

**Estudio avanzado de la capacidad resistente de
pavimentos bituminosos con i.tech CARGO**

Proyecto de Investigación

HEIDELBERGCEMENT
HISPANIA

Granada, abril 2020



Estudio avanzado de la capacidad resistente de pavimentos bituminosos con i.tech CARGO

Informe de Resultados

Contenido

1. ANTECEDENTES.....	4
2. OBJETIVOS.....	4
3. METODOLOGÍA	4
2.1 Materiales	4
2.2 Plan de trabajo	7
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	17
5. CONCLUSIONES.....	33
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

1. ANTECEDENTES

Los pavimentos percolados son un sistema mixto de pavimentación en el que a una mezcla bituminosa con un elevado contenido de huecos se rellena con una lechada (en base cemento o resina sintética) la cual puede incorporar carga mineral, resinas, fibras y distintos aditivos. A través de este proceso, es posible obtener estructuras semi-rígidas con resistencia mejorada a las deformaciones permanentes, así como a las cargas estáticas y al punzonamiento. Junto a esto, la aplicación de la lechada permite incrementar la impermeabilización del pavimento en su capa de rodadura minimizando su afección por el ataque de combustibles, fundentes y otros agentes químicos.

Así, y de acuerdo a estas características, estos materiales se plantean como soluciones para la construcción de pavimentos sometidos a niveles de carga/ambientales especiales como puedan ser zonas de elevadas tensiones, aeropuertos, puertos, pavimentos sometidos a ciclos de hielo/deshielo, pavimentos industriales, terminales de carga y almacenes, zonas de estacionamiento de vehículos pesados, rutas de acceso para vehículos de carga, firmes con elevado tráfico lento pesado, paradas de autobús, áreas de peaje, corredores para vehículos militares, etc.

El presente estudio de investigación se centra en la evaluación de la tecnología i.tech CARGO (lechada cementosa autofiltrante que se utiliza en combinación con un pavimento asfáltico poroso) desarrollada por HeidelbergCement para la construcción de pavimentos bituminosos percolados. Este informe recoge los principales resultados obtenidos correspondientes a la caracterización del comportamiento mecánico de mezclas percoladas con i.tech CARGO, en comparación con mezclas bituminosas convencionales.

2. OBJETIVOS

En base a los antecedentes previamente expuestos, el presente estudio de investigación tiene como objetivo principal evaluar el comportamiento mecánico de pavimentos asfálticos percolados fabricados a partir de i.tech CARGO en comparación con el de un pavimento bituminoso convencional.

3. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

La presente investigación contempla el estudio de dos tipos de materiales: uno compuesto por una mezcla porosa tipo PA16 B35/50 con árido calizo y percolada con i.tech CARGO y otro por una mezcla semidensa tradicional AC 16 B35/50 S con árido ofítico (utilizada a modo de referencia). Ambos materiales fueron diseñados y fabricados por una empresa productora de mezclas asfálticas a petición de HeidelbergCement Hispania y posteriormente enviados al Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC.UGR) para su evaluación. Para ello, en una zona anexa a la planta asfáltica

donde fueron fabricadas, se construyeron varios tramos de 4 metros de longitud y diferentes espesores (4, 6 y 8 cm) con cada tipo de material (Figura 1), de los que posteriormente extrajo probetas de dimensiones 300 x 300 mm (de 4 cm de espesor) y 400 x 256 mm (de 4, 6 y 8 cm de espesor), las cuales fueron remitidas a la Universidad de Granada para su caracterización mecánica a través de distintos métodos de ensayo (Figura 3).

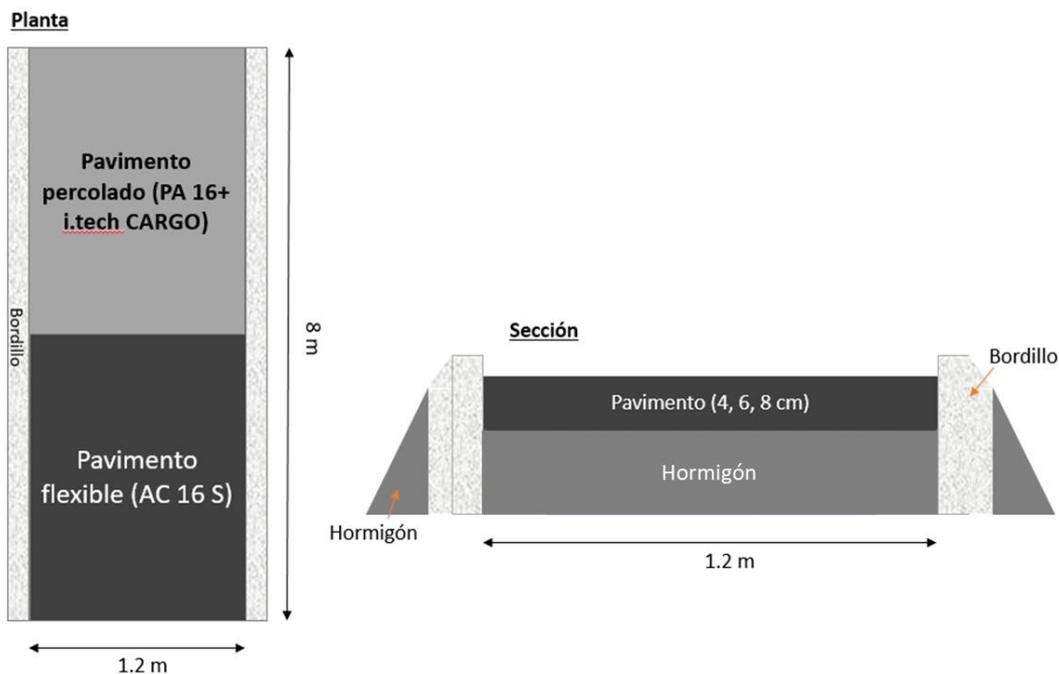


Figura 1. Esquema de los tramos de ejecutados.



Figura 2. Aspecto del pavimento tras su percolación con i.tech CARGO.



Figura 3. Detalle de los pavimentos ejecutados y de la extracción de probetas para su estudio.

Tras su recepción, y como primera parte de la caracterización de los materiales, se determinó la densidad de las distintas probetas recibidas (Figura 4). En este sentido, tal y como se puede apreciar en la Figura 5, las probetas correspondientes al pavimento flexible presentan en términos medios mayores densidades que las correspondientes al pavimento percolado. No obstante, y para el menor espesor estudiado (4 cm) es posible encontrar probetas con una densidad similar en ambos tipos de pavimento siendo la variabilidad entre probetas menor en el caso del pavimento percolado (4% contra el 7% encontrado en el pavimento convencional). Al aumentar el espesor, la densidad tiende a mantenerse más constante en el caso del pavimento ejecutado con i.tech CARGO mientras que, en el caso del pavimento flexible, se incrementa a medida que crece el espesor estudiado.



Figura 4. Aspecto de las probetas recibidas en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada.

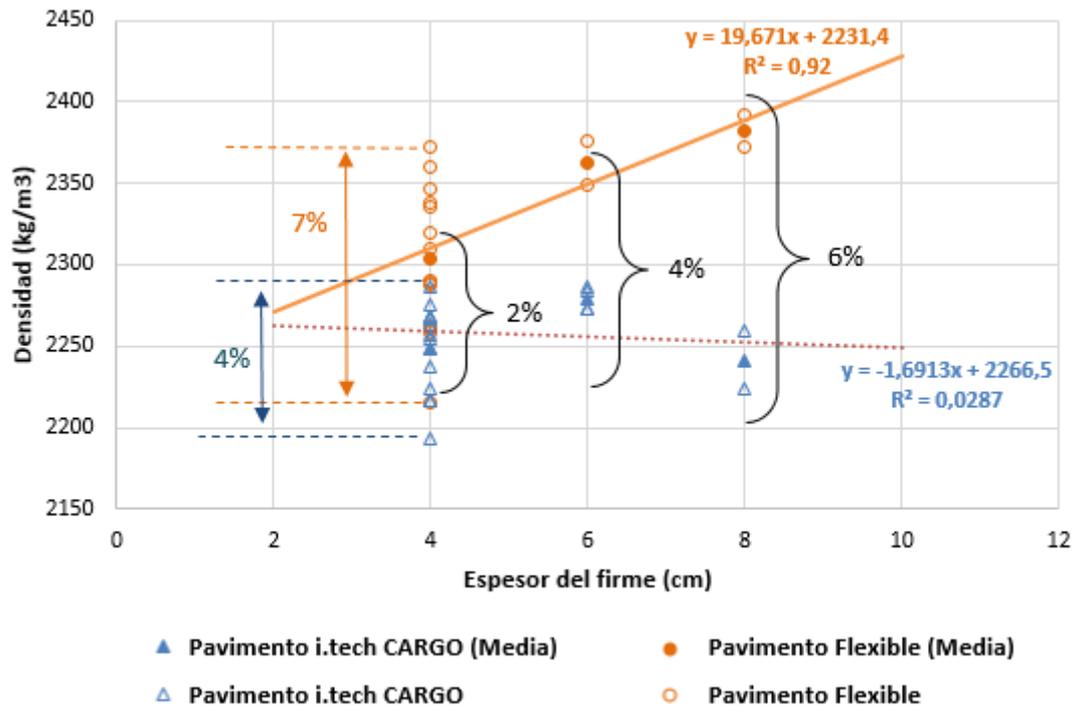


Figura 5. Densidad de las probetas recibidas.

2.2 Plan de trabajo

A lo largo de todo el estudio se llevaron a cabo distintos ensayos para la caracterización del comportamiento mecánico de ambos tipos de materiales. En primer lugar, se estudiaron las características superficiales de los pavimentos. En este sentido, y como parámetro para evaluar las propiedades relacionadas con la seguridad vial (adherencia neumático/pavimento), se evaluó la **resistencia al deslizamiento** de las dos soluciones (pavimento con i.tech CARGO y pavimento bituminoso tradicional). Para ello, se empleó el ensayo resistencia al deslizamiento con péndulo de fricción (UNE EN 13036-4) realizado sobre probetas de 300 x 300 mm (Figura 6), en el que se desliza un patín de caucho normalizado (desde una posición horizontal y altura dada), registrando la oposición que el pavimento ofrece a su avance a través de una escala graduada. Durante el ensayo, se realizan cinco mediciones humedeciendo la superficie de contacto patín/probeta en cada una de ellas, siendo el valor de ensayo de péndulo (PTV) la media de estas.



Figura 6. Péndulo de fricción empleado en la determinación de la resistencia al deslizamiento.

Dentro de las características superficiales, también se evaluó la macrotextura de las mezclas mediante el ensayo de "Medición de la profundidad de la macrotextura superficial del pavimento mediante el método volumétrico" (UNE EN 13036-1). Este ensayo consiste en extender sobre su superficie un volumen determinado de arena, distribuyéndola y enrasándola posteriormente mediante un dispositivo adecuado (Figura 7). A partir del volumen de arena y del área cubierta por esta sobre el pavimento, se calcula la profundidad media de los huecos rellenos por la arena obteniendo así una medida de la macrotextura de la superficie.



Figura 7. Esquema de la evaluación de la macrotextura a través del ensayo de círculo de arena.

Posteriormente, se plantearon una serie ensayos destinados a evaluar la **resistencia a los agentes químicos y el combustible**, así como sus **propiedades impermeabilizantes**. Para ello se utilizó el permeámetro LCS (acorde a la norma NLT-327/00) y el ensayo de resistencia a los combustibles. El ensayo de permeabilidad se basa en la medición del tiempo que tarda en pasar un volumen fijo de agua a través del pavimento. Para ello se emplea una base de acero circular apoyada sobre el mismo con un hueco conectado a un tubo por el que se introduce el agua (Figura 8), cronometrando el tiempo que tarda en atravesar la mezcla, que se ha dejado saturar previamente.



Figura 8. Ensayo de permeabilidad empleado en el estudio.

Por su parte, la evaluación de la resistencia a la acción de los combustibles se llevó a cabo de acuerdo a un procedimiento de ensayo desarrollado por la Universidad Granada, consistente en el vertido de una cantidad controlada de combustible (0.5 litros) sobre una zona delimitada de la probeta dejando actuar el mismo durante 48 horas. Posteriormente, se lava la probeta hasta que el agua de lavado tenga una acidez cuyo pH sea $7 \pm 0,5$ dejando tras ello secar otras 24 horas. Transcurrido ese tiempo se cuantifica la pérdida de masa de material producida y posteriormente se somete al paso repetido de una carga rodada a una temperatura constante de 25 °C, siguiendo un procedimiento similar al recogido en la norma UNE EN 12697-22. El efecto negativo provocado por la presencia de vertidos de combustibles en pavimentos bituminosos se ve notablemente incentivado por la presencia de los esfuerzos transmitidos por el tráfico (que provocan la pérdida de material y la aparición de deformaciones plásticas). Así, este procedimiento de ensayo permite caracterizar de forma conjunta la respuesta mecánica del material ante esta combinación de solicitaciones que puede darse en pavimentos como los de tipo portuario y aeroportuario.

