

Determinación de dotación óptima de riego de liga mediante el ensayo dinámico de interfases entre capas asfálticas, en sistemas de refuerzo con fresado previo en la capa subyacente

Julián Rivera¹, Anael Porro¹

¹LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP – CIC PBA, Calle 60 y 124, (1900) La Plata, Argentina, lemac@frlp.utn.edu.ar.

Resumen

En los refuerzos de pavimentos asfálticos fresados superficialmente, se debe establecer la dotación óptima del riego de liga aplicado entre las capas. Desde el LEMaC se cuenta con un modelo y un procedimiento, basados en una adaptación del Ensayo de Parche de Arena, aplicables en el caso de pavimentos con mezclas asfálticas en caliente constituidas con áridos graníticos y cementos asfálticos convencionales. Estas herramientas se desarrollaron a partir de ensayos de corte de probetas dobles ante sollicitaciones estáticas (en coincidencia con los requisitos establecidos por algunas reparticiones viales de Argentina); pero durante la explotación de una vía, la falla no se da por una carga máxima solicitante, sino por la fatiga de la interfase ante ciclos repetidos de carga de menor intensidad. Esto puede reproducirse en laboratorio mediante ensayos de última generación con sollicitaciones dinámicas, lo que requiere un análisis en cuanto a si las conclusiones alcanzadas se condicen con las obtenidas de manera estática. El trabajo que se presenta aborda esta situación, analiza las particularidades para la aplicación del modelo desarrollado en base a la correspondencia entre ambas sistemáticas de ensayo y concluye que los resultados obtenibles, al menos con los materiales y condicionantes tenidos en cuenta, son concordantes.

Palabras Clave: fresado de pavimentos, rehabilitación de pavimentos, riego de liga, ingeniería vial.

1 Introducción

Existen casos de rehabilitación de pavimentos flexibles, en los cuales la evaluación superficial y estructural determinan la necesidad de quitar parte de la capa de rodamiento, lo que en la ingeniería vial se efectúa mediante el uso de técnicas de fresado [1]. En muchos casos, esto puede deberse a la existencia de una excesiva deformación transversal (ahuellamiento) y al envejecimiento de la capa superficial asfáltica por la acción del clima y la sollicitación del tránsito, que lleva habitualmente a la pérdida de agregados superficiales, entre otras condiciones de deterioro que pueden llevar a tal decisión [2]. De este modo, además, se evita el fenómeno de recrecido, que conlleva a disminuciones en los gálibos relacionados [3].

Las herramientas de desbaste pueden revestir diferentes características, lo que da lugar, según la textura resultante en la pista, a diversas tipologías de fresado [4]. 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” [5].

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 [6]. Esta técnica de rehabilitación con capas adheridas se aplica en los casos en los cuales se desea eliminar deterioros superficiales y el pavimento existente presenta una buena condición estructural [7].

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 [8].

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 los que 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 Firms SNF-2018, realizado en Madrid (España), en cuyas memorias pueden ser consultados [9]. Las tareas se enmarcan en una Tesis Doctoral en la cual se profundizan aun más todos los conceptos asociados [10].

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, lo que lleva 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.

Para esto se instrumenta el estudio de un caso particular empleándose sistemas de ensayo que generen estas cargas dinámicas, con dotaciones de riego de liga aplicadas a partir del modelo desarrollado, observándose los resultados obtenidos y arribándose a las correspondientes conclusiones.

2 Desarrollo

2.1 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.

Tabla 1. Casos patrones de fresado analizados

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

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, obteniéndose por resultados los Diámetros de Parche de Arena (DPA) que se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Registro de Diámetros de Parche de Arena

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

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.

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, lo cual requeriría de una disminución de la dotación.

