

Título: “Estudio de riegos bituminosos de adherencia para rehabilitación de firmes flexibles fresados”.
Revista: Carreteras de la Asociación Española de Carreteras (España). Código: ISSN 0212-6389. 4º Época, N°235, Año 2021, pp. 19-29. Autores: **J. Rivera**.

Estudio de riegos bituminosos de adherencia para rehabilitación de firmes flexibles fresados
Study of asphalt tack coats in the rehabilitation of milled flexible pavements

José Julián Rivera

LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP – CIC PBA, Universidad Tecnológica Nacional
Fac. Reg. La Plata (Argentina), Subdirector LEMaC

Avenida 60 y 124, La Plata (1900), Bs. As., Argentina; jrivera@frlp.utn.edu.ar; tel. +54-221-4890413

Título reducido: Riego de adherencia sobre firmes fresados

RESUMEN

En rehabilitaciones con capas bituminosas, se aplica un riego de adherencia como interfase. Si previamente se fresa superficialmente se modifica la textura incidiendo en su dotación; dado un incremento de superficie de interfase que requeriría mayores tasas y formación de surcos que producirían escurrimiento del riego, limitándolas. Es necesaria una solución de compromiso mecánicamente óptima. En su estudio se aplica un procedimiento para elaborar especímenes y ensayarlos; estableciéndose las dotaciones por proporcionalidades respecto del incremento de la superficie de la interfase debido al fresado. Para ello se desarrolla un modelo para estimar ese incremento mediante una adaptación del Ensayo de Parche de Arena. Se estima con ensayos estáticos la dotación óptima en términos del incremento de superficie, arribándose a un modelo de aplicación en campo asociado. La investigación se realiza sobre materiales de Argentina. Como validación se realiza el análisis a fatiga y aplicaciones en obra en Argentina y España.

ABSTRACT

In rehabilitations with asphalt layers, a tack coat is applied as an interface. If it is previously milled superficially, the texture is modified, affecting its dosage; given an increase in interface surface that would require higher dosages and formation of grooves that would produce runoff of bitumen emulsion, limiting them. A mechanically optimal compromise solution is necessary. In its study, a procedure is applied to elaborate specimens and to test them; establishing the dosages by proportionalities concerning the increase in the surface of the interface due to milling. For this, a model is developed to estimate this increase through an adaptation of the Sand Patch Test. The optimal dosage in terms of the increase in surface area is estimated with static tests, arriving at a field application model associated. The research is carried out on materials from Argentina. As validation, fatigue analysis, and on-site applications are carried out in Argentina and Spain.

Palabras claves: rehabilitación de firmes, fresado, riegos de adherencia, parche de arena.

Keywords: pavement rehabilitation, milling, tack coat, sand patch test.

1. DESARROLLO DEL MODELO DE APLICACION

Durante la explotación de un firme flexible se desarrollan actividades dirigidas a su rehabilitación, eliminándose en ocasiones parte de la capa de rodamiento por medio de técnicas de fresado [I,II,III]. Esta tarea da lugar a distintos grados de textura, diferentes a la de la superficie original, pues esta última en términos relativos puede considerarse “lisa” [IV]. Luego, previo a la colocación de la capa de refuerzo, corresponde disponer un riego de adherencia de una emulsión bituminosa para generar una adecuada interfase [V,VI], a fin de que, si el firme existente presenta una buena condición estructural, las tensiones y deformaciones generadas por efecto del tráfico no afecten la vida útil prevista [VII,VIII].

Existen pocos estudios que hayan encarado la temática, por lo que se realiza el trabajo que se presenta, en el marco de una tesis doctoral en ingeniería de materiales, de la cual se puede descargar su versión completa en <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/3581>.

