamente la resistencia a fatiga de una mezcla bituminosa con un número reducido de probetas, siempre que los parámetros obtenidos se ajusten a la correlación anterior, con aplicación directa tanto en firmes nuevos en servicio como en ensayos de diferentes materiales en laboratorio.
- Esta concordancia entre coeficientes debería verificarse con mayor número de resultados, por ejemplo mezclas bituminosas semicalientes, y con ensayos realizados con el mismo procedimiento en otros laboratorios.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a todas las empresas que han suministrado mezclas bituminosas para la realización de diferentes trabajos en el Centro de Estudios del Transporte y en especial a la Planta Asfáltica de Elsan ubicada en Arganda del Rey.

Del mismo modo reconocer a todo el personal del Centro que ha intervenido tanto en la realización como en el planteamiento de los diversos estudios.

7. BIBLIOGRAFÍA

UNE (2013). UNE-EN 12697-24. *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga*. Madrid: UNE.

UNE (2007). UNE-EN 13108-20. *Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 20: Ensayos de tipo*. Madrid: UNE.

UNE (2006). UNE-EN 12697-33. *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 33: Elaboración de probetas con compactador de placa*.

NLT-350/90. Ensayo de fatiga en flexotracción dinámica de mezclas bituminosas.

Ghuzlan, K. A., y Carpenter, S. H. (2003). Traditional fatigue analysis of asphalt concrete mixtures. *TRB, Annual Meeting, enero de 2003*.

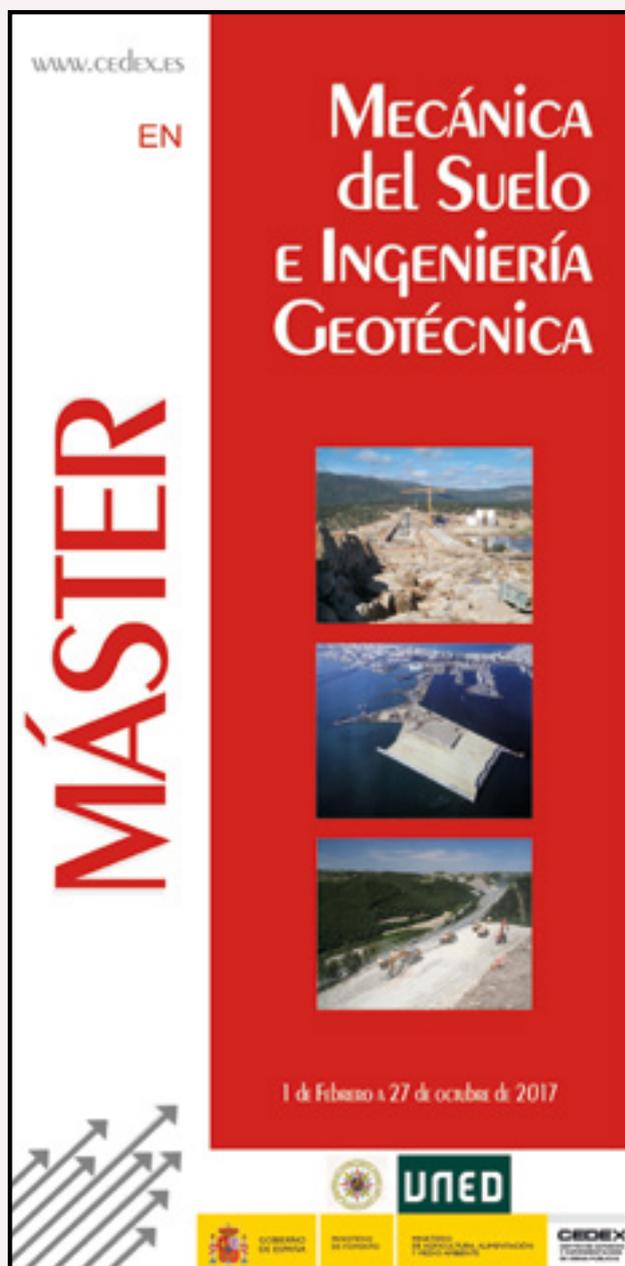
Mello, L. G. (2008). *Continuous damage theory in the study of fatigue life of asphalt mixtures*. Tesis Doctoral. University of Brasilia. Brasil.