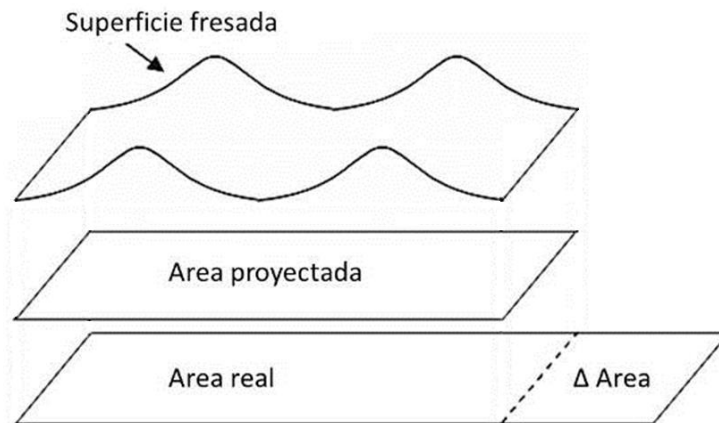


Figura 1. Incremento de Area por fresado



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

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 $0,25 \text{ l/m}^2$, determinado para los materiales empleados en esta experiencia, mediante el ensayo de 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.

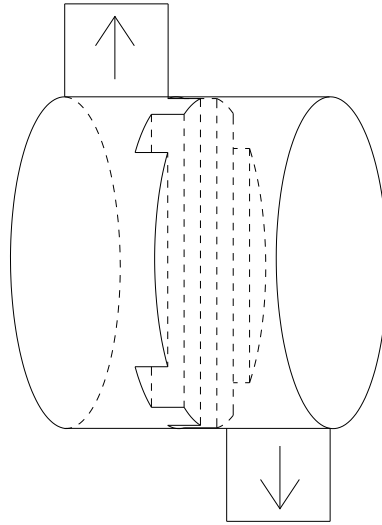


Figura 3. Orientación del fresado en el ensayo

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*), a partir de un Coeficiente de Incremento (*CI*) y una Dotación de Riego (*DR*), mediante la aplicación de la Ecuación 1.

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

donde *DRI*, *CI* y *DR* ya han sido definidos con anterioridad.

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

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

donde *CIA* y *DPA* ya han sido definidos con anterioridad.

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 éstas 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 visualiza el texto en portugués, pues así es el modo en que lo expresa el equipo de ensayo.

UTN - FRLP LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 27/12/2017 Hora: 14:09:20 Trabalho n° **0743**
 Programa: Tesc versão 3,05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostras: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	8,4	0,4	2,9
CP 2	7,0	0,3	2,6
CP 3	7,9	0,3	2,7
Número CPs	3	3	3
Média	7,764	0,3482	2,735
Mediana	7,907	0,3442	2,703
Desv Padrão	0,7337	0,01480	0,1162
Coef.Var.(%)	9,451	4,250	4,250
Mínimo	6,969	0,3359	2,638
Máximo	8,415	0,3646	2,864

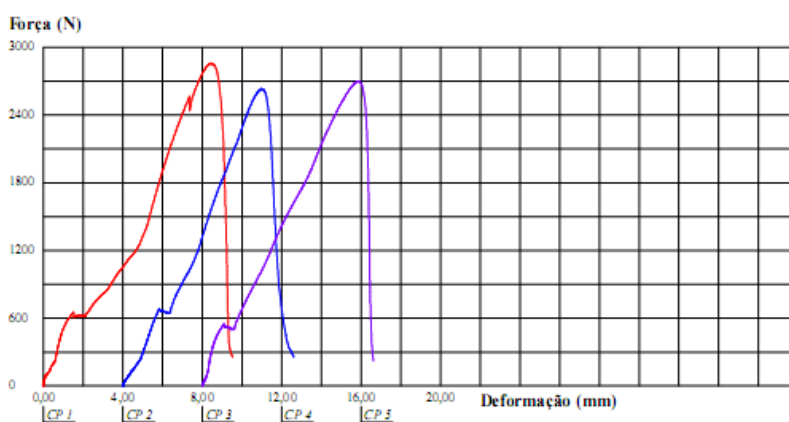


Figura 4. Resultados ensaio de corte estático Caso 6 de la Situación 3

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.