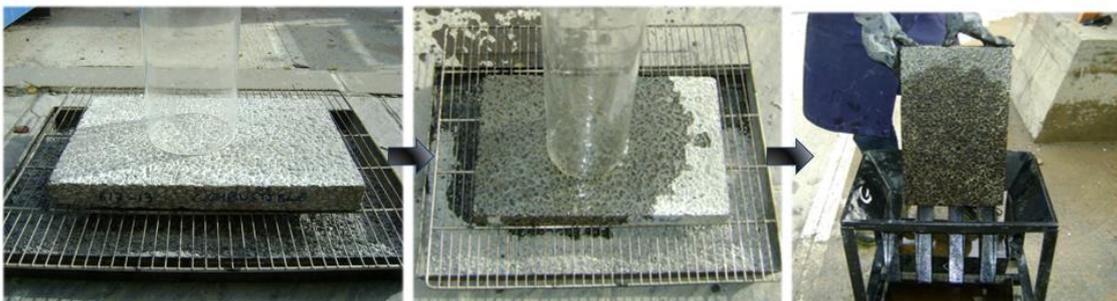


Figura 9. Esquema del acondicionamiento de las probetas para la evaluación de la acción de los combustibles.

Otra de las ventajas a aportar por las mezclas percoladas con i.tech CARGO es una mayor resistencia para soportar elevadas cargas mecánicas y climatologías extremas. En base a ello, se evaluó la resistencia de ambos materiales a la **degradación mecánica por efectos del tráfico, el agua y la temperatura**. Para ello se utilizó el ensayo de rueda cargada de

Hamburgo (AASHTO TP 63) a través del cual es posible simular el paso de tráfico pesado en condiciones de seco y húmedo (con el material sumergido) a elevadas temperaturas (60° C, Figura 10). Los resultados obtenidos en ambos materiales y para diferentes condiciones ambientales (seco y húmedo), evalúan la profundidad de rodadura alcanzada tras la aplicación de 10.000 ciclos de carga, así como la pendiente de deformación entre los ciclos 5.000 y 10.000 (como medida de la velocidad de deterioro del material).

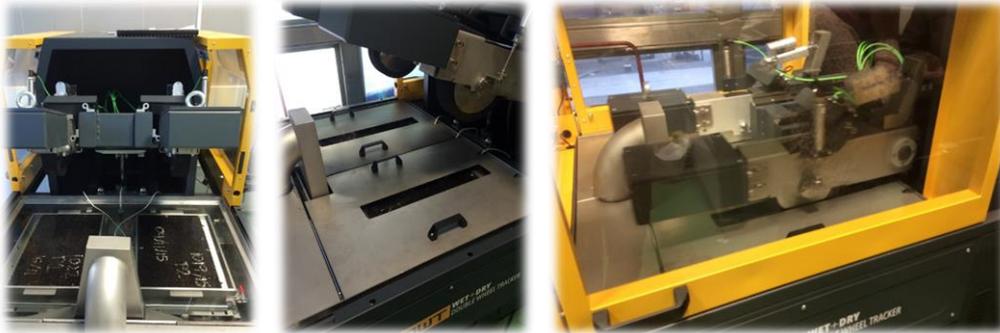


Figura 10. Ensayo Hamburgo empleado en el estudio.

Al ser utilizados en capas de rodadura, también es interesante evaluar la **resistencia de este tipo de materiales ante los gradientes térmicos**. Para ello se empleó el método TSRST (Thermal Stress Retained Specimen Test, UNE EN 12697-46), el cual permite medir la resistencia a fisuración del material debido a retracciones térmicas por bajas temperaturas (Figura 11).



Figura 11. Ensayo TSRST empleado para la evaluación de resistencia a gradientes térmicos.

Junto con ello, se evaluó su **resistencia mecánica ante elevados niveles de carga** como los producidos en pavimentos portuarios, aeroportuarios o industriales. En este sentido, se

analizó la resistencia a deformaciones plásticas debidas a esfuerzos de punzonamiento provocados por el apilamiento y almacenaje de cargas elevadas (contenedores, etc.). El ensayo se lleva a cabo a 25 °C, y consiste en someter a diferentes niveles de tensión (2,6 MPa y 5,2MPa, para evaluar distintas cargas de almacenamiento), durante un tiempo de 10 horas (tiempo suficiente para analizar la fluencia de estos materiales bajo dichas cargas), a probetas de 300 mm x 300 mm de cada tipo de material (confinadas en un molde metálico que simula su confinamiento durante su vida de servicio, Figura 12). Como resultados del ensayo, se obtiene una curva de fluencia, a partir de la cual se evalúa la resistencia a deformación por punzonamiento de cada material (a menor velocidad de punzonamiento, mayor resistencia del mismo).



Figura 12. Ensayo de punzonamiento estático para la evaluación de cargas de almacenamiento.

Por otra parte, se determinará la susceptibilidad de los materiales ante cargas de esfuerzos dinámicos (como las causadas durante las operaciones de descarga de contenedores en puertos o el aterrizaje de aviones). Para este ensayo, se utilizan probetas similares a las descritas en el caso anterior (de 300 x 300mm confinadas dentro de un molde metálico) sobre las que se aplican dos condiciones de carga. En primer lugar, 30 impactos a través de la caída de una maza (con un peso aproximado de 25 kg) a una altura constante de 10 cm y, en una segunda evaluación 3 series de 10 impactos a diferentes alturas de 10 cm, 25 cm y 40 cm desde la superficie de la probeta para evaluar el comportamiento ante un incremento paulatino de la sollicitación recibida. El ensayo se realiza a una temperatura de 25°C y los resultados muestran la evolución de la profundidad de la indentación del actuador tras cada impacto.



Figura 13. Esquema del ensayo de resistencia a las cargas por impacto dinámicas.

También, se evaluó la **resistencia a deformaciones permanentes** de los materiales bajo la acción vehículos pesados circulando a bajas velocidades (típico de zonas con tráfico lento canalizado). Durante este ensayo las probetas se someten a la acción de 10.000 ciclos de una rueda que aplica una tensión de 900 kPa. El ensayo se realiza a 60°C y como resultados se calcula la pendiente de la curva de fluencia entre los ciclos 5.000 y 10.000, y el valor de profundidad de la rodera.



Figura 14. Ensayo para la evaluación de la resistencia a deformaciones permanentes frente a tráfico lento pesado.

Finalmente, otra de las consideraciones más importantes a la hora de evaluar el comportamiento mecánico de este tipo de soluciones es analizar su **capacidad portante** y **resistencia a la propagación de defectos procedentes de las capas inferiores**. Para ello, se utilizó el método de ensayo UGR-FACT (University of Granada – Fatigue Asphalt Cracking Test), que permite analizar la resistencia a la propagación de fisuras bajo cargas de fatiga similares a las inducidas por el tráfico. Gracias a este método se estudió la respuesta mecánica a largo plazo de la solución con i.tech CARGO (vida de fatiga), comparándola con la obtenida por materiales asfálticos tradicionales. En este sentido se llevaron a cabo ensayos el estudio de la influencia del espesor del firme a fin de determinar si el uso de i.tech CARGO permite optimizarlo.

El ensayo UGR-FACT permite generar desplazamientos horizontales y verticales en la probeta que al combinarlos (Figura 15), reproducen esfuerzos de flexión y cortante (como los debidos al paso del tráfico), así como de tracción (simulando el efecto de los gradientes térmicos), que simulan los esfuerzos mecánicos sufridos en el pavimento por el tráfico y los gradientes térmicos (los cuales son los principales causantes del fallo estructural de estas infraestructuras).

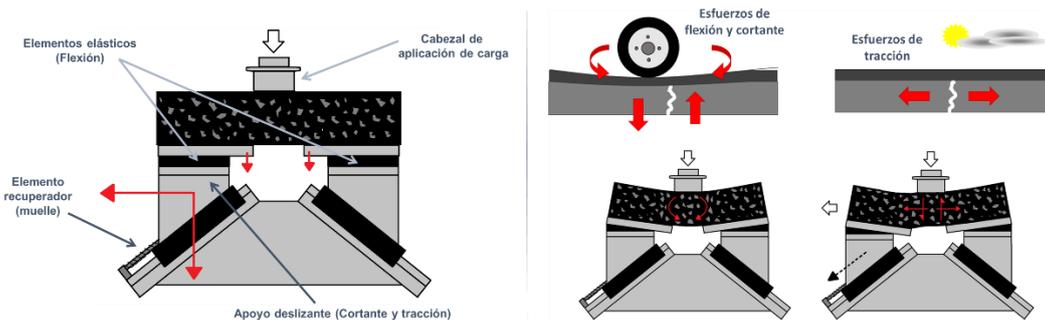


Figura 15. Esquema del dispositivo empleado en el método UGR-FACT.

Este dispositivo está compuesto por una base (Figura 16a), dos apoyos donde se fija la probeta (Figura 16b), y un cabezal de aplicación de carga (Figura 16c). La base tiene una plataforma compuesta por dos planos inclinados, con dos raíles que permiten el deslizamiento de los apoyos, y dos vástagos verticales que se emplean para colocar los medidores LVDT (Linear Variable Differential Transformer, para controlar desplazamientos y deformaciones) verticales en la zona superior de la probeta (Figura 16d). Los apoyos están formados por un carro que se adapta a la forma del raíl situado en la plataforma (permitiendo así una transmisión eficiente de la carga aplicada por el cabezal), y por un plato (en el que se fija la probeta mediante el empleo de una resina epoxy) donde se posicionan los medidores LVDT horizontales (Figura 16e). Además, bajo dichos platos se coloca una almohadilla elástica para permitir la flexión de la probeta (Figura 16f), y bajo el carro un muelle que permite simular la resistencia ofrecida por las capas del cimiento de firme (Figura 16g).

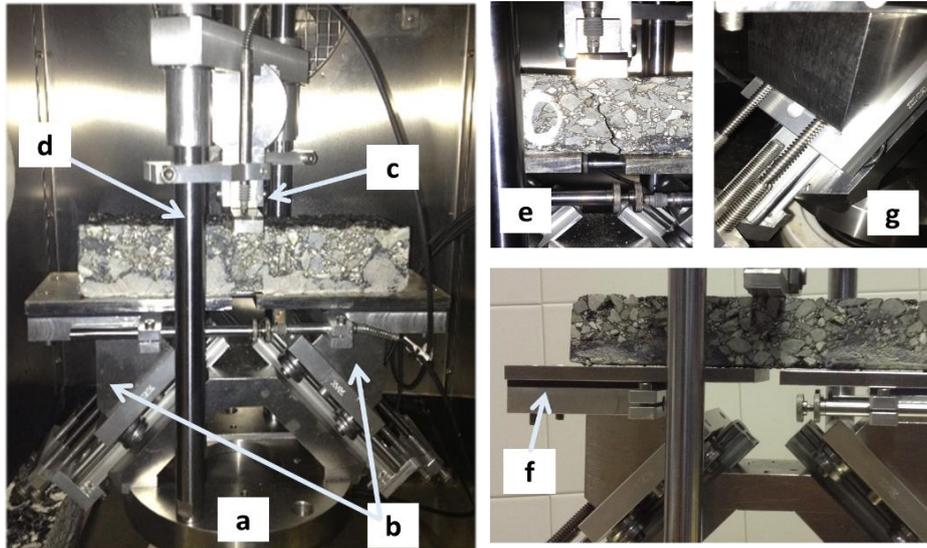


Figura 16. Detalle del dispositivo de ensayo UGR-FACT.

La resistencia del muelle puede variarse (adaptándola en base a las deflexiones existentes en las capas de cemento del firme, Figura 17), lo que permite simular diferentes calidades de explanada o características de capas subyacentes (a diferencia de otros ensayos que evalúan el material de manera individual sin tener en cuenta la influencia de la estructura soporte sobre la que va a ser colocado). Además, la distancia entre apoyos puede también adaptarse con el fin de simular diferentes tipos de deterioro eventuales bajo la capa de rehabilitación a estudiar (fisura, junta, bache, etc.).

