

Análisis de dotaciones de riego de liga por fatiga al corte de interfases de fresado entre capas asfálticas

Julian Rivera¹, Anael Porro¹.

¹LEMaC Centro de Investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional - Fac. Reg. La Plata, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (UTN-CIC), La Plata, Argentina.

jrivera@frlp.utn.edu.ar

Resumen

Desde el LEMaC se ha desarrollado un modelo de análisis, acompañado de su procedimiento de aplicación, que permite establecer mediante el empleo de un ensayo análogo al de Parche de Arena, un coeficiente de corrección para la dotación de un riego de liga asfáltico a ser aplicado sobre una superficie fresada, en las operaciones de rehabilitación de pavimentos asfálticos con capas de refuerzo asfálticas. Dicho modelo se basa en resultados obtenidos por ensayos de corte sobre probetas moldeadas a tales efectos, donde la sollicitación se aplica de manera estática, dado los requisitos en tal sentido existentes en las reparticiones viales que tienen jurisdicción sobre este tipo de obra. Pero en una obra, la falla en tal sentido se genera mayoritariamente no por una carga máxima solicitante, sino por fatiga ante ciclos repetidos de carga de menor intensidad, lo cual puede reproducirse en laboratorio mediante ensayos con sollicitaciones del tipo dinámica. El presente trabajo aborda la temática planteada, analizando particularidades para la aplicación del modelo desarrollado, en base a la correspondencia existente entre ambas sistemáticas de ensayo.

An analysis model, with its application procedure, was developed by the LEMaC, to allows the establish, by means of the use of a test analogous to the Sand Patch Test, a correction coefficient for the dosage of an asphaltic tack coat to be applied on a milled surface, in the rehabilitation operations of asphalt pavements with asphalt reinforcement layers. This model is based on results obtained by shear tests on specimens molded for such purposes, where the sollicitation is applied in a static way, given the requirements existing in the road departments that have jurisdiction over this type of work. But in a road, the failure in that sense is generated mostly not by a maximum requesting load, instead by fatigue damage before repeated cycles of load of less intensity, which can be reproduced in the laboratory by means of tests with dynamics loads. The present work it's about this thematic, analyzing particularities for the application of the model developed, based on the existing correspondence between both test systems.

Palabras claves

Fresado de pavimentos, rehabilitación de pavimentos, riego de liga, ingeniería vial.

Keywords

Milling of pavements, rehabilitation of pavements, tack coat, road engineering.

Recibido: 12 de Noviembre de 2018

Aceptado: 15 de Febrero de 2019

Publicado: 21 de Febrero de 2019



Esta obra está bajo licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_AR

Introducción

Entre los casos de rehabilitación de pavimentos asfálticos, existen aquellos en donde la evaluación superficial y estructural establecen la necesidad de eliminar parte de la capa de rodamiento, lo cual en la ingeniería vial se realiza mediante el empleo de técnicas de fresado (NCHRP, 2004). Esto puede deberse en muchos casos a su excesiva deformación transversal, que genera el fenómeno conocido como de roderas o ahuellamiento y al envejecimiento del mismo por la acción climática y la sollicitación del tránsito, con la potencial pérdida de agregados superficiales, entre otras condiciones de deterioro que pueden llevar a tal decisión (Miller y Belinger, 2003). Por esta vía, además, se elimina el fenómeno de recrecido, con las correspondientes disminuciones en gálibos (Martínez-Echevarría, 2012).

Las herramientas de desbaste pueden revestir diferentes características, dando lugar, según la textura resultante en la pista, a diversas tipologías de fresado (Bonfim, 2008). Cualquiera sea esa tipología, la superficie resultante presenta una textura muy diferente a la que podría hallarse en una superficie de rodamiento original que va a ser reforzada con una capa asfáltica, ya que la misma, en términos relativos, resulta "lisa" (Wirtgen 2015).

En estos refuerzos, además, corresponde disponer un riego de liga, consistente en la aplicación de una emulsión asfáltica sobre la superficie fresada, con el objetivo de conseguir su unión con la capa de revestimiento asfáltica que se vaya a ejecutar con posterioridad para establecer una adecuada interfase (Bussard, 2014). Esta técnica de rehabilitación con capas adheridas se aplica en los casos en donde se desea eliminar deterioros superficiales y el pavimento existente presenta una buena condición estructural (Espinoza, 2015).

Si la adherencia en la interfase es inadecuada, las tensiones y deformaciones generadas por efecto del tránsito se incrementan y, consecuentemente, se reduce la vida útil del pavimento (Montetrusque et al., 2015).

Dado que los estudios encarados hasta el momento en cuanto a las dotaciones, características y atribuciones estructurales de los riegos de liga involucrados bajo este concepto, han abordado mayoritariamente los casos en donde son aplicados sobre la superficie original, se desarrolla desde el LEMaC un estudio para profundizar en el análisis de la aplicación de dichos riegos sobre las superficies asfálticas fresadas, dadas las condiciones particulares que éstas presentan, de acuerdo a lo que se ha expuesto.

Mediante dicho estudio, se arriba a un modelo que permite corregir la dotación del riego de liga a ser aplicada en un tramo de obra en particular, a partir de

la determinación de su textura mediante la medición sobre dicho tramo con una adaptación del Ensayo de Parche de Arena. Los pormenores de este estudio se presentan en el Simposio Nacional de Firmes SNF-2018, realizado en Madrid (España), en cuyas memorias pueden ser consultados (Rivera et al., 2018).