Pais, J. C., Pereira, P. A. A., Minhoto, M. J. C., Fontes, L. P. T. L., Kumar, D. S. N. V. A., y Silva, B. T. A. (2009). The prediction of fatigue life using the K1-K2 relationship. *Second Workshop on Four-point Bending, Guimarães, Portugal, 24-25 septiembre, 2009*.

Pell, P. S., y Cooper, K. E. (1975). The fatigue of testing and mix variables on the fatigue performance of bituminous materials. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 44.

Way, G. B., Kaloush, K. E., Sousa, J. M. B., y Zareh, A. (2009). Arizona's 15 years of experience using the four point bending beam test. *Second Workshop on Four-point Bending, Guimarães, Portugal, 24-25 septiembre, 2009*.

MÁSTER EN MECÁNICA DEL SUELO E INGENIERÍA GEOTÉCNICA



La UNED y el CEDEX organizarán de forma conjunta en 2017 el Máster de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, Máster destinado a ingenieros de: caminos, civiles, geólogos, y de minas o titulaciones afines relacionados con la especialidad de cualquier parte del mundo con dominio del español e interesados en afianzar conocimientos en Geotecnia en sus vertientes teóricas y prácticas.

El perfil internacional se confirma con la notable presencia de titulados iberoamericanos y en menor medida, los procedentes de otros países europeos y africanos.

PROGRAMA

Consta de **14 módulos** de entre una y dos semanas de duración aproximadamente cada uno:

1. Mecánica del suelo básica (2,5 semanas)
2. Reconocimientos geotécnicos de campo
3. Mecánica de rocas
4. Cimentaciones superficiales
5. Cimentaciones profundas
6. Estabilidad de taludes
7. Estructuras de contención
8. Estructuras de tierra
9. Túneles
10. Mejora del terreno
11. Geotecnia de presas
12. Geotecnia medio ambiental y minera
13. Dinámica de suelos y de cimentaciones
14. Modelización numérica

El programa se completa con clases de **Geotecnia Avanzada**, distribuidas a lo largo del curso, que versan sobre:

- Geotecnia de estructuras costa afuera (off-shore)
- Geomecánica aplicada al del sector del gas y petróleo
- Fiabilidad geotécnica
- Modelos constitutivos
- Teoría del Estado Crítico
- Teoremas de estados límite
- Suelos no saturados
- Geotermia

El temario se refuerza con prácticas de laboratorio, de campo y de modelización con códigos numéricos comerciales.

Se prevé un curso de una semana de MIDAS GTS-NX, con licencia completa para los alumnos durante el periodo docente, y una sesión introductoria de PLAXIS.

DESARROLLO DEL MÁSTER Y EVALUACIÓN

El Máster consta de un periodo lectivo, entre el 1 de febrero y el 30 de junio, de asistencia obligatoria, en cuyas clases se imparte el programa; y un periodo no lectivo, desde julio a octubre, durante el cual el alumno ha de desarrollar, bajo la tutela de un profesional del sector, una tesina que ha de defender ante un tribunal a finales de octubre. Las clases se imparten de lunes a viernes de 9:00 a 13:30 y, de 2 a 3 veces por semana, de 15:00 a 17:00 h. Se realiza una evaluación continua con ejercicios semanales y tres exámenes parciales.

VALOR AÑADIDO

- Visita técnica y viaje de prácticas para visitar obras geotécnicas de relevancia en España.
- Premio CEDEX a la tesina más sobresaliente, otorgado por el Director del CEDEX en la ceremonia de clausura.
- Contacto con empresas españolas de actividad internacional, asociaciones y sociedades del sector.