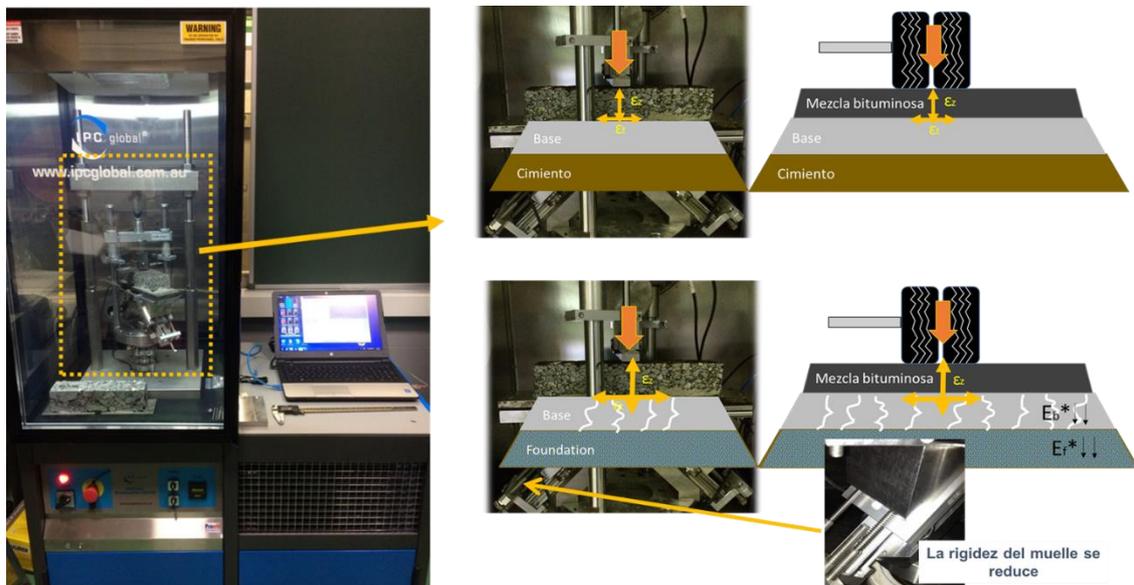


Figura 17. Ejemplo de variación de las características del cemento de firme.

El cabezal de aplicación de carga se compone por una pieza con una superficie plana donde posicionar los medidores LVDT verticales. Así, el dispositivo consta de 4 LVDT's repartidos

en cada cara de la probeta (Figura 18): dos verticales situados en la zona de máximo desplazamiento vertical (zona superior); y dos horizontales situados en la zona de máximo desplazamiento horizontal (zona inferior). Gracias a esta configuración, el dispositivo UGR-FACT es capaz de medir la evolución del daño aparecido en un el volumen de material ensayado, evitando los problemas de aleatoriedad y dispersión tridimensional asociados a este fenómeno. Además, el hecho de controlar la respuesta mecánica del material a nivel volumétrico permite incrementar su homogeneidad (puesto que los materiales no solo deforman en la dirección de la carga, sino también en las direcciones transversales a la misma), y reducir así la variabilidad de los resultados obtenidos entre probetas (a diferencia de otros ensayos tradicionales, que utilizan unicamente un solo LVDT).

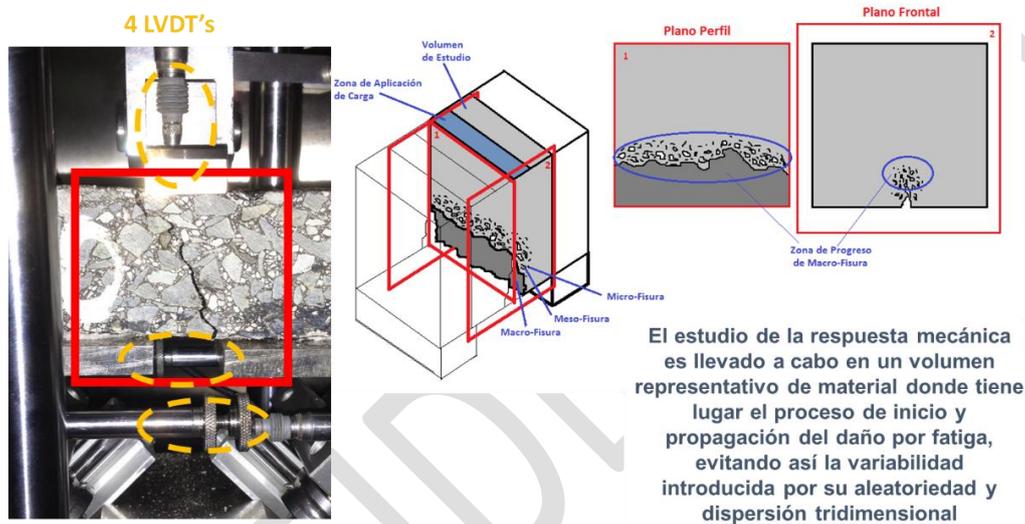


Figura 18. Control de la evolución del daño en el método UGR-FACT.

Finalmente, los desplazamientos medidos durante el ensayo UGR-FACT en función de la intensidad de carga, temperatura ambiente y espesor de capa, son directamente aplicados para definir leyes de fatiga y relaciones entre espesores y deformaciones, y posteriormente utilizados para determinar el tipo de material y dimensionamiento óptimo a utilizar entre las alternativas evaluadas (Figura 19).

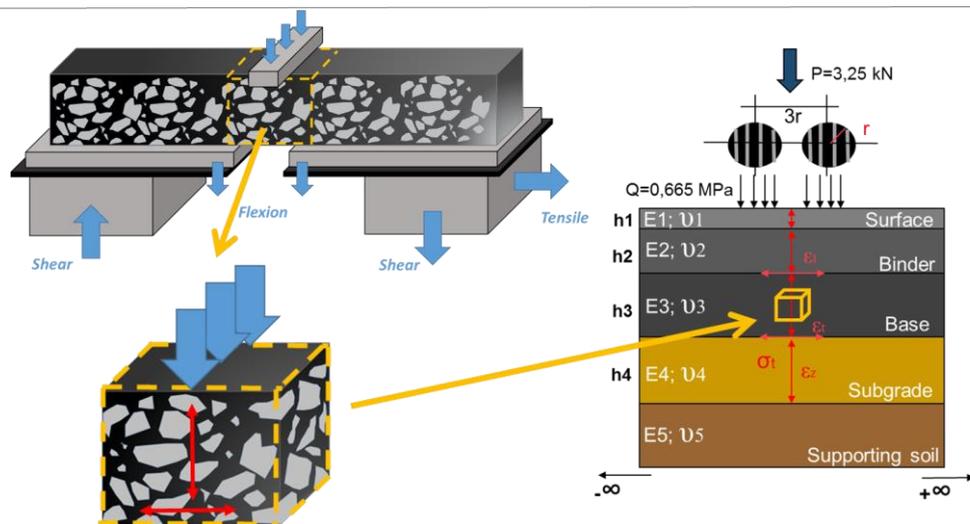


Figura 19. Detalle de los desplazamientos medidos con UGR-FACT.

Así, con cada una de las soluciones a estudiar (i.tech CARGO y pavimento flexible convencional) se fabrican probetas de diferente espesor (4, 6 y 8 cm). Dichas probetas son acondicionadas en cámara térmica (a 20 °C) y ensayadas bajo distintas intensidades de tráfico (tensiones de contacto de 0,3 MPa, 0,5 MPa, 0,7 MPa y 0,8 MPa). Utilizando la información obtenida en cada ensayo se establecen relaciones entre los desplazamientos horizontales sufridos en el fondo de capa (parámetro de referencia utilizado en el dimensionamiento de firmes bajo criterios de fallo por fatiga) y el número de ciclos aplicados hasta fallo del material (vida de fatiga), y entre el espesor de capa utilizado y los desplazamientos horizontales en el fondo de capa. En base estos resultados, se define el espesor equivalente de la solución i.tech CARGO con respecto al de la solución de referencia (pavimento flexible). Para ello, se determina el desplazamiento horizontal asociado al espesor de referencia a para las condiciones de carga y temperatura estudiadas (1). Posteriormente, a partir de dicho desplazamiento se calcula el número de ciclos capaz de soportar dicha sección de referencia (2). Utilizando este número de ciclos de carga, y haciendo un proceso inverso, se calcula el desplazamiento horizontal asociado en la solución alternativa con i.tech CARGO (3) y finalmente, a partir de éste último desplazamiento, se calcula el espesor equivalente de dicha solución (con respecto al material de referencia). A modo resumen, la Figura 20 muestra un esquema del proceso de análisis llevado a cabo en estudio presentado.

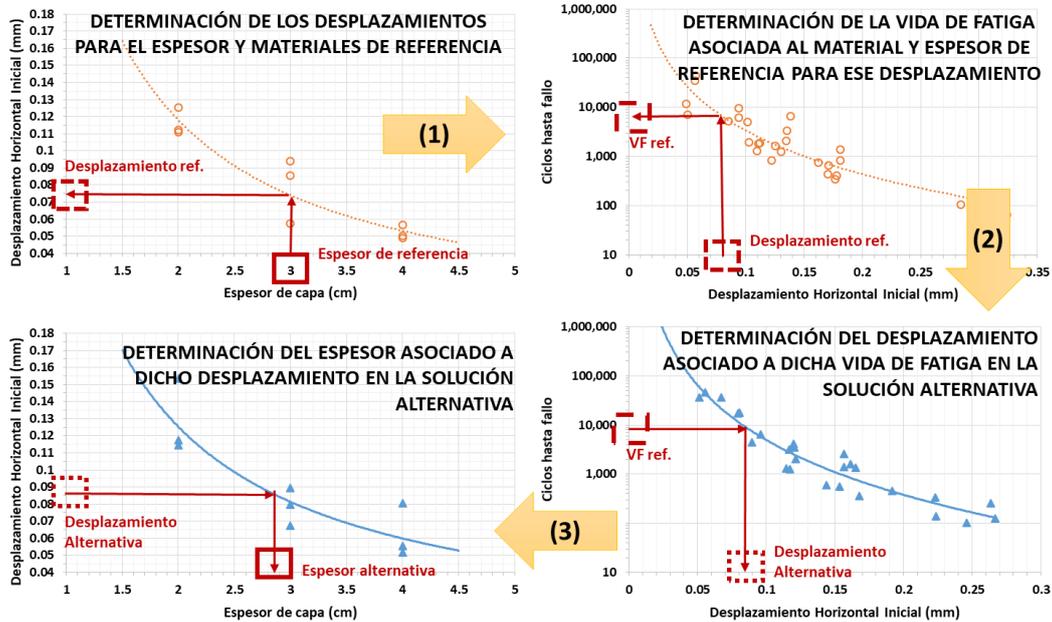


Figura 20. Resumen del proceso de análisis llevado a cabo en el estudio de espesores con UGR-FACT.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Figura 21 muestra los resultados relativos a la resistencia al deslizamiento de ambos materiales. Como se puede comprobar, el pavimento percolado es un 6,4% menos resistente al deslizamiento que el pavimento bituminoso convencional.

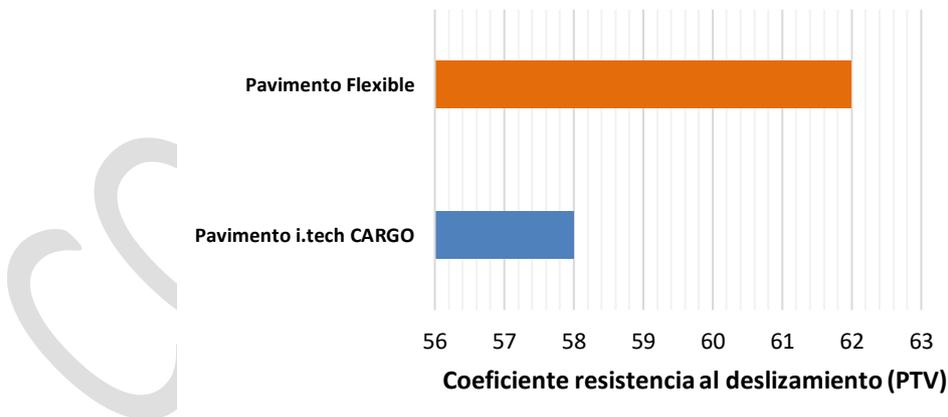


Figura 21. Coeficiente de resistencia al deslizamiento de las soluciones estudiadas.