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

donde *CIR* y *DPA* ya han sido definidos con anterioridad.

2.2 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, analizándose su respuesta a fatiga en las cuatro Situaciones que fueran descriptas 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 este trabajo. El ensayo en cuestión es el propuesto por Romanoschi [11], denominado *Shear Fatigue Test of*

the Asphalt-to-Asphalt Interfaces (ensayo de fatiga al corte de interfases 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 .

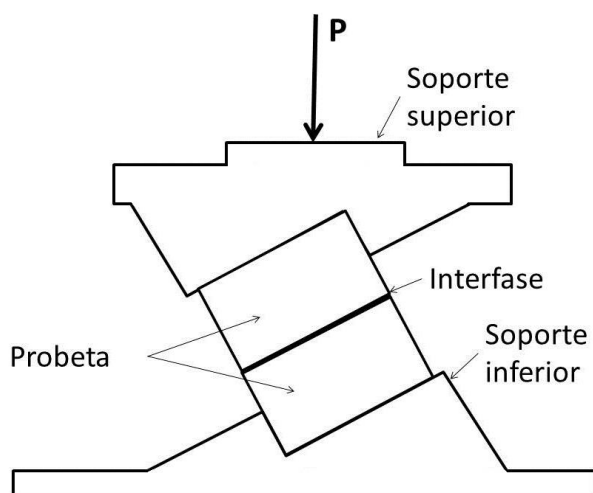


Figura 5. Esquema del *Shear Fatigue Test*

Para efectuar este ensayo en las instalaciones del LEMaC, se cuenta con el equipo destinado al ensayo de Módulo Dinámico conforme a la Norma UNE-EN 12697-26 [12], 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, con la gráfica de sollicitación que se observa en la Figura 6.

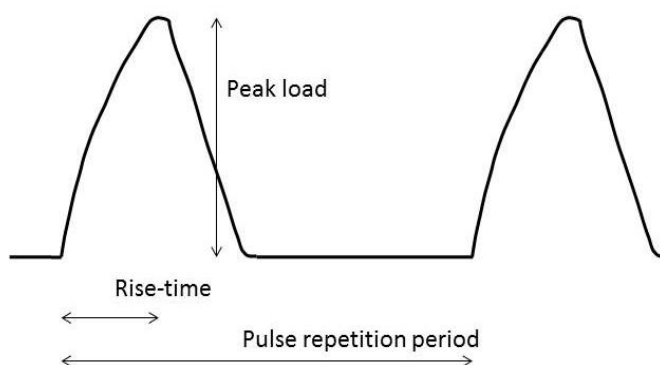


Figura 6. Ciclo de carga para el ensayo a fatiga

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 [13], 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 interfases de variadas estructuras de pavimentos propuestas y analizadas mediante la técnica de los elementos finitos por Giovanon y Buono [14], 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 periodo de repetición de la carga (*pulse repetition period*) se establece en una determinada cantidad de segundos, imponiendo el periodo 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.