El modelo, que cuenta con su correspondiente procedimiento de empleo, tiene la particularidad de estar desarrollado a partir de ensayos al corte efectuados sobre probetas dobles moldeadas a tales efectos; donde la aplicación de la carga se realiza en forma estática, dado que se busca con el mismo abordar la temática de manera similar a la establecida por los requisitos, directivas y pliegos de especificaciones técnicas existentes en tal sentido.

Pero como la sollicitación del tránsito en un pavimento rehabilitado es del tipo dinámico, llevando generalmente a la falla del sistema por fatiga ante cargas reiteradas, y no ante una única carga máxima, se requiere analizar la validez del modelo desarrollado en tal sentido.

Para esto se instrumenta el análisis de un caso particular empleando sistemas de ensayo que apliquen estas cargas dinámicas, con dotaciones de riego de liga aplicadas a partir del modelo desarrollado, observando los resultados obtenidos y arribando a las correspondientes conclusiones.

Desarrollo

Aspectos relacionados con el estudio previo basado en ensayos estáticos

Como datos necesarios para la comprensión del presente artículo técnico, se citan aquellos contenidos necesarios respecto del estudio original que da lugar al modelo desarrollado. En tal sentido cabe señalar que para el estudio, se relevaron diversas fuentes de información en cuanto al rango de dimensiones que puede presentar una superficie de un pavimento asfáltico a ser rehabilitada. Este relevamiento permitió establecer 6 casos de análisis que cubren dicho rango, los cuales se observan en la Tabla 1.

Caso	Distancia entre surcos (mm)	Profundidad fresado (mm)
1	8,0	1,0
2	11,4	2,4
3	14,8	3,8
4	18,2	5,2
5	21,6	6,6
6	25,0	8,0

Tabla 1. Casos patrones de fresado analizados
Fuente: elaboración propia

Con estos casos se efectúa la simulación del fresado en laboratorio mediante el empleo de una técnica de aserrado con hoja diamantada sobre probetas de 30 cm x 30 cm, confeccionadas con los materiales empleados en la experiencia (base y revestimiento de mezcla CAC-D19 con agregado granítico y riego de liga de emulsión catiónica de rotura rápida). Sobre estas probetas se efectúan mediciones de Diámetros de Parche de Arena (D_i) con volúmenes de arena de 40 cm³, de acuerdo a lo establecido como óptimo por el estudio, dando por resultados los Diámetros de Parche de Arena (DPA) que se observan en la Tabla 2.

Caso	D_1 (cm)	D_2 (cm)	DPA (cm)
1	23,8	24,5	24,2
2	20,0	19,6	19,8
3	16,0	16,1	16,1
4	12,8	13,1	13,0
5	11,5	11,7	11,6
6	10,2	10,1	10,2

Tabla 2. Registro de Diámetros de Parche de Arena
Fuente: elaboración propia

Dado que al fresar se genera, por un lado, el incremento de la superficie en la interfase, en comparación con la interfase "lisa", según se observa en la Figura 1, es dable pensar que en estos casos se requiere de un incremento de la dotación del riego de liga.

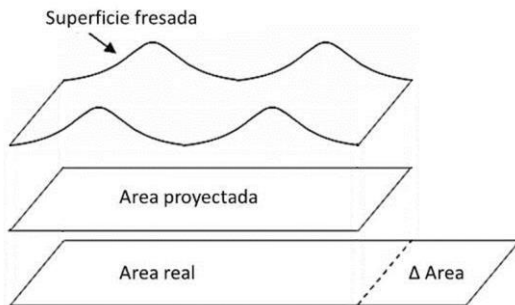


Figura 1. Incremento de Área por fresado
Fuente: elaboración propia

Pero por otro lado, la forma resultante del fresado lleva a pensar que una dotación de riego excesiva puede producir la deposición del riego en el valle de los surcos del fresado, como se observa en la Figura 2, requiriendo una disminución de la dotación en tal sentido.



Figura 2. Deposición excesiva de un riego en los valles del fresado

Fuente: elaboración propia

Se debe alcanzar por lo tanto una solución de compromiso entre ambas situaciones. Para ello se analiza cómo estas situaciones influyen desde el punto de vista mecánico y en cuanto a cuál sería en tal sentido la situación óptima. Para el estudio, este análisis se efectúa a partir del contenido óptimo de riego de liga establecido para la interfase lisa de 0,25 l/m², determinado para los materiales empleados en esta experiencia, ensayando cuatro situaciones; a saber:

- Situación 1: Dotación de riego de liga óptima incrementada en la misma proporción del incremento del área de contacto en la interfase por el fresado.
- Situación 2: Dotación de riego de liga óptima incrementada en 2/3 de la proporción del incremento del área de contacto en la interfase por el fresado.
- Situación 3: Dotación de riego de liga óptima incrementada en 1/3 de la proporción del incremento del área de contacto en la interfase por el fresado.
- Situación 4: Dotación de riego de liga óptima sin considerar el incremento del área de contacto en la interfase por el fresado.

Para cada uno de los 6 casos se moldean entonces 3 probetas dobles en las cuales se materializa también en laboratorio la interfase fresada de manera simulada. Dichas probetas fueron ensayadas luego a 20 °C, temperatura de referencia adoptada, mediante un dispositivo que permite establecer la sollicitación que se esquematiza en la Figura 3.