El director del CEDEX, Mariano Navas, premiado por el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

El ministro de Fomento, D. Iñigo de la Serna, ha entregado el premio de la categoría "Ingeniero Destacado" en el que se destaca la singularidad de la trayectoria y labor emprendedora de un profesional de la ingeniería de Caminos. Este año el Colegio de Caminos, Canales y Puertos de Madrid ha premiado a Mariano Navas Gutiérrez por su brillante desarrollo profesional en la especialidad de Puertos, donde es uno de los expertos españoles más reconocidos, siendo destacada su actuación tanto en proyectos como en investigación. Mariano Navas ha desempeñado diferentes cargos públicos, siendo actualmente director del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

Presentación de la monografía "Clasificación hidrográfica de los ríos de España"

En el Centro de Estudios Hidrográficos se presentó la nueva monografía del CEDEX titulada "Clasificación hidrográfica de los ríos de España". En esta publicación, todos los ríos representados en la cartografía 1:25.000 del Instituto Geográfico Nacional han sido clasificados por el método de Pfafstetter, con excepción de aquellos cuya longitud es menor de un kilómetro.

En la presentación se detalló la metodología puesta a punto para la clasificación de los ríos, los procesos utilizados para llevarla a cabo, y los diversos problemas técnicos que hubo que resolver. También se mostrarán los resultados mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica.

El Ministerio de Fomento y el CEDEX, en colaboración con IECA, presentan la nueva instrucción para la recepción de cementos RC-16

La Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), en colaboración con el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), han realizado la primera de las 18 jornadas previstas para la presentación, en toda España, de la nueva Instrucción para la recepción de cementos, RC-16, aprobada el 10 de junio de este año.

Más de un centenar de técnicos procedentes de empresas constructoras, laboratorios de control de obra, entidades certificadoras, administraciones públicas y fabricantes de productos de construcción, entre otros, se dieron cita en esta primera jornada, celebrada en el salón de actos del CEDEX en Madrid. El acto contó con la intervención de varios de los miembros de la Comisión Permanente del Cemento (CPC) y de los expertos del grupo de trabajo que han participado en la ponencia que elaboró la nueva Instrucción RC-16.

La nueva "Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-16)" viene a sustituir a la Instrucción RC-08, y supone una actualización de las exigencias administrativas para la puesta en el mercado de los cementos comercializados en nuestro país. Recoge, además, las modificaciones incorporadas por las nuevas normas armonizadas en vigor, así como la reglamentación existente relativa a aquellos cementos que no disponen de normas europeas armonizadas. El ámbito de aplicación de la normativa incluye la recepción de cementos que se realice en las obras de construcción, en las centrales de fabricación de hormigón y en las fábricas de productos de construcción.



El ministro de Fomento, Iñigo de la Serna, entrega el premio de "Ingeniero Destacado 2016".



Jornada de presentación de la nueva instrucción de cementos RC-16.

El cemento ha sido uno de los primeros materiales de construcción que fue objeto de normalización y reglamentación. Originariamente, España se había regido en ese ámbito por Órdenes o Decretos Ministeriales. Entre 1963 y 1966 aparecieron las primeras normas UNE, aunque hasta 1981 no se basaron en documentos, aún no armonizados, del Comité Europeo. Fue en 1988 cuando se incluyeron por primera vez la normas UNE en el pliego para la recepción de cementos RC-88.

Acto Homenaje al Profesor José Antonio Jiménez Salas

El 15 de febrero, se realizó un nuevo acto de homenaje al Prof. José Antonio Jiménez Salas, pionero de la Geotecnia en España, quien fue Director del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo del CEDEX de 1965 a 1984, y Director General del CEDEX en el bienio 1978-1979. El acto ha tenido lugar en la sede de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, de la cual fue miembro, en calle Valverde, 22, Madrid 28004.

Jornada "Ramón Iribarren Cavanilles, Ingeniero de Puertos y Costas"

Se cumplen 50 años de la muerte de Ramón. Iribarren Cavanilles (1900-1967) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, considerado el padre de la moderna ingeniería de puertos y costas.