1.1. Materiales y métodos abordados en el desarrollo del modelo

1.1.1. El riego de adherencia

El vínculo entre la superficie existente y la capa de refuerzo en caliente aplicada depende fundamentalmente de la cantidad de ligante bituminoso residual del riego efectuado con una emulsión bituminosa (parámetro mediante el cual se expresa la dotación en cuestión) [IX,X]. La Dirección Nacional de Vialidad de la Argentina (DNV) estipula que la emulsión a utilizarse sea del tipo catiónica de curado rápido, con una dotación que arroje un resultado de al menos 0,7 MPa en el ensayo de adherencia entre capas de rodadura UNE-EN 12697-48 (ensayo de SBT) [XI].

1.1.2. El fresado en la rehabilitación

Los equipos de fresado dan origen a diversos resultados de textura superficial (fresado estándar, fino y microfresado), lo que puede dar lugar a una escala de casos patrones de fresado basados en diversa bibliografía de consulta [IV,V,VIII,XII].

1.1.3. El análisis de la respuesta mecánica en la interfase

El análisis estructural de la interfase que se realice se encuentra condicionado al modelo estructural que se emplee [XIII,XIV], por lo que un adecuado modelado de la interfase lleva a optimizar los costos de una rehabilitación [XV] si considera la incidencia del fresado y sus características en cada caso en particular [XVI]. Los modelos mecánicos de interfases expresan la relación entre el desplazamiento de corte a lo largo del plano de interfase y los esfuerzos normales y de corte. Ante sollicitaciones estáticas hasta rotura, Romanoschi (1999) obtiene gráficas de las curvas típicas de esfuerzo de corte vs. desplazamiento [XV]. Dada la naturaleza cíclica de la carga en las interfases de un firme, sólo los sectores elásticos y el sector de fricción del ensayo estático hasta rotura son empleables en su descripción; pudiéndose simplificar el análisis al acotarlo a una temperatura de referencia representativa y al considerar que sólo en los casos sin riego de adherencia se observa que el módulo de reacción al corte K difiere fuertemente con el nivel del esfuerzo normal aplicado. Se puede

pensar entonces en el modelo resumido de la Figura 1, con un punto de falla al Esfuerzo Máximo al Corte (S_{max}) en un determinado Desplazamiento al Corte (TD), a partir del cual comienza la interacción de fricción simple, caracterizada por el coeficiente de fricción μ , cuya determinación queda por fuera del alcance del presente trabajo.

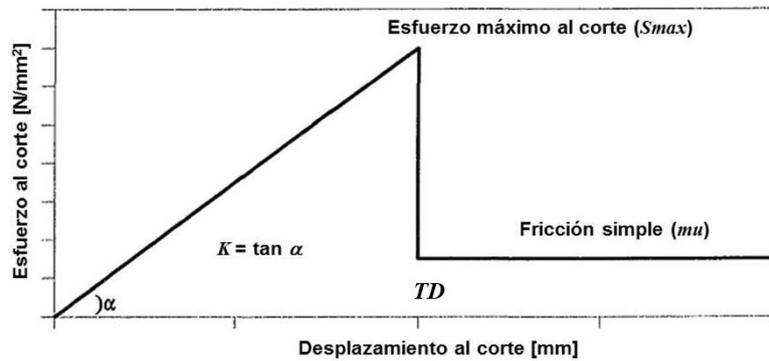


Figura 1. Modelo constitutivo simplificado

1.1.4. El ensayo al corte de la interfase

A nivel mundial se observan numerosos ensayos de interfases [XVII,XVIII]. No obstante, los ensayos de corte directo puro representan los más comunes en la aplicación del desplazamiento de corte y el registro del esfuerzo de corte [XVII,XIX]. El ensayo seleccionado para su aplicación en el presente trabajo es el que solicita al corte directo por tracción en forma paralela a la interfase del riego de adherencia, Figura 2.



Figura 2. Ensayo seleccionado para el estudio

En función de experiencias propias previas, se decide generar el esfuerzo cortante en el plano a evaluar a una velocidad de avance controlada de 1,27 mm/min y establecer la temperatura de ensayo en los 20°C, por considerarse representativa para la zona central de Argentina y de fácil obtención mediante sistemas sencillos de acondicionamiento.