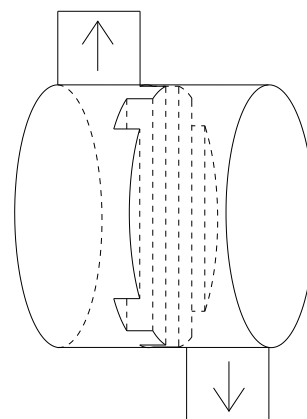


Figura 3. Orientación del fresado en el ensayo
Fuente: elaboración propia

Para calcular las dotaciones a ser empleadas en cada situación, se emplean los modelos que surgen del estudio. Estos modelos consideran una Dotación de Riego Incrementada (DRI), partiendo de un

Coefficiente de Incremento (*CI*) y una Dotación de Riego (*DR*), mediante la aplicación de la Ecuación 1.

$$DRI = CI \cdot DR \quad (1)$$

Estos *CI* surgen entonces como proporción del Coeficiente de Incremento de Area (*CIA*) en la interfase, calculado según la expresión de la Ecuación 2 a la que se arribara en el estudio.

$$CIA = 5,03 DPA^{-0,41} \quad (2)$$

A partir de los *CI*, la superficie de las probetas dobles a ser moldeadas, la dotación óptima para superficies lisas y las características de la emulsión empleada, se realizan los cálculos para arribar al peso de emulsión a aplicarse en cada probeta. Una vez moldeadas estas se procede a su ensayo, obteniéndose juegos de curvas de ensayo como el que se observan a manera de ejemplo en la Figura 4. En dicha figura se observa el texto en portugués, pues así es el modo en que lo expresa el equipo de ensayo.

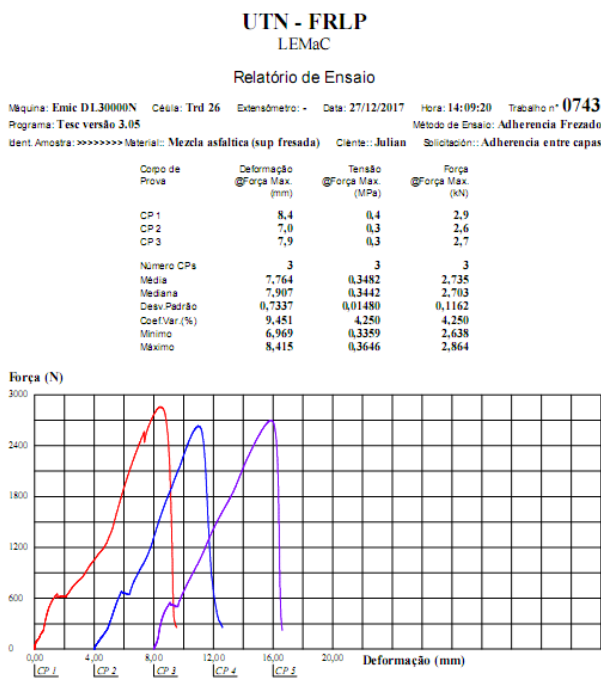


Figura 4. Resultados ensayo de corte estático Caso 6 de la Situación 3

Fuente: elaboración propia

Dado que se obtiene para todos los Casos que la Situación 3 implica los *CI* óptimos, se puede proceder ahora a establecer los Coeficientes de Incremento de Riego (*CIR*) aplicables, los cuales correlacionados con los *DPA* correspondientes sirven de partida para aplicar la regresión que permite obtener finalmente el modelo de aplicación de la Ecuación 3.

$$CIR = 2,014 DPA^{-0,184} \quad (3)$$

Análisis de respuesta al corte a fatiga

Para el análisis, motivo principal de la presente publicación, se decide tomar una situación de muestra, el Caso 4, analizando su respuesta a fatiga en las cuatro Situaciones que fueran descritas para el estudio basado en solicitaciones estáticas (Situación 1 a Situación 4); y de ese modo observar si el contenido óptimo establecido por ambas vías se condice.

Para conducir los análisis a fatiga, se toma de la recopilación bibliográfica aquella sistemática de ensayo que se presume refleja de mejor manera las condiciones de campo, y resulta de aplicación probable a los propósitos de esta tesis. El ensayo en cuestión es el propuesto por Romanoschi (1999), denominado *Shear Fatigue Test of the Asphalt-to-Asphalt Interfaces* (ensayo de fatiga al corte de interfaces entre capas asfálticas), cuyo esquema puede observarse en la Figura 5. Se ve como, dada la inclinación adoptada, la carga cíclica vertical *P* se descompone en una carga normal *N* y en una carga de corte tangencial a la interfase en análisis *T*. Como en este caso la inclinación es cercana a los 25°, se obtiene una relación 2:1 entre la fuerza *N* y la fuerza *T*.