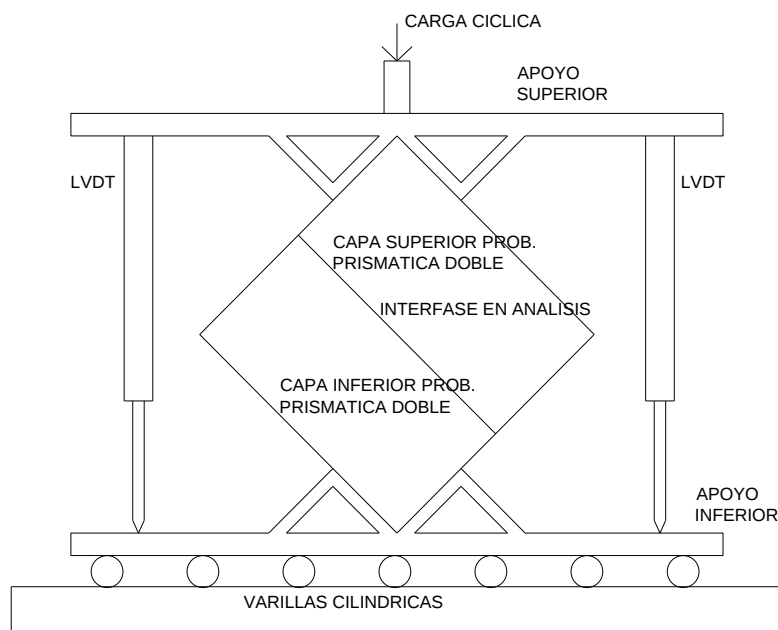


Figura 7. Esquema de ensayo de fatiga de la interfase del LEMaC

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, con 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 moldeadas mediante el compactador *Roller Compact*, habiéndose 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*

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

En la Figura 10 puede verse el escaneo comparativo de dos secciones. La imagen superior proviene de un testigo extraído en obra luego del proceso de fresado. La imagen inferior proviene del escaneo de la sección generada por aserrado. Ambas imágenes se encuentran volcadas en una misma escala. Puede concluirse del análisis visual comparativo la notable similitud lograda con la técnica de simulación del fresado mediante el aserrado en laboratorio instrumentada.

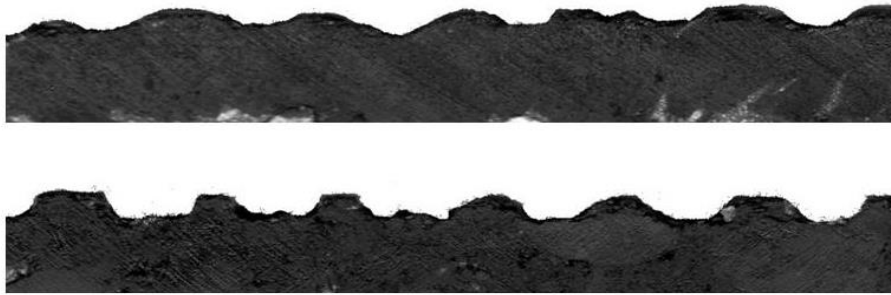


Figura 10. Perfil de fresado real versus simulación por aserrado

En la Figura 11 se muestran las probetas dobles resultantes, luego de ser efectuada la capa de revestimiento.



Figura 11. Probetas dobles prismáticas moldeadas

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 12.

Todo lo descrito en cuanto a diseño de la sistemática de laboratorio desarrollada ha sido volcado en el procedimiento de ensayo LEMaC-A09/18 de la “Guía de metodologías y procedimientos para uso vial desarrollados en el LEMaC” (<http://ria.utn.edu.ar/handle/123456789/4092>) [15].



Figura 12. Probetas cúbicas generadas por aserrado para análisis a fatiga, Caso 4

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 13 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 14 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 13. Escaneo en alta resolución de un corte en sentido transversal al fresado

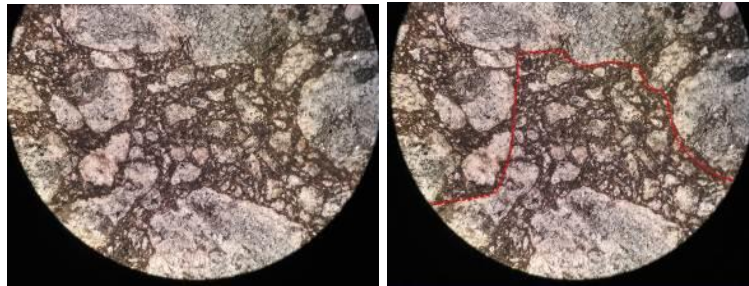


Figura 14. Imágenes con lupa de un corte en sentido transversal al fresado

3 Resultados

3.1 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 15 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 16, en las cuales 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 15. Imágenes durante el ensayo a fatiga de una de las probetas cúbicas