El equipo de estudio liderado por D'Andrea (2013), revela que con el compactador Marshall se pueden confeccionar probetas dobles cilíndricas aplicándose la compactación sólo en la cara superficial. Entre ambas capas de este tipo de probetas se materializa el riego de adherencia, con un curado estandarizable en laboratorio [XX], mediante el uso de estufa de tiro forzado a temperaturas cercanas a los 60°C. Se establece para este trabajo que las probetas dobles a ensayarse se moldeen con espesores de 50 mm tanto de la base como de la capa de refuerzo. En el ensayo, para permitir el desarrollo de la interfase fresada, se decide separar los zunchos que toman la parte superior e inferior de la probeta doble unos 30 mm, generándose además de la deformación propia registrada en la interfase una deformación relacionada con la probeta en este sector. Por esto, las deformaciones tangenciales y las tensiones de corte resultan diferentes a las obtenibles con el ensayo de corte SBT (de referencia), en el cual los zunchos se encuentran separados una distancia mínima. Dado lo expuesto, los resultados de TD y de S_{max} a ser obtenidos en este trabajo sólo son comparables en forma relativa entre sí y no con los generados mediante otras metodologías de ensayo.

1.1.5. Determinación del incremento de área de interfase por fresado

Al contar con los resultados de los incrementos de área $\Delta(\text{Área})$ registrados ante diversas combinaciones de ancho y profundidad del surco (es decir sus valores medios y dispersiones) por ejemplo mediante simulación numérica, se pueden hallar los modelos de regresión que permitan la estimación en futuras aplicaciones de dicho $\Delta(\text{Área})$ a partir de los diámetros obtenibles del empleo de una metodología de ensayo análoga a la del Parche de Arena [XXI]. Siguiéndose esta línea de trabajo, se logra establecer que la fórmula que permite estimar el Coeficiente del Incremento del Área (CIA), es decir la proporción entre la superficie en la interfase fresada respecto de dicha superficie en los casos de interfase lisa, en función del Diámetro del Parche de Arena (DPA) resultante para un volumen de arena de 40 cm³, es $CIA = 5,03 DPA^{-0,41}$. La correlación es corroborada en laboratorio sobre probetas de los casos representativos de fresado establecidos, simulándose mediante el uso de una hoja diamantada los distintos grados de fresado.

1.2. Resultados y discusión del análisis ante solicitaciones estáticas

1.2.1. Contenido óptimo de riego de adherencia para superficie no fresada

Para poder analizar la influencia del incremento de superficie de la interfase en los sistemas abordados, se debe contar primero con una dotación de riego de adherencia para el caso de la no existencia del fresado en la interfase (lisa). Para eso se selecciona una emulsión bituminosa catiónica de corte rápido a ser empleada y una mezcla bituminosa tanto para la constitución del sustrato inferior como superior del tipo Concreto Asfáltico en Caliente convencional Denso con Tamaño Máximo de sus agregados de 19 mm (CAC-D19). Dados los entornos de dotaciones recomendados por la bibliografía de consulta, se deciden analizar los distintos contenidos de riego de adherencia.

Puede deducirse así un máximo valor de S_{max} de 0,325 MPa, asociado a una TD de 11,0 mm, alcanzable con la dotación de 0,25 l/m². Dado que la especificación técnica aplicable en la jurisdicción nacional en Argentina establece una S_{max} de 0,7 MPa de acuerdo al Ensayo de SBT [XI],

que posee diferentes características que el aplicado para el estudio, surge la duda de si los resultados obtenidos mediante el ensayo instrumentado son comparables al especificado. Por lo expresado, se realiza el moldeo de un juego de probetas con la dotación óptima establecida, obteniéndose los resultados de S_{max} levemente superiores a 0,9 MPa; por lo que puede deducirse que corresponden a los de una situación que implicaría el cumplimiento de los valores establecidos por el pliego de DNV [XI].