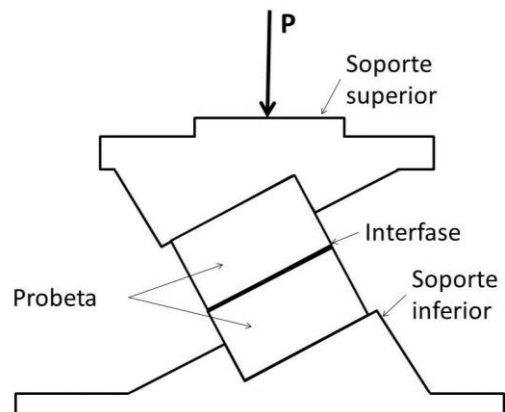


Figura 5. Esquema del *Shear Fatigue Test*
Fuente: elaboración propia

Para efectuar este ensayo en las instalaciones del LEMaC, se cuenta con el equipo destinado al ensayo de Módulo Dinámico de acuerdo a la Norma UNE-EN 12697-26, el cual puede ser empleado mediante algunas modificaciones menores a tales efectos. Dicho equipo se configura para otorgar una dada cantidad de ciclos de carga por segundo, de acuerdo a la gráfica de sollicitación que se observa en la Figura 6.

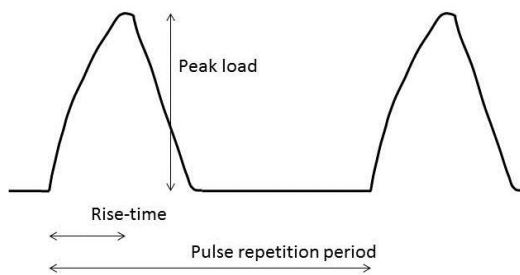


Figura 6. Ciclo de carga para el ensayo a fatiga
Fuente: elaboración propia

Las probetas dobles cúbicas a ser ensayadas tienen 10 cm por lado, que se considera una dimensión mínima representativa de las magnitudes de fresado. Para establecer la magnitud del pico de carga (*peak load*) se podría pensar en principio establecer aquella carga que permita alcanzar la tensión al corte mínima requerida por el Pliego de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV), conocido como DNV-2017, habida cuenta de obtener un valor comparativo que cuenta ya con un grado de especificación y aceptación en el medio. Esta tensión guardaría también relación con el rango de la distribución de esfuerzos de corte en interfaces de variadas estructuras de pavimentos propuestas y analizadas mediante la técnica de los elementos finitos por Giovanon y Buono (2008), las que oscilan entre 0,3 y 0,8 MPa. Pero dado que la máxima carga cíclica que puede otorgar el equipo con que cuenta el LEMaC es de 500 kg, se decide para obtener al menos una tensión de corte en la interfase de la mitad de la establecida como la mínima requerida por DNV (es decir 0,35 MPa, en el caso de un material ideal indeformable que transmitiría a la interfase de forma uniforme toda la carga aplicada), establecer una inclinación de ensayo de la probeta de 45° (obteniéndose una situación más desfavorable que en el ensayo de *Shear Fatigue Test of the Asphalt-to-Asphalt Interfaces* por establecerse una relación de 1:1 entre N y T) y aplicar esa carga máxima. El período de repetición de la carga (*pulse repetition period*) se establece en una determinada cantidad de segundos, imponiendo el período de carga (*rise-time*) de 124±4 mseg según lo recomendado en la norma.

El esquema del sistema de ensayo adaptado en el LEMaC a los efectos del desarrollo de este trabajo puede observarse en la Figura 7, con los surcos del fresado dispuesto en dirección al plano de deslizamiento a generarse durante el ensayo.

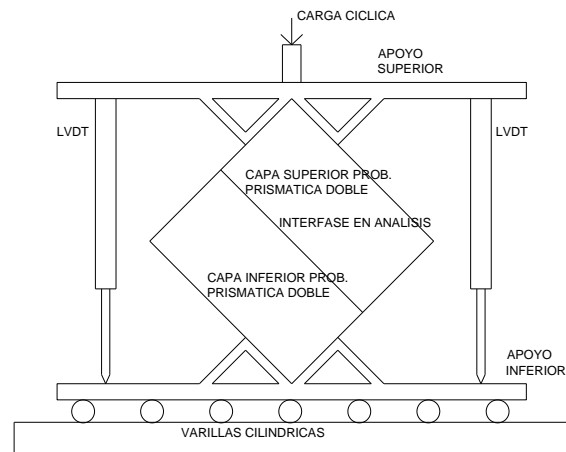


Figura 7. Esquema de ensayo de fatiga de la interfase del LEMaC

Fuente: elaboración propia

Para la confección de las probetas cúbicas dobles a ser ensayadas se implementa el siguiente procedimiento:

- Moldeo con la mezcla asfáltica patrón utilizada, que presenta una Densidad Marshall de Referencia, y empleando una compactación mediante el equipo *Roller Compact*, de dos probetas prismáticas de 30 cm x 30 cm x 5 cm.
- Simulación del fresado del Caso 4 mediante aserrado de la superficie de ambas probetas.
- Aplicación de las dotaciones de riego de las Situaciones 1 a 4 sobre las probetas, cubriendo media probeta con cada dotación.
- Moldeo de la capa superior sobre ambas probetas en un espesor de 5 cm, con la mezcla patrón y nuevamente mediante compactación con el equipo de *Roller Compact*.
- Aserrado de 3 probetas cúbicas para cada Situación de 10 cm de lado.
- Numeración de las probetas mediante la fórmula S_{X-Y} , donde la X corresponde a la Situación y la Y al Número de Probeta para esa Situación.