En este mismo sentido, se puede apreciar cómo el círculo de arena empleado en el análisis de la macrotextura de las mezclas evaluadas es más amplio en el caso del pavimento fabricado con la tecnología i.tech CARGO, indicando una menor rugosidad de la superficie de este pavimento (Figura 22).

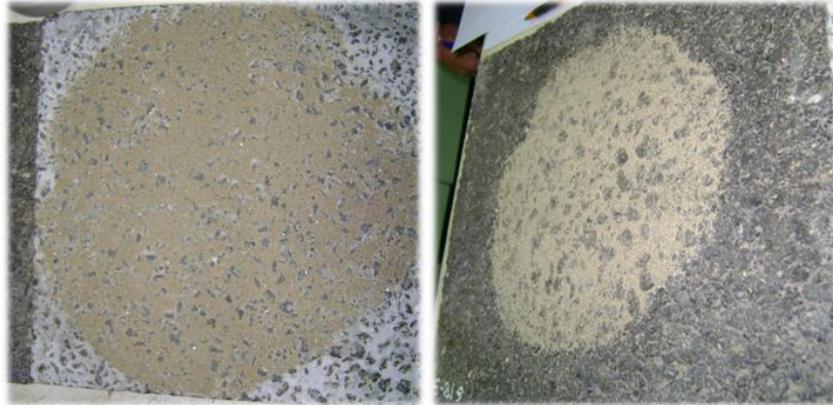


Figura 22. Círculos de arena obtenidos en la evaluación de la macrotextura del pavimento i.tech CARGO (izquierda) y el pavimento flexible (derecha).

De acuerdo a lo observado, la Figura 23 muestra como ambos pavimentos cumplen con las exigencias recogidas en el PG-3 para mezclas utilizadas en capa de rodadura (las cuales establecen un valor mínimo de profundidad de 0.7 mm). No obstante, al utilizar la solución i.tech CARGO se reduce la macrotextura alrededor de un 63% con respecto al pavimento bituminoso convencional.

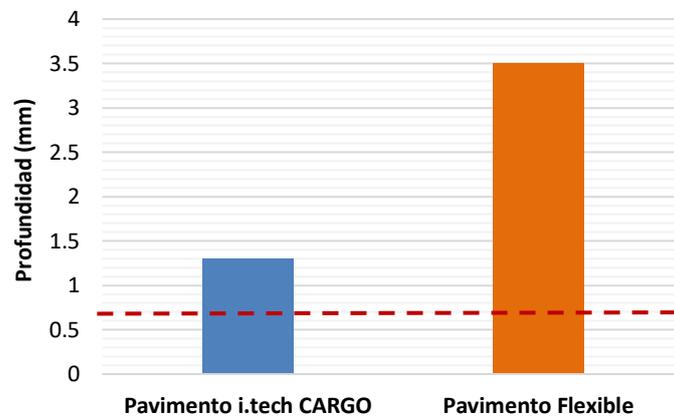


Figura 23. Resultados de la caracterización de la macrotextura de los pavimentos.

La Figura 24, muestra la mayor impermeabilidad del material percolado con i.tech CARGO (hasta cuatro órdenes de magnitud más que una mezcla convencional), siendo de esta forma mucho menos susceptibles a la acción del agua y protegiendo a su vez las capas inferiores del firme.

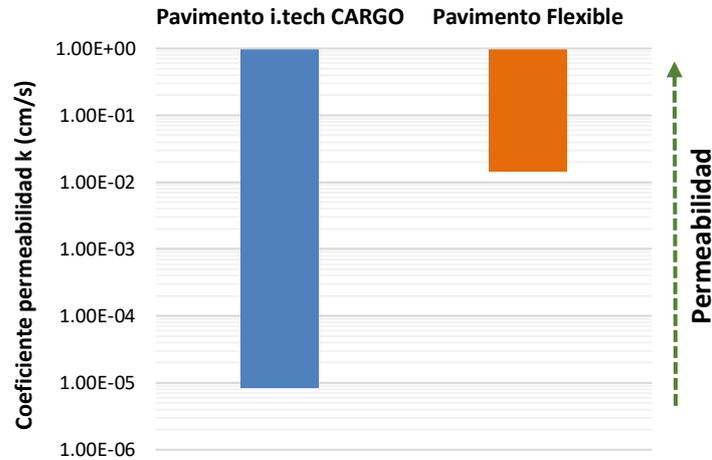


Figura 24. Resultados de permeabilidad de los pavimentos estudiados.

La Figura 25 presenta las pérdidas de masa registradas en las probetas acondicionadas bajo la acción de combustibles. En ella se observa cómo las pérdidas de material son mucho más altas en el caso del pavimento bituminoso convencional mientras que, en el caso del pavimento percolado, éstas permanecen en valores próximos al 0.2% (demostrando que el tratamiento aplicado es capaz de preservar de manera adecuada la integridad del material y aislarlo de la acción de agentes químicos).

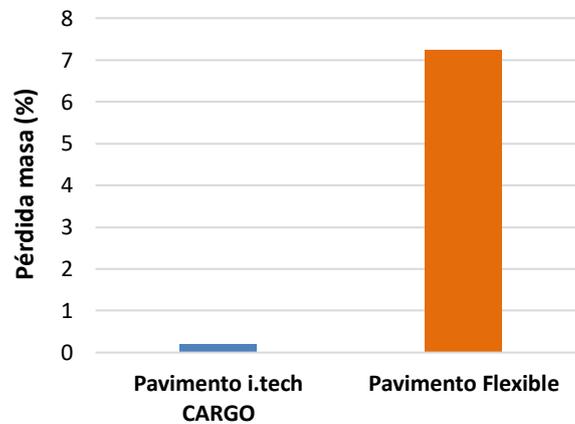


Figura 25. Pérdida de masa asociada a la resistencia a la acción del combustible de las soluciones estudiadas.

En la Figura 26 se puede apreciar visualmente las consecuencias de la pérdida de masa acaecida en el pavimento bituminoso tras el acondicionamiento y durante el proceso de lavado. Dicha pérdida de partículas daña gravemente la integridad del material hasta el punto que el pavimento acaba por desintegrarse al comienzo del ensayo de rodadura.

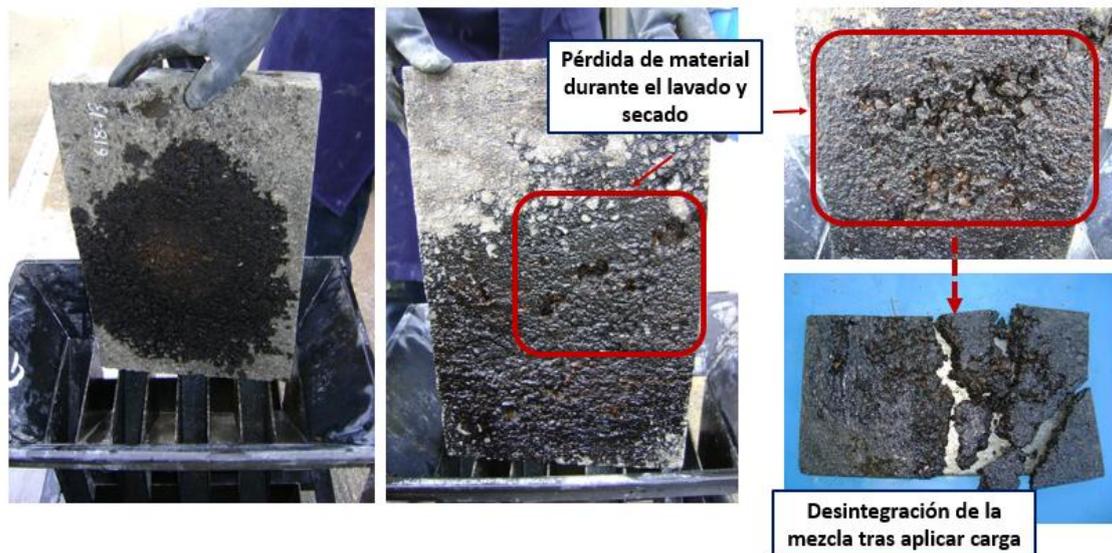


Figura 26. Pérdida de integridad del pavimento bituminoso convencional tras el acondicionamiento para la evaluación de la resistencia al combustible.

Como contraposición a éste, la solución del material percolado con i.tech CARGO no solo mantiene la integridad del material (Figura 27), sino que, pese a que la deformación se incrementa en relación a la que tendría el mismo pavimento antes de experimentar ningún tipo de vertido (algo más del doble), los valores de profundidad de rodera siguen siendo reducidos y la pendiente de deformación se mantiene por debajo del valor máximo de 0.07 recogido en el PG-3 para mezclas en capa de rodadura. De este modo, se comprueba cómo incluso tras la acción del combustible la resistencia a las deformaciones permanentes de este tipo de materiales es adecuada (Figura 28).

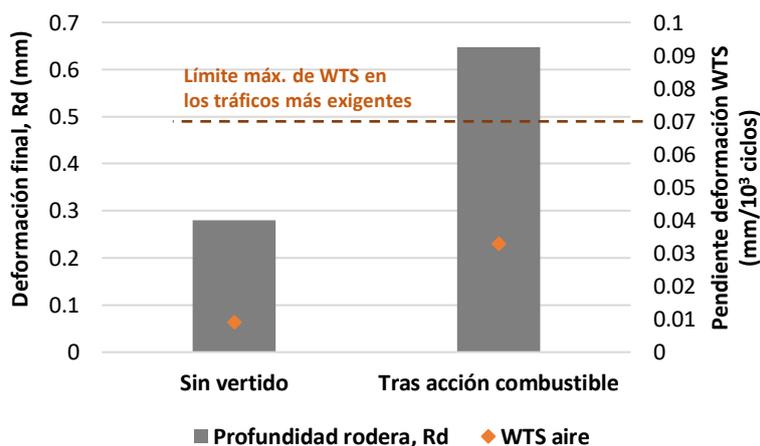


Figura 27. Comparativa de comportamiento del pavimento i.tech CARGO antes y después del vertido de combustibles.



Figura 28. Aspecto de la probeta de pavimento i.tech CARGO tras la acción del combustible.

La Figura 29 muestra la evolución de la profundidad de rodera durante el ensayo Hamburgo, tanto en condiciones de seco como en agua. En ella vuelve a ponerse de manifiesto la reducción de las deformaciones permanentes debida al empleo de i.tech CARGO. Dicha reducción (del orden del 98%) se mantiene tras la acción del agua con variaciones menores en el caso del material percolado (si se compara con la resistencia en condiciones de seco). Así, la susceptibilidad al agua del material bituminoso convencional es el doble (con deformaciones un 48% superiores en húmedo) que el de la mezcla percolada (alrededor de un 24 %).

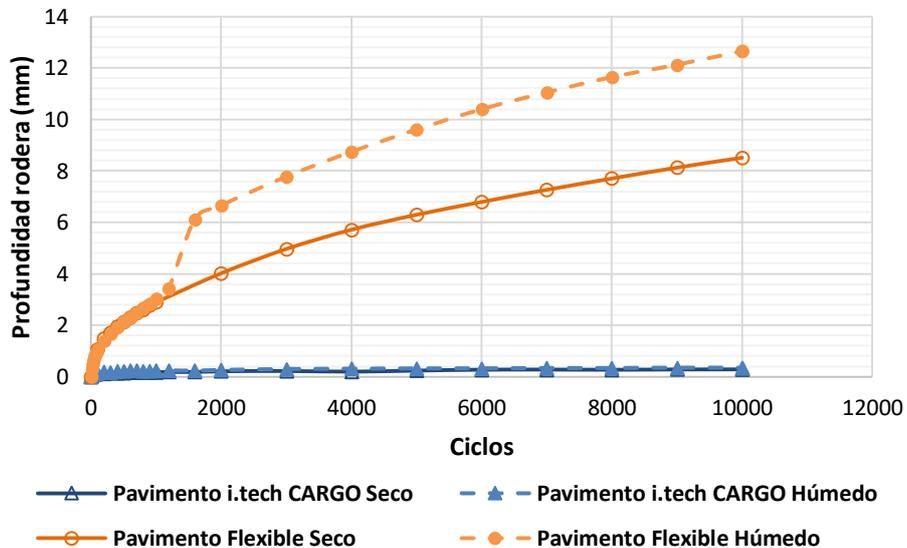


Figura 29. Evolución de la deformación en el ensayo Hamburgo en condiciones de seco y húmedo para los pavimentos estudiados.