1.2.2. Análisis mediante ensayos en casos con superficies fresadas

Resta analizar 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. Esta duda surge, entre otros aspectos, porque es probable que un incremento excesivo en la dotación del riego de adherencia no se distribuya en forma homogénea sobre la superficie fresada, debido al grado de fluidez de la emulsión, pudiéndose generar un depósito de mayor espesor en el valle de los surcos. Para analizar esto se procede en laboratorio, sobre una probeta con fresado simulado, a la aplicación con pincel de la dotación de riego de adherencia incrementada en proporción al incremento del área de contacto en la interfase. Dicha probeta es luego aserrada, procediéndose a su observación con una lupa Olympus SZ61, con un aumento aproximado de 45x, lográndose imágenes como las de la Figura 3. Se observa como la hipótesis efectuada tendría un grado de validez, ya que resulta claro que la deposición del riego en los valles del fresado resulta superior a la que se obtiene en sus crestas.



Figura 3. Disposición del riego lograda en laboratorio

Paso seguido se estudian situaciones que representan un incremento de esa dotación en 3/3, 2/3, 1/3 y 0/3 de proporción del incremento del área de contacto en la interfase por el fresado (Situación 1 a la Situación 4 respectivamente), en los casos de simulación de fresado establecidos. Se procede al moldeo de las probetas dobles a ser analizadas. Luego de moldeadas las bases se procede al aserrado superficial de las probetas simulándose el fresado, a la aplicación de los riegos y al moldeo de las capas superiores. Se realiza su ensayo mediante el procedimiento desarrollado, destacándose que, dado que la flexión principal del firme se da en su sentido longitudinal y que el fresado presenta

su superficie dentada también en este sentido, se decide efectuar los ensayos con la probeta doble dispuesta de acuerdo a esa orientación.

Los resultados obtenidos permiten desarrollar tablas en las que se vuelcan los valores promedio de S_{max} y TD , respectivamente, para los correspondientes valores de coeficiente de incremento del riego (CI), en cada Caso y cada Situación. Dado que se obtiene para todos los casos que la Situación 3 implica los CI óptimos, se puede proceder ahora a establecer a estos valores como los Coeficientes de Incremento de Riego (CIR); es decir, aquellos finalmente utilizables en el modelo resultante de toda la experiencia para establecer la Dotación de Riego Incrementada (DRI) a partir de la Dotación de Riego para la interfase lisa (DR) mediante la fórmula $DRI = CIR \cdot DR$. Para arribar a los DRI en función de los DPA , resta entonces correlacionar a los valores obtenidos para cada caso con los CI óptimos establecidos (asumidos ahora como los DRI). Se puede ajustar por regresión a la nube de puntos una función del tipo potencial, la cual permite obtener un coeficiente de determinación R^2 de 0,99, acorde al umbral empírico generalmente establecido para estudios de esta índole de 0,90 [XXII]. La fórmula que permite finalmente establecer el CIR en función del DPA , resultante para un volumen de arena de 40 cm³, es $CIR = 2,014 \cdot DPA^{-0,184}$.

1.3. Forma de empleo en obra de la metodología de análisis resultante

Una idea de partida con que se cuenta es que, en una obra, es posible que se registren diversos tramos homogéneos de superficie fresada a ser reforzada, ya sea porque se realiza esta tarea con diferentes equipos, con un mismo equipo sometido a mantenimiento (cambio de puntas de fresado, modificación del tambor de fresado, etc.), por la variabilidad misma en el empleo de dicho equipo y de su operador, etc.

La metodología de análisis resultante, a partir de esta consideración, puede emplearse allí, al menos de tres formas diferentes. La primera forma se asocia directamente con los pasos llevados adelante en las experiencias realizadas. Es decir, se parte de conocer el material a ser hallado en obra y el que será aplicado como refuerzo. Esto permite generar en el laboratorio pastones de prueba representativos de dichos materiales. A partir de éstos, se determina con probetas dobles, o mediante alguna otra vía válida, la dotación óptima a utilizarse en el caso de una interfase entre superficies lisas. Luego, en obra, se procede al ajuste de dicha dotación en función de la realización de mediciones con la metodología análoga al Parche de Arena y la aplicación del modelo desarrollado. Esto se aplica en cada tipología de tramo homogéneo registrada. La segunda forma se basa en que en cada tramo representativo de los materiales de la obra se extraigan testigos de la carpeta de rodamiento existente. Se confeccionan con éstos y con el material a ser empleado en el refuerzo las probetas dobles necesarias. Con ellas se determina el contenido óptimo de riego de adherencia para la interfase entre superficies lisas. Acto seguido, se efectúa el ajuste de dicha dotación en función de la realización de mediciones con la metodología análoga al Parche de Arena y la aplicación del modelo desarrollado en cada tipología de tramo homogéneo registrada en obra, tal cual en la primera opción. La tercera forma puede resultar un poco más compleja y atractiva de aplicar. Se basa en