En la Figura 8 se observa una imagen de las dos probetas de base, luego de haber sido moldeadas mediante el compactador *Roller Compact*, habiendo sido señalado el sentido de compactación, para que sea coincidente luego con el sentido de la simulación de fresado.



Figura 8. Bases para las probetas moldeadas con *Roller Compact*

Fuente: elaboración propia

En la Figura 9 se observan las probetas de base una vez que se les ha realizado la simulación del fresado mediante aserrado. Se puede ver en la imagen como se ha delimitado los sectores de 15 cm x 30 cm destinados a la aplicación del riego para cada una de las Situaciones, es decir la mitad de cada una de las probetas de base moldeadas.



Figura 9. Bases para las probetas con fresado simulado para Caso 4

Fuente: elaboración propia

En la Figura 10 se muestran las probetas dobles resultantes, luego de ser efectuada la capa de revestimiento.

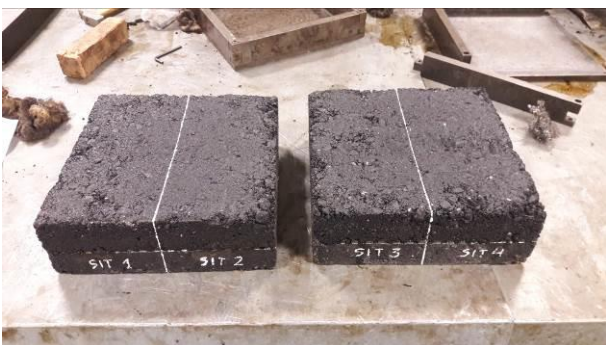


Figura 10. Probetas dobles prismáticas moldeadas

Fuente: elaboración propia

A partir de las probetas dobles prismáticas, y mediante aserrado con hoja diamantada, se arriban a las 12 probetas cúbicas a ser ensayadas a la fatiga que se muestran en la Figura 11.



Figura 11. Probetas cúbicas generadas por aserrado para análisis a fatiga, Caso 4

Fuente: elaboración propia

Con un escáner Epson Stylus CX9400, se obtiene una imagen en alta resolución de la cara transversal a la dirección de fresado de la probeta, que se observa en la Figura 12 para el caso de la Situación 1, que es la que presenta mayor dotación del riego. Puede verse en la imagen que la interfase se torna imperceptible a simple vista, lo cual puede tomarse como un indicio de la validez del procedimiento de moldeo adoptado. Cabe acotar que la imagen se ha insertado en este documento en escala real.

Se efectúa el análisis de dicha superficie de corte con lupa. En la Figura 13 se observa en la imagen de la izquierda la fotografía tomada con la lupa, y en la de la derecha como sobre esa fotografía se ha marcado la interfase en rojo. Por comparación entre ambas imágenes se puede ratificar que la interfase resulta casi imperceptible (para una idea de la escala considerar que la altura de fresado se encuentra en aproximadamente 5 mm).

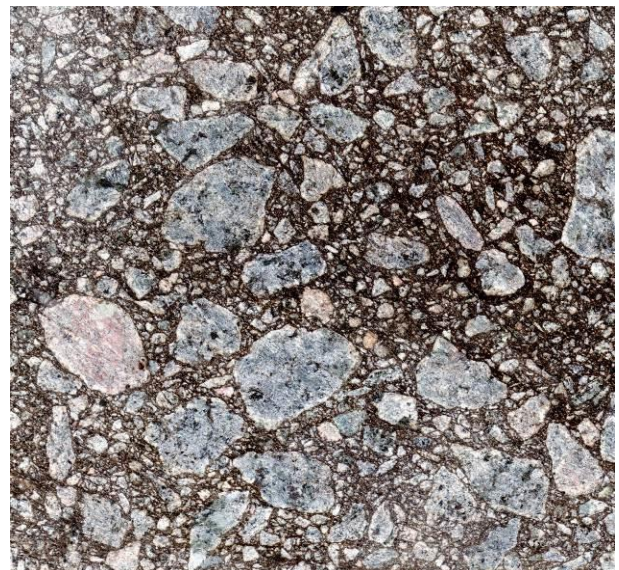


Figura 12. Escaneo en alta resolución de un corte en sentido transversal al fresado

Fuente: elaboración propia

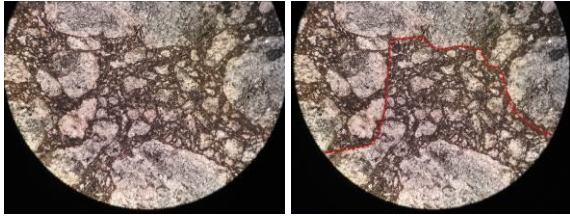


Figura 13. Imágenes con lupa de un corte en sentido transversal al fresado
Fuente: elaboración propia

Resultados

Primera serie de ensayos a fatiga

Se decide ensayar como primera serie a las probetas S₁₋₁, S₂₋₁, S₃₋₁ y S₄₋₁, a la temperatura ya empleada en los ensayos estáticos de 20 °C, con un periodo de aplicación de la carga de 1 ciclo por segundo y con 100.000 repeticiones.

Las probetas son ensayadas de acuerdo al procedimiento descrito. En la Figura 14 se observan imágenes tomadas durante el ensayo de una de las probetas. En la imagen de la izquierda se ve una probeta dentro de la cámara de acondicionamiento y en la de la derecha el equipo completo (que incluye el regulador neumático de carga, la adquisidora de datos y la computadora con el programa de regulación del ensayo).