Asimismo, la Figura 30 muestra como no solo la deformación al final del ensayo es menor en el caso de la mezcla percolada, sino que la velocidad de acumulación del daño también es inferior y, además, ésta no se ve afectada por la acción del agua (al contrario de lo que ocurre en el caso del material bituminoso convencional, Figura 31).

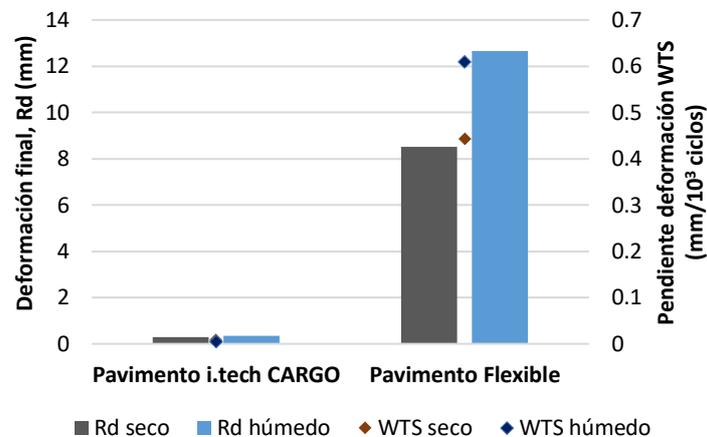


Figura 30. Comparativa entre los resultados de Hamburgo de los pavimentos estudiados.

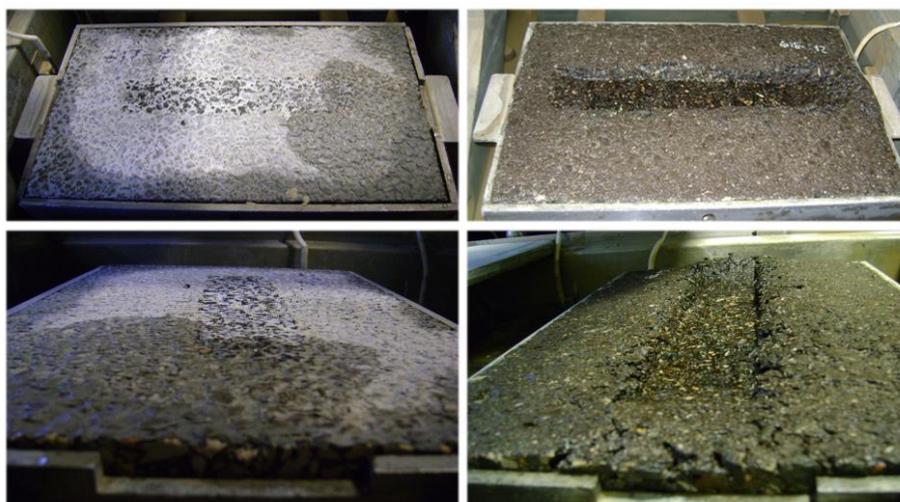


Figura 31. Aspecto de las probetas en húmedo tras el ensayo Hamburgo: mezcla percolada (izquierda); mezcla bituminosa convencional (derecha).

La Figura 32 muestra los resultados promedio del ensayo TSRST realizado para evaluar la susceptibilidad de los pavimentos a las bajas temperaturas. En ella se puede apreciar como a medida que se reduce la temperatura se generan unos niveles de tensión similares en ambos tipos de materiales. No obstante es necesario destacar que material percolado con i.tech CARGO a pesar de presentar mayores esfuerzos de retracción térmica, su temperatura de rotura es menor que el obtenido en el caso de la mezcla bituminosa convencional.

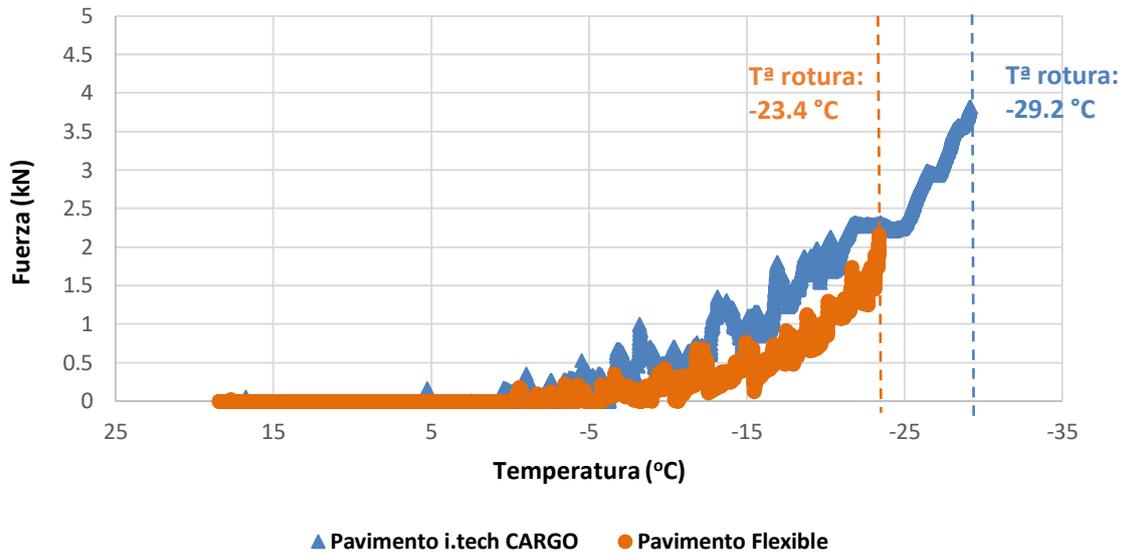


Figura 32. Resultados promedio del ensayo TSRST de los pavimentos estudiados.

La Figura 33 muestra las curvas de fluencia de los materiales estudiados obtenidas tras el ensayo de punzonamiento estático bajo diferentes niveles de carga. En ella se observa cómo para el menor de dichos niveles (2.6 MPa), los dos tipos de materiales muestran un comportamiento muy similar (aunque la solución fabricada con i.tech CARGO presenta una deformación final un 4.4 % menor que el pavimento bituminoso tradicional). Por el contrario, al aumentar la carga hasta los 5.2 MPa, las diferencias entre tipologías se hacen más marcadas, con una resistencia de la solución percolada un 20.5% mayor.

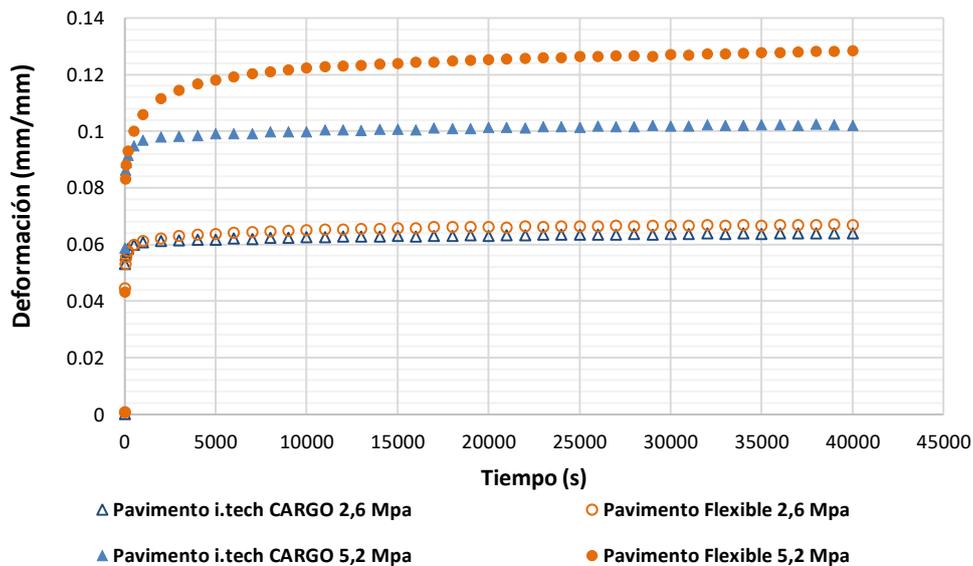


Figura 33. Curvas de fluencia de los pavimentos estudiados frente al punzonamiento estático.

La Figura 34 muestra como no solo la deformación registrada en el pavimento percolado es menor, sino que la velocidad a la que ésta aumenta también es más baja (lo que denota un menor grado de deterioro a lo largo de la vida de servicio del material). De igual modo, al aumentar la carga, la variación del ratio de deformación es mayor en el caso del pavimento bituminoso convencional.

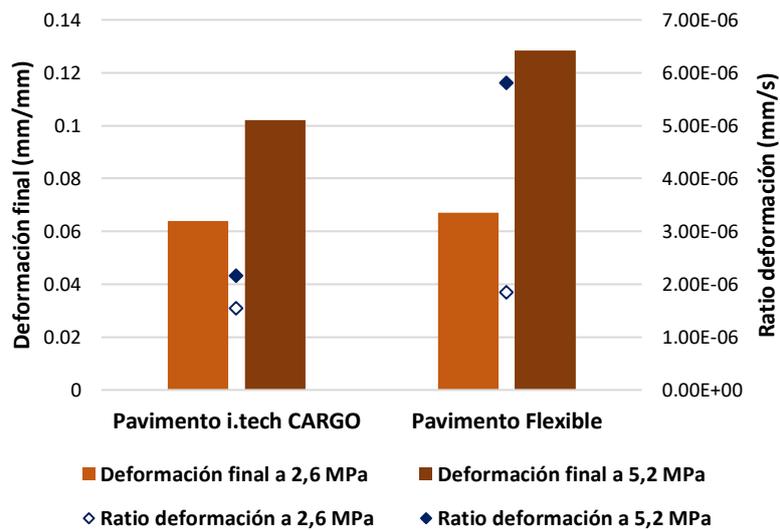


Figura 34. Resultados de punzonamiento estático a distintas cargas.

Las Figuras 35 y 36 muestran la evolución de la deformación producida en los materiales estudiados frente al punzonamiento dinámico. Cuando los impactos se producen en niveles constantes (Figura 35), pese a que la deformación al final del ensayo es similar, el modo en el que el pavimento responde a las cargas es diferente. El pavimento flexible muestra una evolución más lineal a la hora de acumular el daño retrasando la aparición de fisuras en el mismo, mientras que el pavimento percolado comienza a fisurarse antes (comportamiento más frágil) condicionando el modo el que el material responde a los impactos sucesivos.

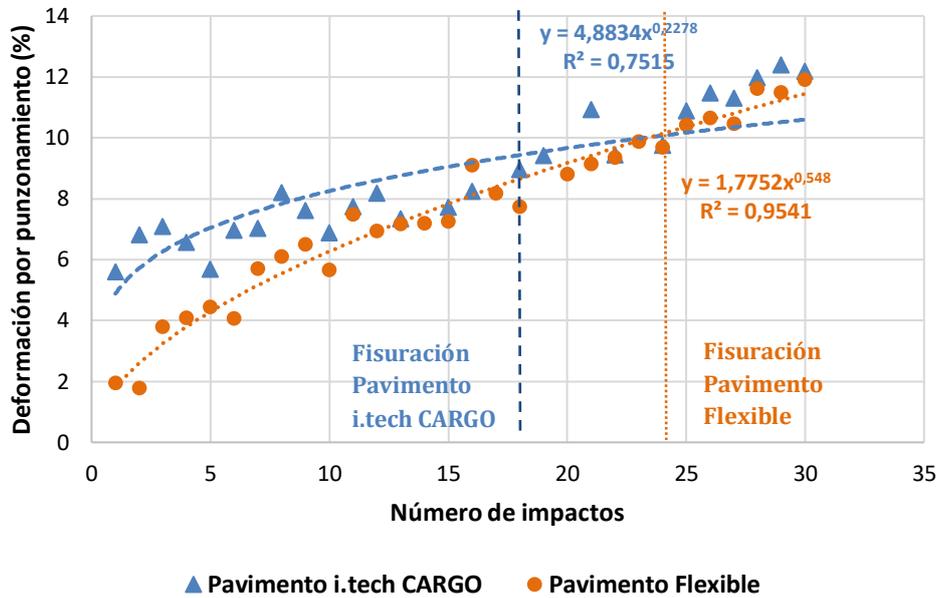


Figura 35. Resistencia a los impactos dinámicos a carga constante de los pavimentos estudiados.