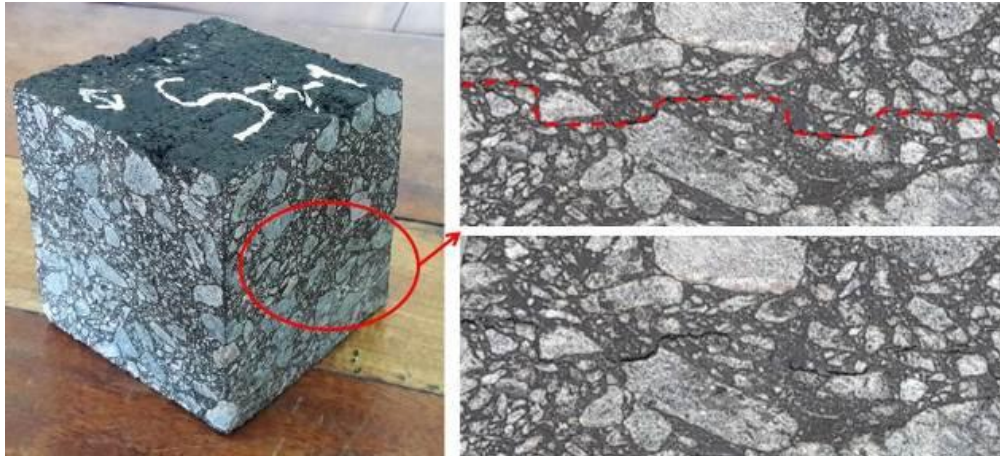


Figura 16. Detalle de probeta ensayada a fatiga y su interfase

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 17.

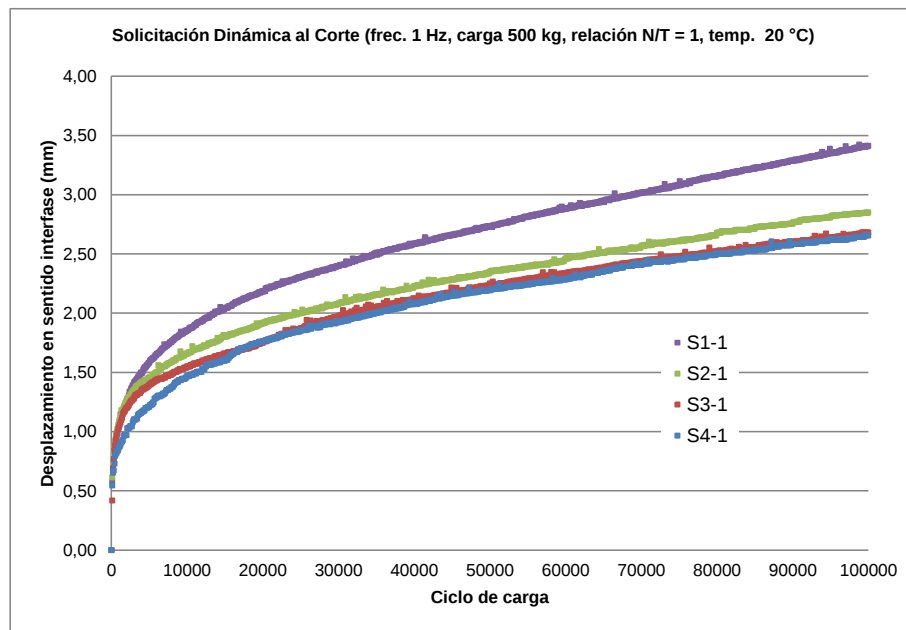


Figura 17. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la primera serie

Si bien las curvas volcadas en la Figura 17 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 según la Ecuación 4.