Las probetas ensayadas dejan observar que la evolución en la deformación vertical registrada tiene su correlato en el desplazamiento de ambas capas en la interfase. Lo señalado se observa en las imágenes de la Figura 14, donde se ve a la izquierda la probeta ensayada no deformada, y en las imágenes de la derecha el desplazamiento entre las capas en la interfase (ambas imágenes de la derecha son idénticas, sólo que en la superior se ha marcado con rojo la interfase para que sea más fácilmente observable).



Figura 14. Imágenes durante el ensayo a fatiga de una de las probetas cúbicas
Fuente: elaboración propia

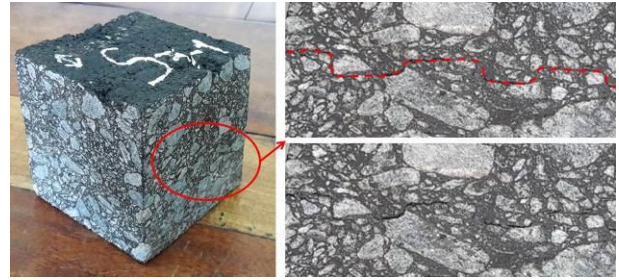


Figura 14. Detalle de probeta ensayada a fatiga y su interfase
Fuente: elaboración propia

Las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase (calculado a partir de la deformación vertical registrada) versus los ciclos de carga, para la primera serie de probetas se observa en la Figura 15.

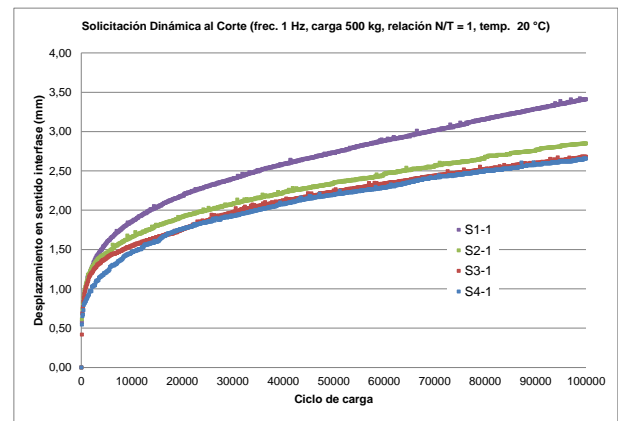


Figura 15. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la primera serie
Fuente: elaboración propia

Si bien las curvas volcadas en la Figura 15 permiten observar cierta tendencia en los resultados, para una más clara interpretación de estos, se decide definir una Pendiente de la Curva de Desplazamiento (*PCD*) que se calcula de acuerdo a la Ecuación 4.

$$PCD = (D_{100} - D_{50}) / 50 \quad (4)$$

Donde:

PCD = Pendiente de la curva de desplazamiento (mm/10³ ciclos)

*D*₁₀₀ = Desplazamiento a los 100.000 ciclos de carga (mm)

*D*₅₀ = Desplazamiento a los 50.000 ciclos de carga (mm)

A partir de la definición de este parámetro, se puede confeccionar la Tabla 3 en donde se vuelcan los resultados obtenidos para la primera serie de ensayos.

Probeta	D_{50} (mm)	D_{100} (mm)	PCD (mm/10 ³ ciclos)
S_{1-1}	2,73	3,41	0,0136
S_{2-1}	2,35	2,85	0,0100
S_{3-1}	2,23	2,68	0,0089
S_{4-1}	2,20	2,66	0,0091

Tabla 3. Resultados para la primera serie de probetas
Fuente: elaboración propia

Los resultados muestran que, si bien la D_{100} en la probeta S_{3-1} resulta levemente superior a la de la probeta S_{4-1} , las PCD obtenidas marcan una tendencia hacia el mínimo para la probeta S_{3-1} . Esto se condice con los resultados obtenidos ante las solicitaciones estáticas, pues demostraría que la Situación 3 sería también, ante las condicionantes establecidas para esta primera serie de probetas, la que mejor respuesta daría ante las solicitaciones dinámicas.

Segunda serie de ensayos a fatiga

La primera serie de ensayos demuestra una tendencia en los resultados coincidentes con los obtenidos ante solicitaciones estáticas. Se observa que la temperatura de ensayo y la frecuencia de carga seleccionadas requerirían de una cantidad de repeticiones en las solicitaciones para llevar a las probetas a situaciones cercanas a la rotura marcadamente por encima de las analizadas. En tal sentido, cabe señalar que para la frecuencia establecida, los 100.000 ciclos de carga insumen más de 30 horas de ensayo, incluyendo el acondicionamiento de la probeta.

Se decide ensayar la segunda serie de probetas a una temperatura de ensayo de 40 °C, habitual en otros estudios sobre sistemas que involucran mezclas asfálticas, como es el caso de la determinación de su Módulo Dinámico, para observar el comportamiento esperable a altas temperaturas. El resto de los parámetros, como la frecuencia de cargas y su amplitud, se decide dejarlos constantes.