instrumentar “tramos de prueba” del fresado. Así, en cada uno de éstos, representativo de los materiales de la obra y del fresado, se extraen testigos de la carpeta de rodamiento existente. Simultáneamente, se realizan en los mismos las mediciones correspondientes con la metodología análoga al Parche de Arena desarrollada. Luego, se confeccionan, con los testigos y con el material a ser empleado en el refuerzo, las probetas dobles necesarias y se determina el contenido óptimo de riego de adherencia para la interfase con esa textura de fresado. Esto permite entonces aplicar sobre esa dotación los modelos desarrollados en forma inversa, de manera tal de establecer virtualmente cuál sería la dotación óptima de riego de adherencia si el ensayo se hubiera realizado en el caso de la interfase lisa. Finalmente, se ajusta dicha dotación en función de la realización de mediciones con la metodología análoga al Parche de Arena y la aplicación del modelo desarrollado, en cada tipología de tramo homogéneo registrada en obra, tal cual en la primera opción.

Estas formas de empleo no serían en todos los casos alternativas factibles entre las cuales optar, pues es posible que en ciertas aplicaciones los condicionantes existentes lleven a la posibilidad de uso de sólo una o dos de estas alternativas. El criterio ingenieril debe utilizarse para decidir en tal sentido. Como un ejemplo, puede mencionarse un caso en el cual el uso de la primera alternativa de aplicación sería el más indicado. Se trata de obras nuevas, en las cuales, por razones de terminación superficial o corrección de espesores, se deba fresar en sectores parte del espesor de una base bituminosa, previo a la colocación de la capa de rodamiento bituminosa. En dicha situación, la determinación de la dotación óptima de riego de adherencia, se obtendría posiblemente a través de ensayos de probetas con interfase lisa durante los estudios previos a la realización de la obra. Así, se aplicarían las correcciones en la dotación del riego cuando deban resolverse los sectores mencionados. En cambio, un ejemplo en el cual no sería conveniente emplear la primera alternativa, sería el caso de obras de refuerzo de firmes muy envejecidos, en las cuales el remoldeo de una mezcla en laboratorio para la confección de las bases de las probetas podría no resultar representativo.

1.4. Análisis de respuesta al corte a fatiga

Para esta parte del estudio, se decide tomar una textura de muestra, 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 (1999), denominado *Shear Fatigue Test of the Asphalt-to-Asphalt Interfaces* [XV]. En ese ensayo, 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 de la probeta es cercana a los 25° , se obtiene una relación 2:1 entre la fuerza N y la fuerza T .

Para efectuar este ensayo se cuenta con el equipo destinado al ensayo de módulo ante cargas cíclicas conforme 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 frecuencia de cargas. 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 se puede considerar el rango de la distribución de esfuerzos de corte en interfases de variadas estructuras de firmes, 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 [XXIII]. Dado que la máxima carga cíclica que puede otorgar el equipo con que se cuenta es de 500 kg, se decide para obtener una tensión de corte en la interfase de 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 esquema del sistema de ensayo adaptado a los efectos del desarrollo de este trabajo puede observarse en la Figura 4, con los surcos del fresado dispuestos en dirección al plano de deslizamiento a generarse durante el ensayo.