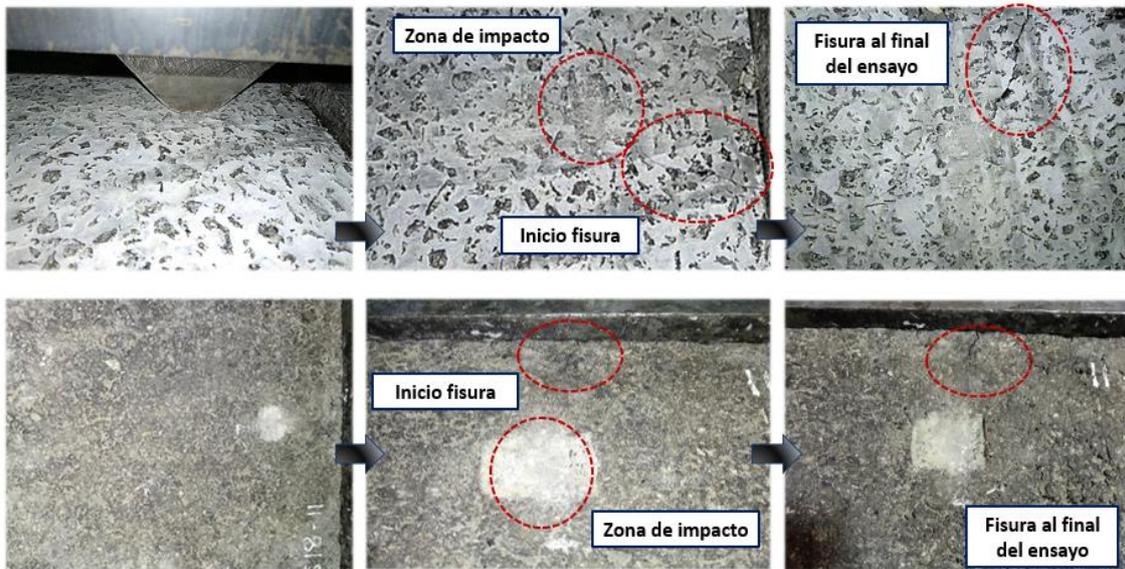


Figura 36. Evolución de la fisuración en los pavimentos (i.tech CARGO arriba, pavimento flexible abajo) durante el ensayo de impacto dinámico a carga constante.

Esta diferencia de respuesta se hace más marcada en el caso de la resistencia frente a cargas crecientes (Figura 37). El aumento de la altura de impacto, acelera la fisuración de los materiales condicionando en mayor medida la respuesta de la mezcla percolada, la cual presenta un comportamiento más rígido, pero a su vez, más frágil. Debido a esto, la deformación al final del ensayo es un 7.7% mayor que el caso del pavimento bituminoso convencional.

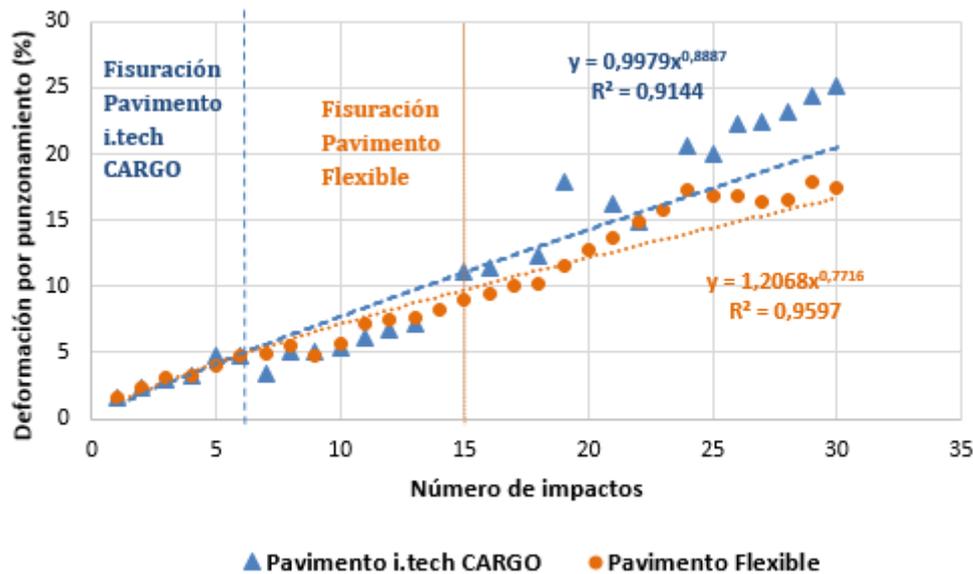


Figura 37. Resistencia a los impactos dinámicos a carga creciente de los pavimentos estudiados.

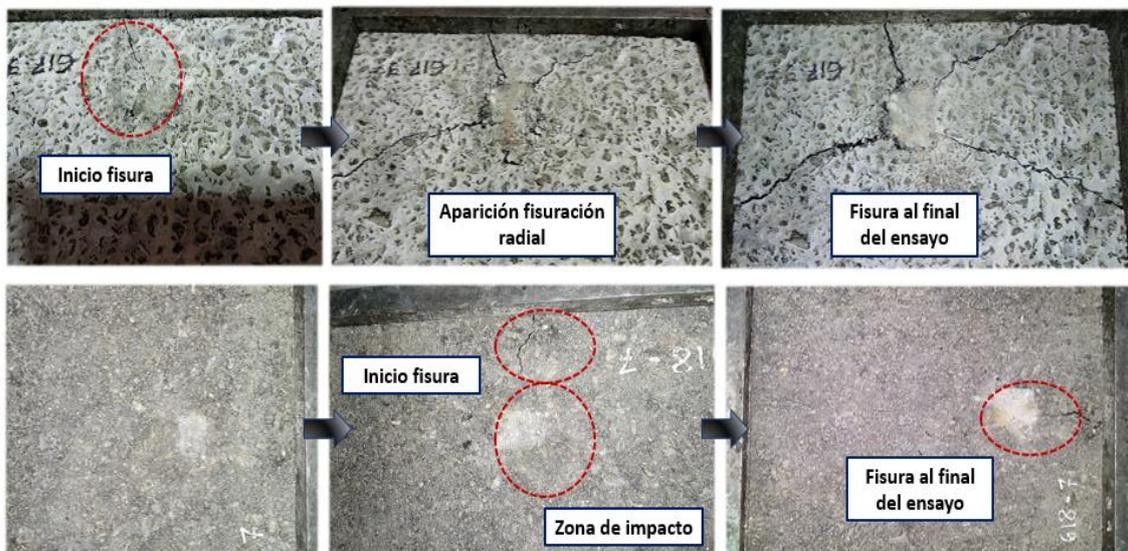


Figura 38. Evolución de la fisuración en los pavimentos (i.tech CARGO arriba, pavimento flexible abajo) durante el ensayo de impacto dinámico a carga creciente.

La Figura 39 muestra la diferencia de resistencia a las deformaciones permanentes de las dos soluciones estudiadas frente a la acción del tráfico lento pesado. Para este tipo de sollicitación el pavimento fabricado con i.tech CARGO presenta de nuevo una resistencia superior (un 95% mayor) a la del pavimento flexible, mostrando así una mayor capacidad portante y durabilidad.

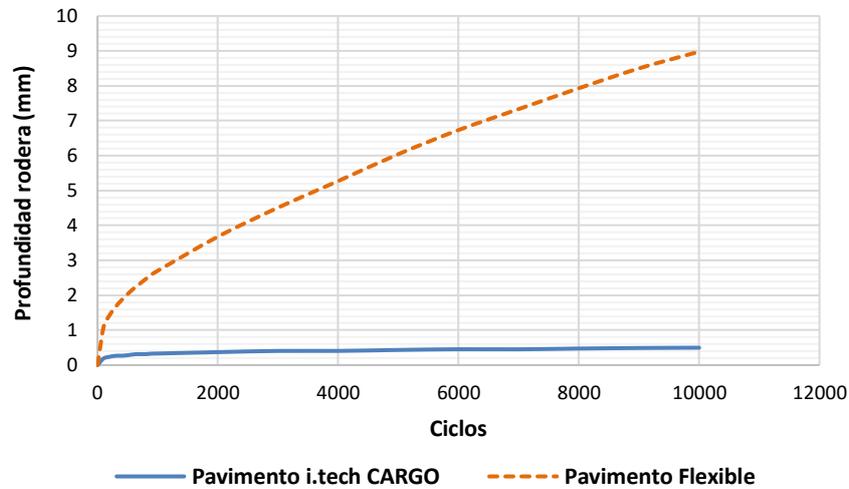


Figura 39. Evolución de la deformación para el ensayo de rodadura a altas cargas.

Con respecto a la deformación que se observaba en el ensayo Hamburgo en condiciones de seco, las deformaciones registradas son ahora mayores (Figura 40), sin embargo, la diferencia entre los dos tipos de pavimento se mantiene en el mismo rango. Por el contrario, se produce una mayor variación en la pendiente de deformación, la cual aumenta en mayor proporción en el caso del pavimento bituminoso convencional (lo que se encuentra en consonancia con los resultados mostrados en el caso del punzonamiento estático, donde la mezcla percolada con i.tech CARGO es menos sensible al aumento de las cargas).

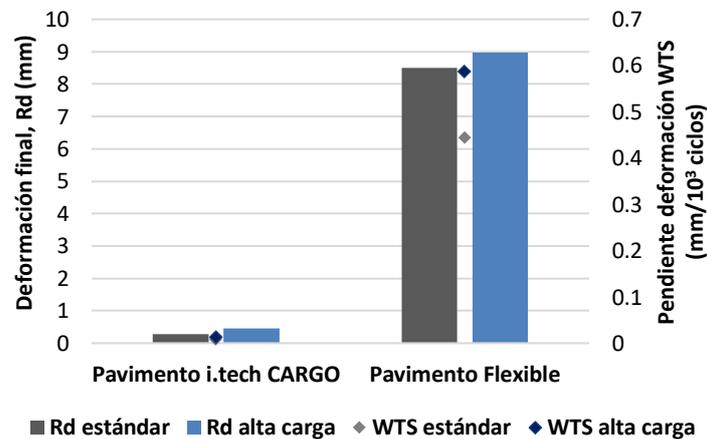


Figura 40. Comparación entre la resistencia a la deformación permanente a distintos niveles de tráfico.

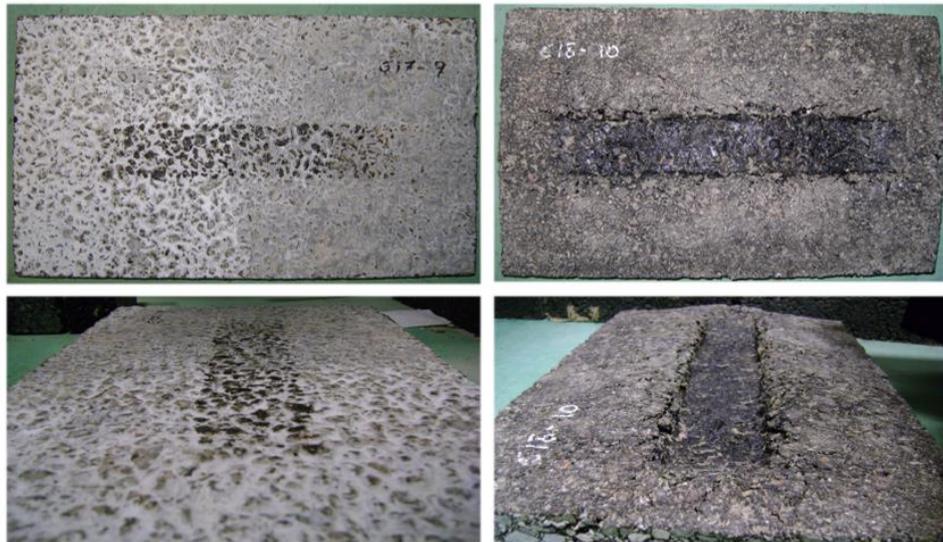


Figura 41. Aspecto de las probetas tras el ensayo de rodadura a altas cargas.

La Figura 42 muestra las leyes de fatiga de los dos materiales estudiados (definidas a partir de los desplazamientos iniciales obtenidos en el fondo de capa y el número de ciclos hasta fallo), obtenidas a partir de los ensayos UGR-FACT realizados sobre probetas de 4, 6 y 8 cm de espesor, a una temperatura de 20 °C, y bajo tensiones de contacto de tráfico de 0,3 MPa, 0,5 MPa, 0,7 MPa y 0,8 MPa. Como se puede observar, para un mismo nivel de deformación en el fondo de capa, el pavimento percolado con i.tech CARGO tiene una vida de fatiga en torno a 2-3 veces superior que la ofrecida por el pavimento bituminoso tradicional. Además, el rango de deformaciones sufridas en el fondo de capa para las diferentes condiciones de tráfico y espesores estudiadas es más reducido en la solución percolada (lo que denota una menor afección ante dichas variables).