Al ensayar las probetas se obtienen diferentes comportamientos. En la Figura 15 se observa la probeta S_{1-2} ya ensayada, vista de perfil a la izquierda y con un detalle de la interfase a la derecha; en ambas imágenes se ve como la falla se ha producido claramente por el desplazamiento relativo de las capas en la interfase. Por su parte en la Figura 16 se observa la probeta S_{4-2} ya ensayada, con una vista de perfil a la izquierda y ese mismo perfil pero con el camino de la fisura remarcado a la derecha; lo que deja ver que la falla se produce parte por el desplazamiento relativo en la interfase y parte por la rotura de la mezcla asfáltica. Se deduce en tal sentido,

un mejor comportamiento ante las menores dotaciones de riego de liga analizadas.

Las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase (calculado a partir de la deformación vertical registrada) versus los ciclos de carga, para la segunda serie de probetas se observa en la Figura 17.



Figura 15. Imágenes de la probeta S_{1-2} ya ensayada
Fuente: elaboración propia



Figura 16. Imágenes de la probeta S_{4-2} ya ensayada
Fuente: elaboración propia

Se puede ver en la Figura 17 la notoria diferencia de resultados respecto de los obtenidos para los 20 °C. Para permitir la mejor observación de las diferencias relativas se decide analizar la cantidad de ciclos que se requieren para que en cada probeta se genere un desplazamiento de 5 mm (TD_{5mm}) y de 10 mm (TD_{10mm}). La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos en tal sentido.

Puede observarse como la cantidad de ciclos para los TD_{5mm} en todos los casos resulta similar, marcándose una diferencia en la cantidad de ciclos para los TD_{10mm} . En esta serie la situación óptima se da claramente en la probeta S_{4-2} , por lo que puede interpretarse que a temperaturas elevadas de operación, al menos para los materiales analizados, el mejor comportamiento de la interfase se da con menores dotaciones de riego de liga que a temperaturas de operación intermedias.

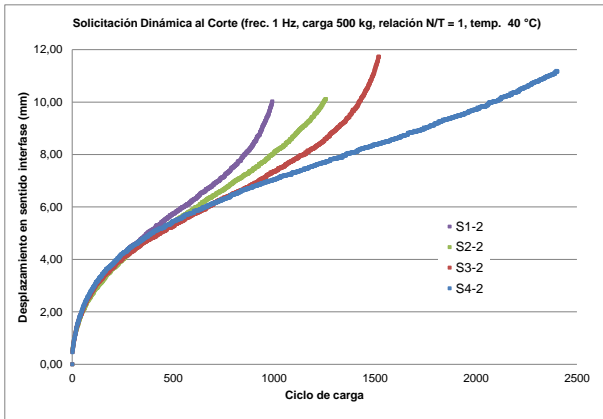


Figura 17. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la segunda serie
Fuente: elaboración propia

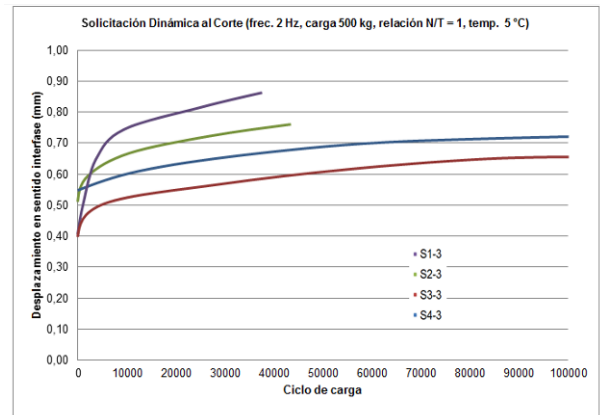


Figura 18. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la tercera serie
Fuente: elaboración propia

Probeta	Para TD_{5mm} (ciclos)	Para TD_{10mm} (ciclos)
S_{1-2}	374	990
S_{2-2}	414	1246
S_{3-2}	436	1422
S_{4-2}	393	2081

Tabla 4. Resultados para la segunda serie de probetas
Fuente: elaboración propia

Probeta	D_{35} (mm)	D_{50} (mm)	D_{100} (mm)
S_{1-3}	0,86		
S_{2-3}	0,74		
S_{3-3}	0,57	0,60	0,65
S_{4-3}	0,66	0,69	0,72

Tabla 5. Resultados para la tercera serie de probetas
Fuente: elaboración propia

Tercera serie de ensayos a fatiga

Se decide ensayar la tercera serie de probetas a una temperatura de ensayo de 5 °C, habitual en otros estudios sobre sistemas que involucran mezclas asfálticas, como es el caso de la determinación de su Módulo Dinámico, para observar el comportamiento esperable a bajas temperaturas. También se modifica la frecuencia de cargas, estableciéndola en 2 ciclos por segundo.

Las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase (calculado a partir de la deformación vertical registrada) versus los ciclos de carga, para la tercera serie de probetas se observa en la Figura 18. En esta imagen se ve que las curvas de las probetas S_{1-3} y S_{2-3} no se muestran hasta los 100.000 ciclos debido a inconvenientes registrados en el equipo adquirente de datos durante el ensayo de las mismas; para el ensayo de las probetas S_{3-3} y S_{4-3} esos inconvenientes pudieron ser solucionados.

Para permitir la mejor observación de las diferencias relativas se decide volcar en la Tabla 5 los desplazamientos en la interfase para 35.000 ciclos (D_{35}), 50.000 ciclos (D_{50}) y 100.000 ciclos (D_{100}).