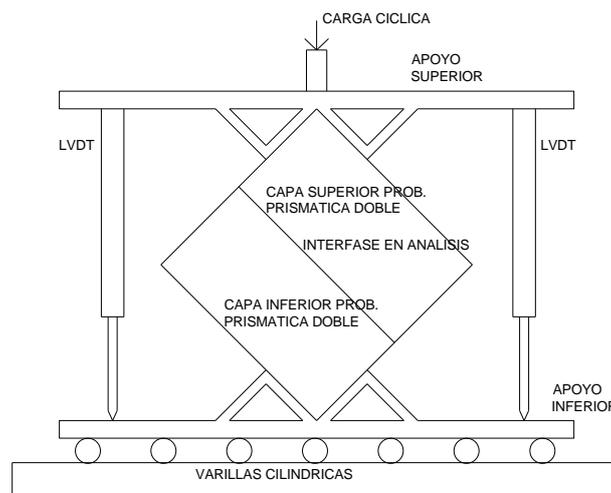


Figura 4. Esquema de ensayo de fatiga de la interfase adaptado

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

- Moldeo con la mezcla bituminosa patrón, que presenta una Densidad Marshall de Referencia y con una compactación mediante el equipo *Roller Compact*, de dos probetas prismáticas de 30 cm x 30 cm x 5 cm.
- Simulación del fresado mediante aserrado de la superficie de ambas probetas.
- Aplicación de las dotaciones de riego de las Situaciones 1 a 4 sobre las probetas, cubriéndose 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.

1.4.1. Resultados del análisis a fatiga

Primera serie de ensayos a fatiga

Se decide ensayar como primera serie a las probetas S_{1-1} , S_{2-1} , S_{3-1} y S_{4-1} , a la temperatura ya empleada en los ensayos estáticos de 20°C, con una frecuencia de aplicación de la carga de 1 Hz y con 100.000 repeticiones. En la Figura 5 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. En la Figura 6 se observan las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase para la primera serie de probetas (calculado a partir de la deformación vertical registrada) versus los ciclos de carga.



Figura 5. Imágenes durante el ensayo a fatiga de una de las probetas cúbicas

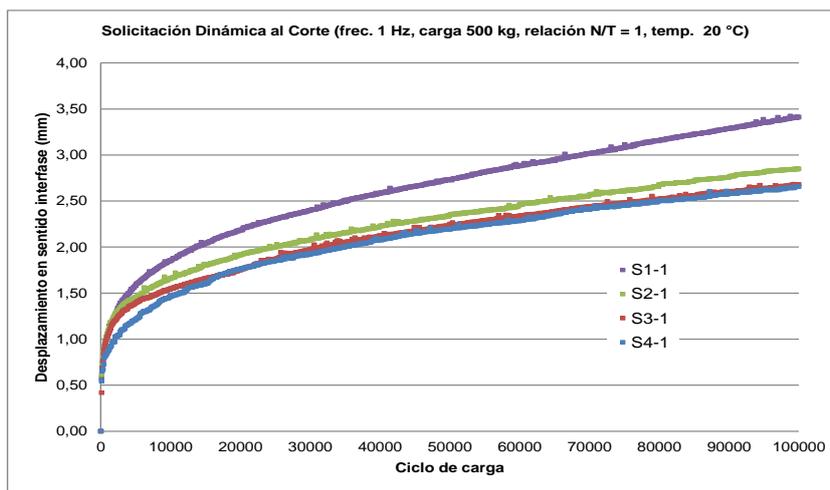


Figura 6. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la primera serie

Si bien las curvas volcadas en la Figura 6 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 1.

$$PCD = \frac{D_{100} - D_{50}}{50} \quad (1)$$

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 1 en la cual se vuelcan los resultados obtenidos para la primera serie de ensayos.

Tabla 1. Resultados para la primera serie de probetas

Probeta	<i>D</i> ₅₀ (mm)	<i>D</i> ₁₀₀ (mm)	<i>PCD</i> (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 sollicitaciones estáticas.