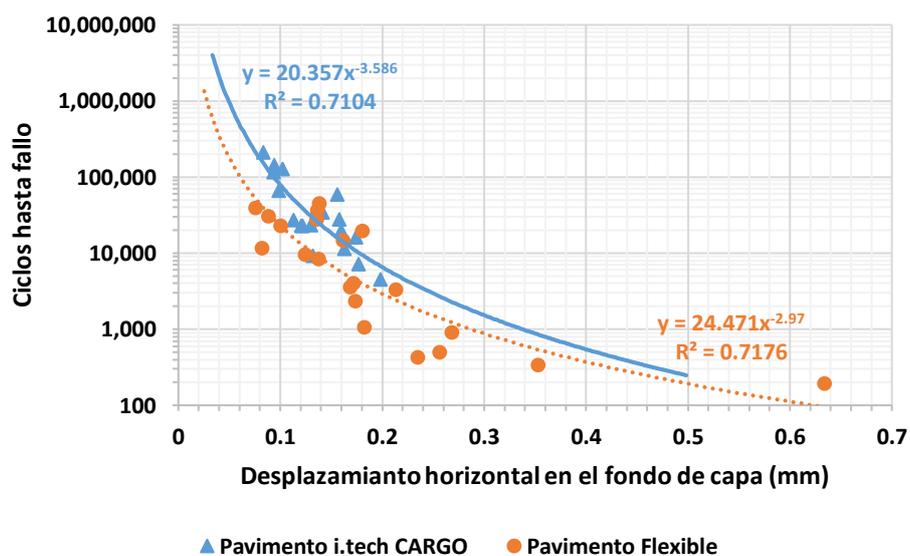


Figura 42. Leyes de fatiga de los materiales estudiados.

Este hecho queda patente en la Figura 43, donde se observa que para una intensidad de tráfico dada, la deformación sufrida en el fondo de capa del pavimento percolado es inferior a la del pavimento bituminoso, especialmente para espesores reducidos de capa. Así, y tal y como se ha confirmado en los ensayos anteriores, el pavimento fabricado con i.tech CARGO muestra una mayor capacidad estructural que el pavimento bituminoso convencional con el que se compara. Además, esta figura demuestra que la solución percolada es menos susceptible al incremento de la intensidad de las cargas del tráfico (apenas se ve afectada por el incremento de 0,5 MPa a 0,7 MPa).

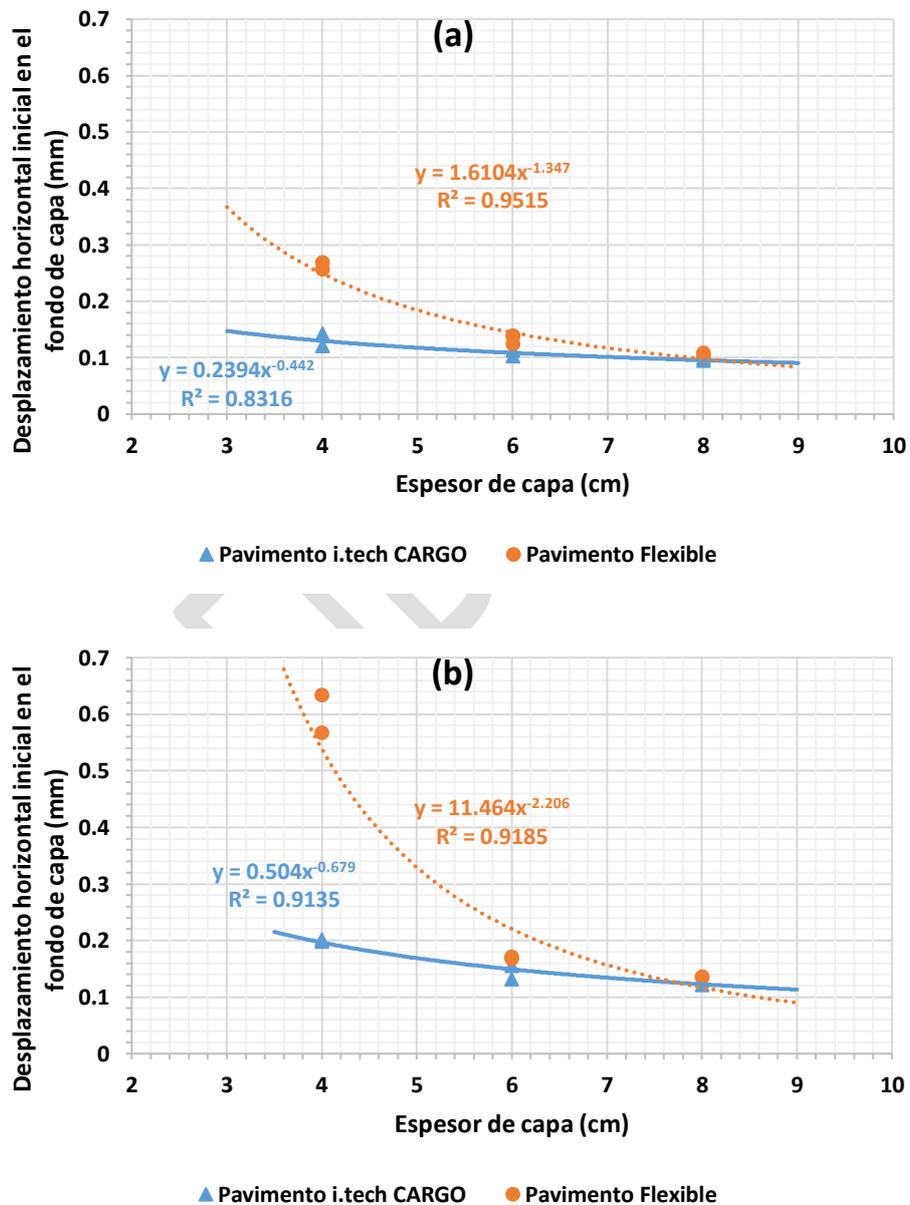


Figura 43. Desplazamientos sufridos en el fondo de capa en función de su espesor, para tensiones de tráfico de 0,5 MPa (a) y 0,7 MPa (b).

En base a estos resultados las Figuras 44-46 muestran algunos ejemplos de estudios de equivalencia estructural entre ambos tipos de pavimentos (1-Determinación de la deflexión en el fondo de capa del pavimento bituminoso para un espesor dado; 2-definición de la vida de fatiga del pavimento bituminoso para dicho nivel de deflexión; 3-determinación de la deflexión que provoca esa misma vida de fatiga en el pavimento percolado; 4-determinación del espesor de capa necesario para obtener dicha deflexión bajo las condiciones de tráfico y temperatura dadas). En la Figura 44 se puede observar como una capa de 8 cm de espesor del pavimento bituminoso estudiado equivaldría estructuralmente a una capa 3.5 cm del pavimento percolado con i.tech CARGO (lo que equivaldría a una reducción de espesor del 65%), bajo unas condiciones de tensiones de tráfico de 0,5 MPa y 20 °C de temperatura. No obstante, si incrementamos la intensidad del tráfico a 0,7 MPa (Figura 45), observamos cómo los 8 cm de pavimento bituminoso convencional equivaldrían a 5,4 cm de pavimento percolado con i.tech CARGO (reducción del 30%). Este hecho demuestra que conforme se incrementa la intensidad del tráfico, el efecto positivo causado por i.tech CARGO sobre la respuesta estructural del pavimento se ve reducido. Asimismo, la Figura 46 demuestra que conforme se incrementa el espesor de capa de firme, el efecto positivo causado por i.tech CARGO sobre la respuesta estructural del pavimento también se ve reducido (bajo una intensidad de tráfico de 0,7 MPa, una capa de 9 cm de pavimento bituminoso equivale a una de 7,4 cm de pavimento percolado, una reducción del 20%).

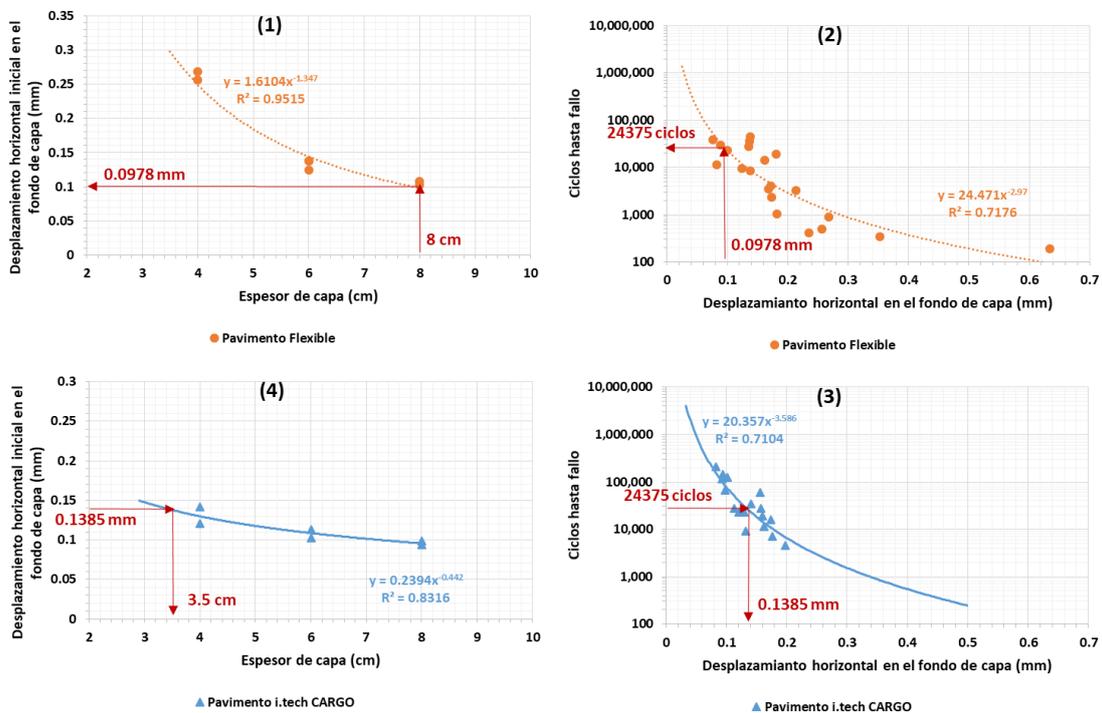


Figura 44. Ejemplo de equivalencia estructural de una capa de 8 cm de pavimento bituminoso con respecto al bituminoso percolado con i.tech CARGO para una tensión de tráfico de 0,5 MPa y 20 °C de temperatura.

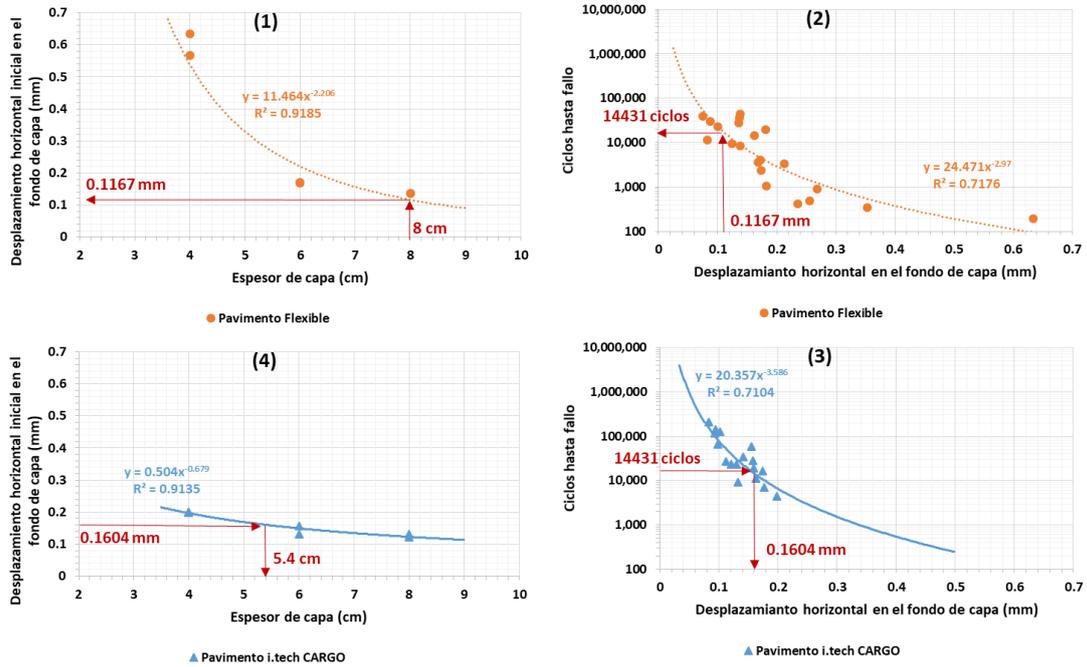


Figura 45. Ejemplo de equivalencia estructural de una capa de 8 cm de pavimento bituminoso con respecto al bituminoso percolado con i.tech CARGO para una tensión de tráfico de 0,7 MPa y 20 °C de temperatura.