Como puede observarse, a 5 °C los resultados obtenidos permitirían ratificar que la situación óptima es la Situación 3, coincidiendo con lo establecido mediante los ensayos estáticos y los ensayos dinámicos a 20 °C. No obstante esto, se observa que las diferencias relativas entre los resultados para la Situación 3 y la Situación 4 se pueden deber también principalmente a los desplazamientos iniciales registrados en ambas probetas, lo que puede tener como causa un ajuste inicial de los platos de carga, habida cuenta que se trata de sólo de algunas centésimas de milímetro.

Conclusiones

Durante la explotación de un pavimento flexible se desarrollan actividades dirigidas a su rehabilitación, eliminándose en ocasiones parte de la capa de rodamiento por medio de técnicas de fresado, evitándose la influencia del ahuellamiento y otros deterioros superficiales de la capa existente; y eliminándose el fenómeno de recrecido.

Esta tarea requiere el uso de equipos rotatorios de fresado, provistos de herramientas de desbaste que pueden presentar diferentes características, dando lugar a distintos grados de textura, que difieren del de la superficie original, pues esta última en términos relativos puede considerarse "lisa".

Previo a la colocación de la capa de refuerzo, corresponde disponer un riego de liga de una

emulsión asfáltica para generar una adecuada interfase, a fin de que si el pavimento existente presenta una buena condición estructural, las tensiones y deformaciones generadas por efecto del tránsito no afecten la vida útil prevista.

La existencia del fresado puede incidir en la determinación de la dotación óptima del riego de liga a aplicarse, pero existen pocos estudios que hayan encarado la temática, por lo que es necesario encarar un análisis en tal sentido.

Se debe establecer desde el punto de vista mecánico si en el caso de las superficies fresadas resulta necesario incrementar la dotación en forma proporcional al incremento de área generado por la textura resultante después del fresado. Esto se debe a que un incremento excesivo en la dotación del riego de liga no se distribuye en forma homogénea sobre la superficie fresada, debido al grado de fluidez de la emulsión, pues se genera un depósito de mayor espesor en el valle de los surcos, según se puede verificar en laboratorio, sobre una probeta donde la deposición del riego en los valles del fresado resulta superior a la que se obtiene en sus crestas.

Es posible analizar situaciones que representan un incremento de esa dotación en distintas proporciones del incremento del área de contacto en la interfase por el fresado mediante el ensayo al corte desarrollado, considerando que, dado que la flexión principal del pavimento se da en su sentido longitudinal y que el fresado presenta su superficie dentada también en este sentido, los ensayos se deben realizar con las probetas dobles dispuestas de acuerdo a esa orientación.

Los resultados obtenidos permiten establecer que los Coeficientes de Incremento de Riego *CIR* óptimos se obtienen al incrementar la dotación $1/3$ del incremento de superficie en la interfase.

La fórmula que permite establecer el *CIR* en función del Diámetro de Parche de Arena (*DPA*), resultante para un volumen de arena de 40 cm^3 , es $CIR = 2,014 \cdot DPA^{-0,184}$.

De la aplicación preliminar de análisis al corte mediante solicitaciones dinámicas de carga, se puede deducir que existen indicios en tal sentido que permitirían ratificar los resultados obtenidos mediante la aplicación estática de la carga, pero que en regiones donde las temperaturas predominantes disten significativamente de los $20 \text{ }^\circ\text{C}$, sería adecuado conducir esos análisis a otra temperatura de referencia, pues es posible que se obtengan resultados diferentes en cuanto a la dotación óptima del riego de liga.

Referencias bibliográficas

- [1] UNI EN 12697-26 Annex C (2012). Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness. *BSI*.
- [2] Bussard, M. (2014). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt Milling & Micro Milling. *P.R. Systems Inc.*
- [3] Espinoza, M. (2015). Capas de refuerzo con hormigón adheridas como alternativa para la rehabilitación de pavimentos asfálticos. *Revista Infraestructura Vial*, 17(30), 40-49.
- [4] Giovanon, O. & Bueno, F. (2008). Riego de liga su importancia estructural y análisis tensional. *XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto*. Argentina.
- [5] Echeverría, M. J. (2012). Estudio del procedimiento de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa. *Universidad de Granada*.
- [6] Miller, J. S., & Bellinger, W. Y. (2003). Distress Identification Manual for the Long-term Pavement Performance program (Fourth revised edition). *U.S. Department of Transportation. Reposte No. FHWA-RD-03-031*, (Jun).
- [7] Montetrusque, M., Bernucci, L., Leite, F., & Teoro Carmo, C. A. (2015). Avaliação da adherencia de geogrelhas entre camadas asfálticas. En *Memorias XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto* (pp. 919–929). Argentina.
- [8] NCHRP. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. *National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Research Council*, Final Report No. NCHRP 1-37A.
- [9] Rivera, J., Bianchetto, H., & Botasso, G. (2018). Adaptación del ensayo de parche de arena para estimar la corrección de dotación de riegos de liga en

rehabilitaciones sobre firmes asfálticos sometidos a fresado superficial. *Simposio Nacional de Firmes SNF2018*. Madrid.

[10] Romanoschi, S. A. (1999). Characterization of Pavement Layer Interfaces. *Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College*, EEUU.

El mundo de las fresadoras en frío de Wirtgen. (2015). Wirtgen Group Company, Alemania.