Entre finales de los años treinta y su temprana desaparición, jugó un papel que ahora denominaremos "disruptivo" en facetas señaladas de la ingeniería marítima, como por ejemplo, la fórmula para el cálculo del peso de los cantos en los diques de escollera, la interacción oleaje /dique y el comportamiento hidrodinámico y sedimentario del borde costero mediante el parámetro de Iribarren, así bautizado muchos años después por la comunidad científica internacional. Todo ello, incluyendo las resacas y determinadas componentes del transporte del litoral, forman parte de sus aportaciones más conocidas y trascendentes.

Profesor de la Escuela de Caminos y fundador del Laboratorio de Puertos (1948), embrión de lo que es hoy el Centro de Puertos y Costas del CEDEX. D. Ramón fue un

observador impenitente que encontró en el Cantábrico, en los puertos y playas vascos y en su Laboratorio, el campo apropiado para nutrir su desbordante intuición y comprobar los resultados.

Con este motivo, el 22 de febrero se celebró, la jornada "Ramón Iribarren Cavanilles, Ingeniero de Puertos y Costas", organizada por el Comité de Asuntos Marítimos en el Instituto de la Ingeniería de España, situado en la c/ General Arrando, 38 de Madrid. La Jornada, inaugurada por D. Carlos del Álamo Jiménez, Presidente del Instituto de la Ingeniería en España, y D. José Esteban Pérez, Presidente del Comité de Asuntos Marítimos, contará con ponencias, entre otras personalidades destacadas del sector, de nuestros compañeros D^a. Dolores Romero Muñoz, historiadora de CEHOPU, y D. José María Grassa Garrido, Director de CEPYC.

Jornada IAHR-SPAIN WATER sobre Gestión Ambiental de la Costa y del Mar

La franja costera y el medio marino se encuentran sometidos a complejos fenómenos naturales así como a múltiples usos y actividades humanas que inciden en el estado y funcionamiento del medio físico y de sus ecosistemas. Como respuesta ante esta creciente demanda de actividad, y a sus potenciales impactos, se ha ido desarrollando un marco regulatorio cada vez más complejo que determina la necesidad de caracterizar y evaluar el estado del medio a través de múltiples indicadores y parámetros que forman parte de una amplia colección de programas de seguimiento. Toda esta información está orientada al diseño de medidas que permitan mantener y mejorar el estado ambiental de nuestros mares al mismo tiempo que se favorece un crecimiento sostenible.

La presente Jornada, organizada por la Asociación Internacional de Ingeniería e Investigación Hidroambiental (IAHR), que agrupa a ingenieros y científicos del ámbito del AGUA -continental y marítima- y en el de su medio ambiente asociado, tiene por objeto dar a conocer iniciativas orientadas a mejorar el conocimiento del estado del ámbito costero y marino cuya finalidad última es el diseño de acciones de recuperación y mejora del mismo.



Jornada Gestión Ambiental de la Costa y del Mar.

Jornada “Aplicación de sensores y software para los problemas hidro-ambientales en España y América Latina”

El Simposio Internacional HydroSenSoft sobre Sensores y Software Hidro-Ambiental se celebró, desde el 28 de febrero al 3 de marzo, en IFEMA (www.hydrosensoft.com). HydroSenSoft es un evento constituido por el Simposio propiamente dicho y, de modo complementario, una exposición y una jornada en español. Esta última bajo el título “Aplicación de sensores y software para los problemas hidro-ambientales en España y América Latina”.

Mientras el simposio internacional, en inglés, tiene un carácter marcadamente científico, la jornada, en español, reunirá fabricantes, desarrolladores y usuarios para abordar los problemas hidro-ambientales desde un enfoque pragmático hacia soluciones de aplicación práctica. Cuenta con ponentes de diferentes sectores de actividad (empresas, administraciones, universidades y centros de investigación) que abordarán cuestiones relacionadas con aguas continentales y marinas. Serán tratados asuntos relacionados con tecnologías de medida, con el manejo de la información y la operación y el mantenimiento de los sistemas implicados, pero sin olvidar los aspectos legales, administrativos y organizativos. La jornada finalizará con una mesa redonda con participantes que, en su mayoría, son usuarios e incluso generadores de información hidro-ambiental.