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

donde *PCD*, ya definida con anterioridad, se expresa en mm/10³ ciclos, *D*₁₀₀ es el desplazamiento a los 100.000 ciclos de carga (mm) y *D*₅₀ es el desplazamiento a los 50.000 ciclos de carga (mm)

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

Tabla 3. Resultados para la primera serie de probetas

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

Los resultados muestran que, si bien la D_{100} en la probeta S₃₋₁ resulta levemente superior a la de la probeta S₄₋₁, las PCD obtenidas marcan una tendencia hacia el mínimo para la probeta S₃₋₁. 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.

3.2 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 por probeta, incluyéndose su acondicionamiento.

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 mayores 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 18 se observa la probeta S₁₋₂ 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 19 se observa la probeta S₄₋₂ 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 20. En dicha figura se puede ver 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.

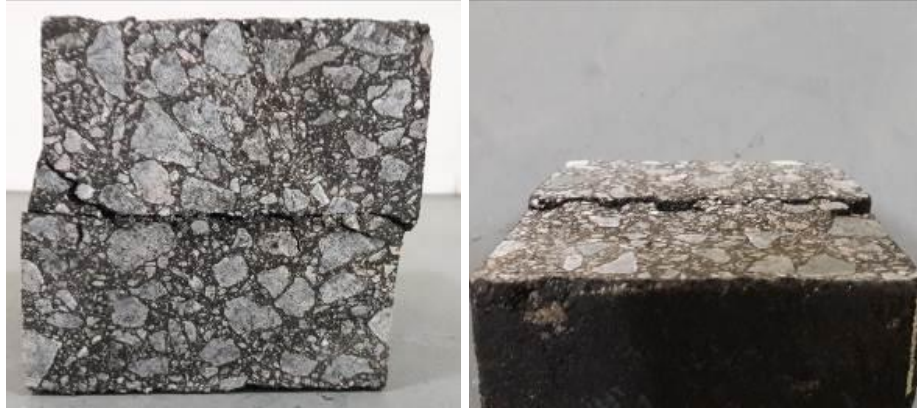


Figura 18. Imágenes de la probeta S₁₋₂ ya ensayada

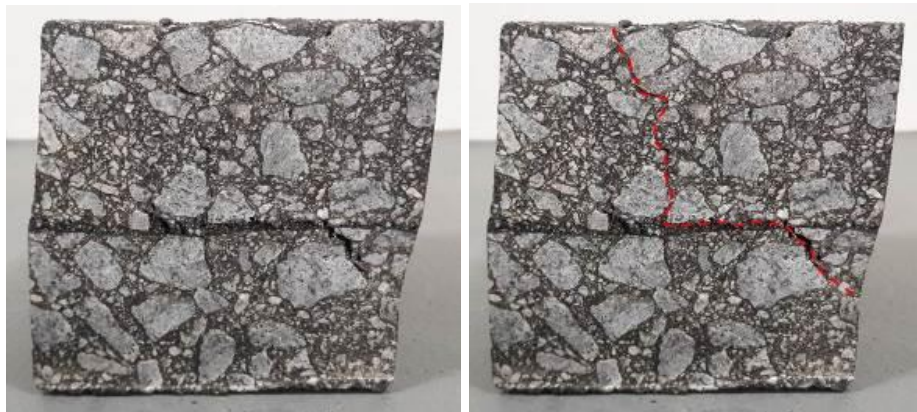


Figura 19. Imágenes de la probeta S₄₋₂ ya ensayada

Puede observarse como la cantidad de ciclos para los TD_{5mm} resulta óptima para la Situación 3.

En cambio, al observar los ciclos para los TD_{10mm} , se ve que la situación óptima se da claramente en la probeta S₄₋₂.