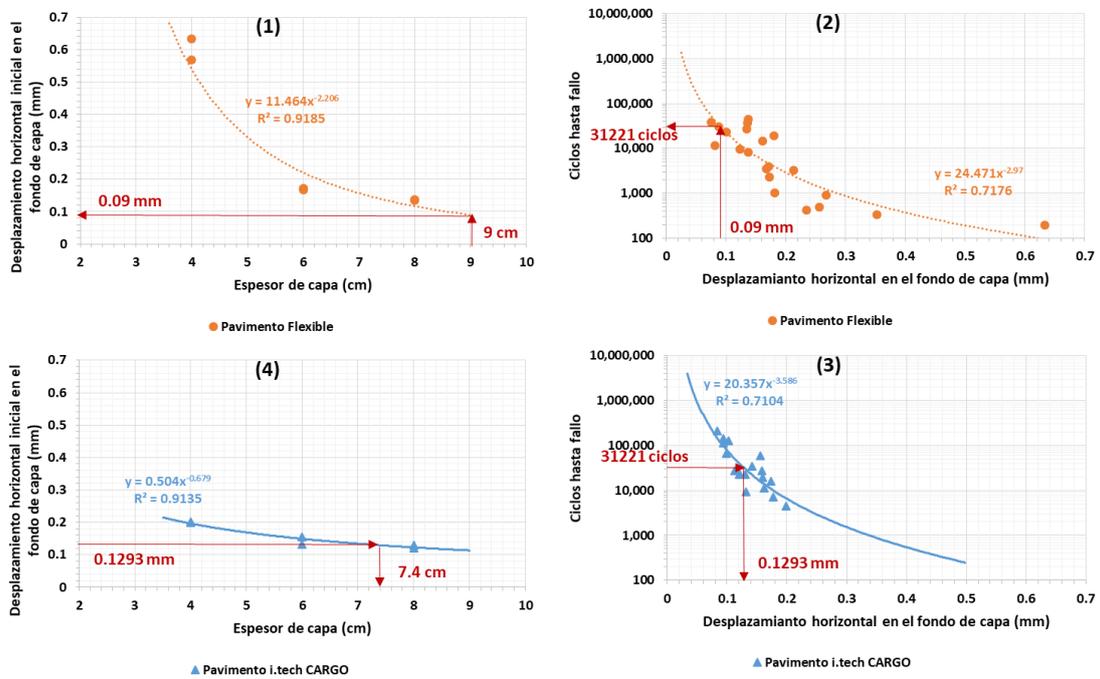


Figura 46. Ejemplo de equivalencia estructural de una capa de 9 cm de pavimento bituminoso con respecto al bituminoso percolado con i.tech CARGO para una tensión de tráfico de 0,7 MPa y 20 °C de temperatura.

La Figura 47 resume el estudio de equivalencia estructural obtenido en el estudio para un rango de espesores de capa entre 5 y 10 cm, y para distintas intensidades de carga de tráfico (0,8 MPa es la utilizada en España en estudio de dimensionamiento de firmes de carreteras). En ellas se muestra cómo el percolado con i.tech CARGO va perdiendo eficiencia conforme se incrementa el espesor de capa de pavimento flexible y la intensidad de carga de tráfico soportada. Así, se observa que el empleo de i.tech CARGO podría ser más competitivo cuando los espesores de capa de pavimento bituminoso tradicional son más reducidos y cuando las intensidades de carga tráfico son más bajas.

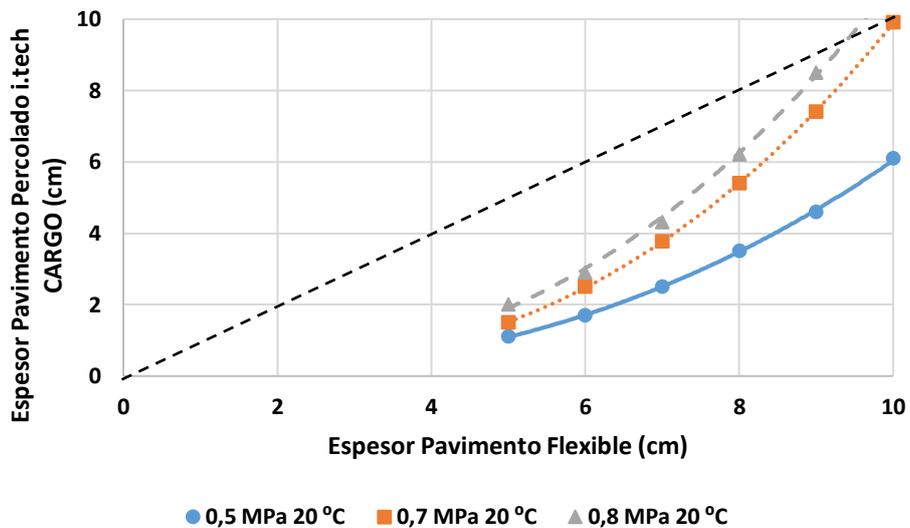


Figura 47. Equivalencia estructural obtenida en el estudio para un rango de espesores de capa entre 5 y 10 cm, y en base a distintas intensidades de carga de tráfico (0,5, 0,7 y 0,8 MPa).

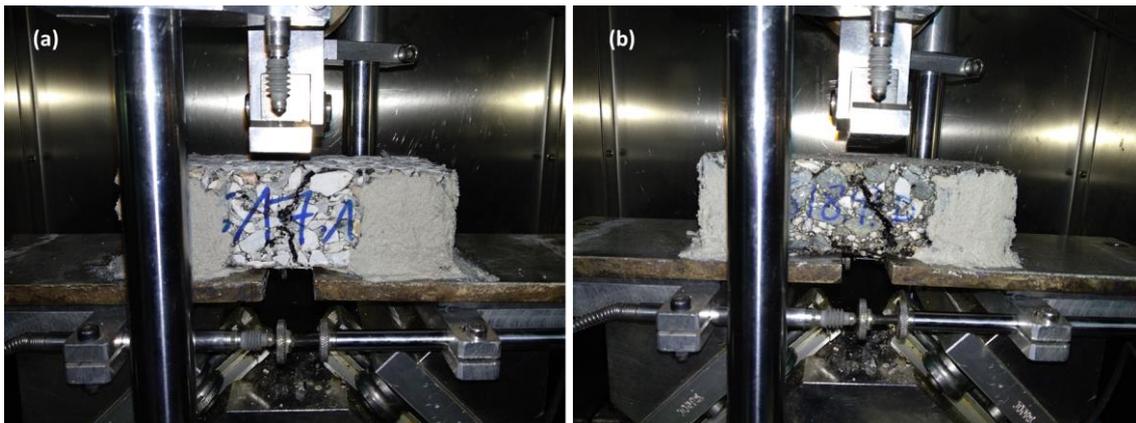


Figura 48. Detalle del fallo por fatiga en ensayo UGR-FACT de una capa de 6 cm de espesor: (a) pavimento bituminoso percolado con i.tech CARGO; (b) pavimento bituminoso convencional.

5. CONCLUSIONES

Este proyecto de investigación tiene como objetivo principal determinar el comportamiento mecánico de pavimentos percolados fabricados a través del empleo de la tecnología i.tech CARGO desarrollada por HeidelbergCement Hispania. Así, se ha realizado un estudio comparativo entre un pavimento flexible convencional (compuesto por una mezcla bituminosa de tipo AC 16 B50/70 S) y el pavimento percolado (PA 16 B50/70 rellena con una lechada i.tech CARGO). Ambos materiales han sido diseñados y fabricados por HeidelbergCement Hispania, y posteriormente remitidos al Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC.UGR) para su estudio. En base a los resultados obtenidos en los ensayos realizados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En relación a las características superficiales del pavimento, el uso del percolado con i.tech CARGO incrementa ligeramente el deslizamiento y reduce la macrotextura del firme, aunque manteniéndose ésta en unos límites por encima de los exigidos por el PG-3 para capas de rodadura. Esta desventaja podría tratar de corregirse utilizando técnicas que permitan incrementar la rugosidad superficial de la capa ejecutada como el barrido industrial o el hidrofresado.
- El empleo del percolado con i.tech CARGO proporciona un mayor grado de impermeabilización de la mezcla haciéndola más resistente a la acción del agua y posibles ataques por otros vertidos (combustibles, aceites, líquidos refrigerantes, etc.). En relación a esto último, es capaz de preservar la integridad del firme y mantener una resistencia a la deformación adecuada tras la acción del combustible.
- La resistencia a las deformaciones permanentes a altas temperaturas se ve considerablemente incrementada con la percolación del pavimento con i.tech CARGO, mostrando además una menor susceptibilidad a la acción del agua que la del pavimento flexible convencional.
- La temperatura de fractura por retracción térmica es inferior en el pavimento percolado con i.tech CARGO que en el de mezcla bituminosa convencional (a pesar de que el pavimento percolado presenta una mayor susceptibilidad al incremento de las tensiones por la caída de temperaturas).
- El pavimento percolado con i.tech CARGO muestra una mayor resistencia a las cargas de almacenamiento y una mayor capacidad de adaptación a los incrementos de éstas. No obstante, muestran un comportamiento más frágil que el pavimento flexible frente a los impactos producidos por cargas dinámicas pesadas.
- El material fabricado con i.tech CARGO demuestra también una mayor resistencia a las deformaciones permanentes cuando los niveles de severidad de las cargas aumentan (tráfico lento pesado y canalizado).
- Para un mismo nivel de deformación en el fondo de capa, el pavimento percolado con i.tech CARGO tiene una vida de fatiga de 2 a 3 veces superior que el pavimento bituminoso convencional estudiado. Asimismo, se ha demostrado que para una intensidad de carga de tráfico dada, la deformación sufrida en el fondo de capa del

pavimento percolado es inferior a la del pavimento bituminoso (especialmente para espesores reducidos de capa), y además, es menos susceptible al incremento de la intensidad de las cargas del tráfico.

- Los resultados obtenidos en el análisis estructural de ambos pavimentos demuestran que el empleo de i.tech CARGO permite obtener respuestas equivalentes con reducciones de espesor de entre el 70% y el 5% (en función del espesor de capa e intensidad de carga del tráfico), con respecto al de un pavimento flexible tradicional. No obstante, el estudio muestra que conforme se incrementa la intensidad de carga del tráfico y el espesor de capa, el efecto positivo causado por i.tech CARGO sobre la respuesta del pavimento se ve reducido. Este hecho sugiere que el empleo de i.tech CARGO podría ser más competitivo cuando los espesores de capa de pavimento bituminoso tradicional son más reducidos y cuando las intensidades de carga tráfico son más bajas.

Los resultados recogidos en el presente informe muestran un análisis comparativo entre un pavimento bituminoso percolado con i.tech CARGO y un pavimento bituminoso convencional de referencia. No obstante, sería de gran interés ampliar el estudio realizado incluyendo otros tipos de materiales bituminosos de referencia (esqueletos minerales diferentes a AC16, betunes modificados, etc.), que permitan corroborar los resultados obtenidos y ponerlos en un contexto más amplio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO TP 63: Standard method of test for determining rutting susceptibility of hot mix asphalt (HMA) using the asphalt pavement analyzer (APA). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2009.

Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento. (2015). Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento.

EN 12697-22: Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2008.

EN 12697-46: Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 46: Fisuración y propiedades a baja temperatura mediante ensayos de tracción uniaxial. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2008.

EN 13036-1: Características superficiales de carreteras y superficies aeroportuarias. Métodos de ensayo. Parte 1: Medición de la profundidad de la macrotextura superficial del

pavimento mediante el método del círculo de arena. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2002.

EN 13036-4: Características superficiales de carreteras y superficies aeroportuarias. Métodos de ensayo. Parte 4: Método para la medición de la resistencia al deslizamiento/derrape. Ensayo del péndulo. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2011.

NLT-327: Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS. Centro de Estudios de Carreteras, Madrid, 2000.

CONFIDENCIAL