Mº de Fomento: España solicitará fondos CEF para realizar inversiones por importe superior a 500 millones de euros

El Ministerio de Fomento ha dado su aprobación a la propuesta española de solicitud de fondos europeos en la actual convocatoria del Mecanismo “Conectar Europa” (CEF) correspondiente a 2016.

La propuesta incluye un total de 47 proyectos que supondrán una inversión en España de más de 500 millones de euros, para los que se solicita una subvención del 44%.

El presupuesto disponible para toda Europa en esta convocatoria CEF asciende a 840 millones de euros y se

destinará proyectos que aumenten la eficiencia y sostenibilidad del transporte, fomenten la intermodalidad, accesibilidad e interoperabilidad, y garanticen la continuidad de la Red Transeuropea de Transporte (RTE-T), fundamentalmente en las secciones transfronterizas.

Entre las solicitudes más relevantes se encuentran:

- Proyectos internacionales donde destacan la implantación de sistemas de mejora de la gestión del tráfico aéreo (SESAR – Cielo único europeo), el impulso a la infraestructura de suministro de energías alternativas en el transporte (Hidrógeno, gas natural licuado y electricidad), la reapertura del ferrocarril Pau-Canfranc o la conexión viaria de la A-62 española con la IP5 portuguesa.
- Inversiones importantes en ERTMS para el aumento de la seguridad del transporte ferroviario en las líneas del noroeste de la Península, además de en los corredores Atlántico y Mediterráneo, y en material móvil ferroviario.
- Proyectos de Autopistas del Mar, y sistemas de gestión y mejora del transporte intermodal de mercancías.
- Soluciones de integración de los nodos en los corredores de la RTE-T y mejora de su movilidad urbana
- Sistemas inteligentes de transporte en carretera, incluidos los sistemas cooperativos entre vehículos e infraestructura.

Mecanismo “Conectar Europa”

El CEF es un instrumento de la Unión Europea para proporcionar ayuda financiera a proyectos de interés común de las redes transeuropeas de transporte, telecomunicaciones y energía. La dotación para el desarrollo de la RTE-T asciende a 22.400 millones de euros en el periodo 2014-2020. La dotación prevista para las convocatorias generales a las que tiene acceso España asciende a 13.000 millones de euros.

Entre las Convocatorias de 2014 y 2015, a España le fueron asignados un total de 915 millones de euros, de los 9300 repartidos entre toda la Unión Europea.

AGENDA

II Workshop de Iber.

- Barcelona, España, 19 - 20 de enero de 2017.
- <http://www.ibercursos.com/vpage/1/5/Workshops/II-Workshop-2017>

"CIS Workshop on GEP inter-comparison", en relación con la aplicación de la Directiva Marco del Agua en España.

- Viena, Austria, 13 al 14 de febrero de 2017.

Jornada Técnica sobre Intervenciones en casos de patologías y de obras geotécnicas complejas. Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica.

- Madrid, España, 23 de febrero de 2017.
- <http://aetess.com/category/actualidad/jornadas-tecnicas-semsig-aetess/>

Jornada Técnica sobre la nueva Instrucción para la Recepción de Cementos RC-16.

- La Coruña, España, 1 al 2 de marzo de 2017.
- <http://www.apt-conference.com/program.html>

Comité Ejecutivo de la IAHR.

- Pekín, China, 9 al 15 de marzo de 2017.
- <https://www.iahr.org/>

IX Congreso Nacional de Impacto Ambiental.

- Zaragoza, España, 28 al 31 de marzo de 2017.
- <http://www.icog.es/aragonhome/ix-congreso-nacional-evaluacion-impacto-ambiental/>

"Advances in Liquid Scintillation Spectrometry - LSC 2017", congreso por centelleo líquido (técnica de medida de radiactividad ambiental).

- Copenhagen, Dinamarca, 1 al 5 de mayo de 2017.
- <http://lsc2017.nutech.dtu.dk/>