Esto podría interpretarse como un indicio en cuanto a 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. De todos modos, también es probable, dado las fisuras observadas en las probetas, que a ese nivel de desplazamientos relativos el sistema se encuentre ya en falla. Por lo expuesto, los resultados de los ensayos efectuados con esta serie de probeta estarían nuevamente en coincidencia con los obtenidos de manera estática.

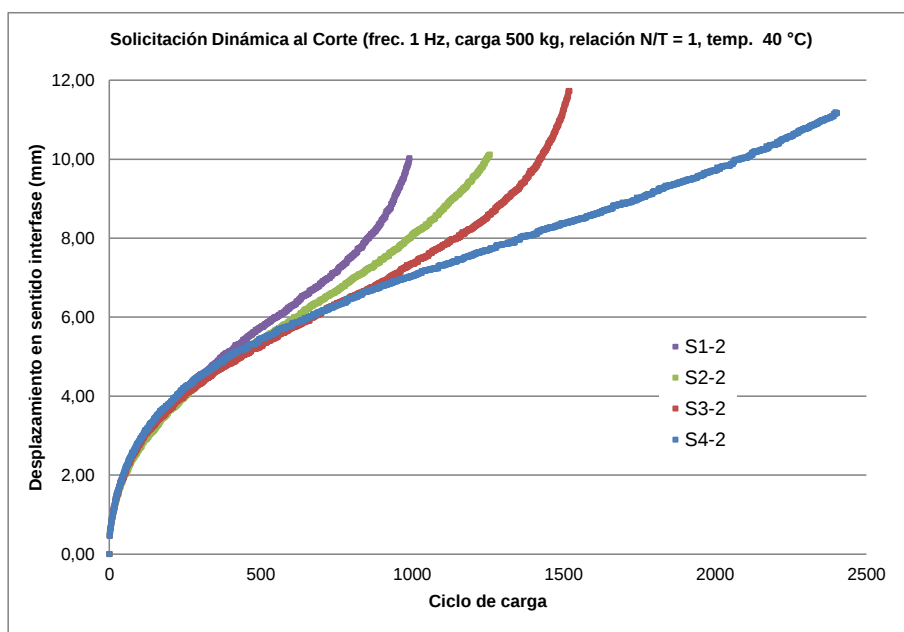


Figura 20. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la segunda serie

Tabla 4. Resultados para la segunda serie de probetas

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

3.3 Tercera serie de ensayos a fatiga

Se decide ensayar la tercera serie de probetas a una temperatura 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 21. En esta imagen se ve que las curvas de las probetas S₁₋₃ y S₂₋₃ no se muestran hasta los 100.000 ciclos debido a inconvenientes registrados en el equipo adquirente de datos durante su ensayo; para el ensayo de las probetas S₃₋₃ y S₄₋₃ 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}).

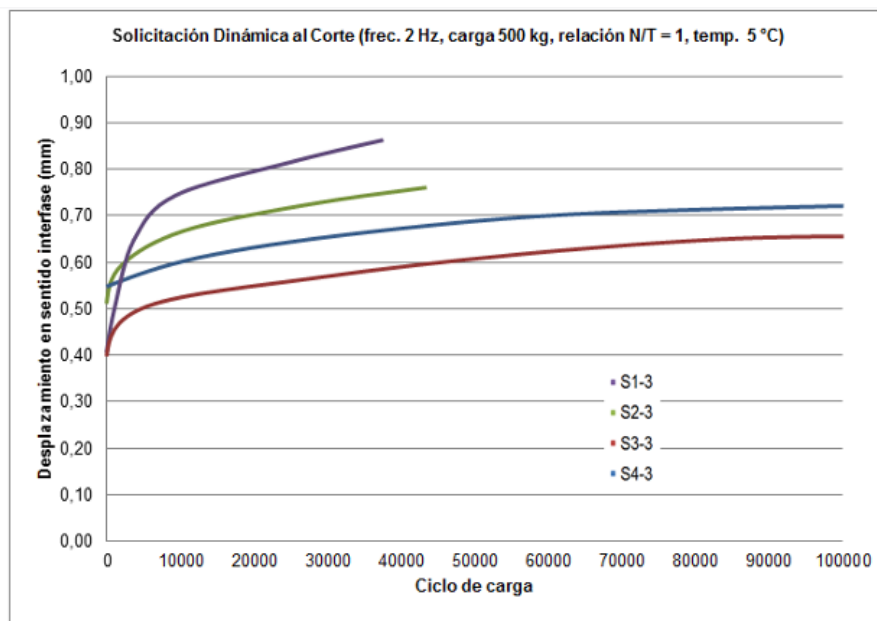


Figura 21. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la tercera serie

Tabla 5. Resultados para la tercera serie de probetas

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

Como puede observarse, a 5 °C los resultados obtenidos permitirían ratificar que la situación óptima es la Situación 3, en forma coincidente con lo establecido mediante los ensayos estáticos y los ensayos dinámicos a 20 °C y 5 °C. No obstante, 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.

4 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 evitándose el fenómeno de recrecido.

Esta tarea requiere el uso de equipos rotatorios de fresado, provistos de herramientas de desbaste que pueden presentar diferentes características, lo que da 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, al considerar 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 según 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 cm³, es:

$$CIR = 2,014 \cdot DPA^{-0,184}.$$

De la aplicación preliminar de análisis al corte mediante sollicitaciones 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 °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.

5 Referencias

- [1] NCHRP. "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 1-37^a, 2004.
- [2] Miller, J. S., & Bellinger, W. Y. "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), 2003.
- [3] Martínez-Echeverría, M. J. "Estudio del procedimiento de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa". Universidad de Granada, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2007.05.036>
- [4] Bonfim, V. "Fresado de pavimentos asfálticos", Editorial Exceção, primera edición, Brasil, 2008.

- [5] WIRTGEN. "El mundo de las fresadoras en frío de Wirtgen". Wirtgen Group Company, Alemania, 2015.
- [6] Bussard, M. "Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt Milling & Micro Milling". P.R. Systems Inc, 2014.
- [7] Espinoza, M. "Capas de refuerzo con hormigón adheridas como alternativa para la rehabilitación de pavimentos asfálticos". Revista Infraestructura Vial, 17(30), 40-49, 2015.
- [8] Montetrusque, M., Bernucci, L., Leite, F., & Teoro Carmo, C. A. "Avaliação da aderência de geogrelhas entre camadas asfálticas". En Memorias XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (pp. 919–929). Argentina, 2015.
- [9] Rivera, J., Bianchetto, H., & Botasso, G. "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, 2018.
- [10] Rivera, J. "Estudio de riegos asfálticos de liga entre capas asfálticas para rehabilitación de pavimentos flexibles fresados". edUTecNe, Universidad Tecnológica Nacional, ISBN 978-987-1896-98-1, 2019.
- [11] Romanoschi, S. A. "Characterization of Pavement Layer Interfaces". Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, EEUU, 1999.
- [12] UNI EN 12697-26 Annex C. "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness". BSI, 2012.
- [13] DNV, "Pliego de especificaciones técnicas generales para riegos de liga con emulsiones asfálticas", Dirección Nacional de Vialidad, Argentina, 2017. [Consultado en julio de 2017 en: http://www.vialidad.gov.ar/sites/default/files/PETG_8.pdf]
- [14] Giovanon, O. & Buono, F. "Riego de liga su importancia estructural y análisis tensional". XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto. Argentina, 2008.
- [15] Rivera, J., & Botasso, H. G. "Guía de metodologías y procedimientos para uso vial desarrollados en el LEMaC", edUTecNe, Universidad Tecnológica Nacional, ISBN 978-987-4998-27-9, 2º Edición, 2019.