Segunda serie de ensayos a fatiga

Se observa que la temperatura de ensayo y la frecuencia de carga seleccionadas requerirían de una cantidad de repeticiones en las sollicitaciones 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 40°C, habitual en otros estudios sobre sistemas que involucran mezclas bituminosas 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 las probetas ensayadas se observa visualmente un mejor comportamiento ante las menores dotaciones de riego de adherencia analizadas. En la Figura 7 se observan 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. 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 2 muestra los resultados obtenidos en tal sentido. 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 adherencia 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.

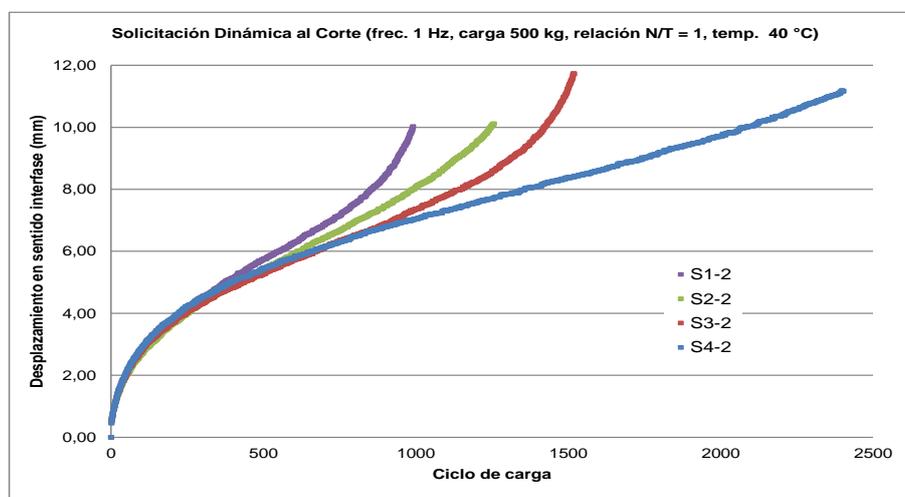


Figura 7. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la segunda serie

Tabla 2. Resultados para la segunda serie de probetas

Probeta	Para TD_{5mm} (ciclos)	Para TD_{10mm} (ciclos)
S1-2	374	990
S2-2	414	1246
S3-2	436	1422
S4-2	393	2081

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 bituminosas para observar el comportamiento esperable a bajas temperaturas. También se modifica la frecuencia de cargas, estableciéndola en 0,5 Hz. En la Figura 8 se observan 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. 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 adquisidor 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 3 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, en forma coincidente con lo establecido mediante los ensayos estáticos y los ensayos dinámicos a 20°C y 5°C.

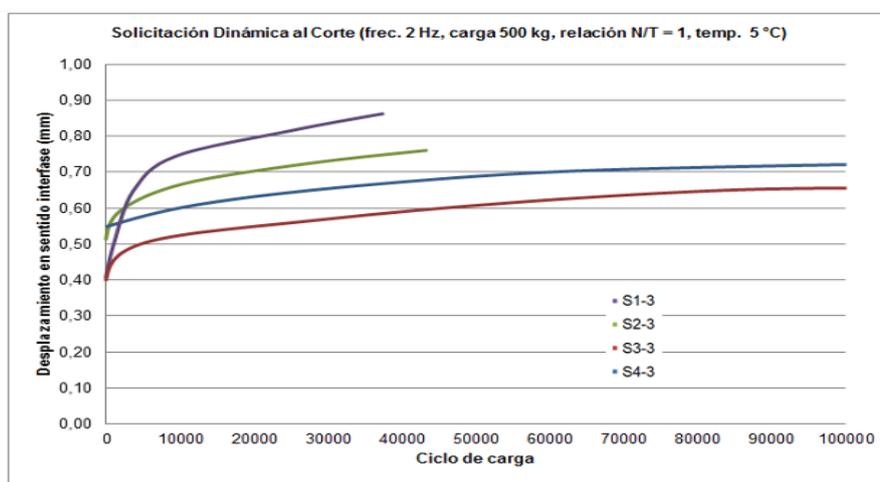


Figura 8. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la tercera serie

Tabla 3. 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

2. APLICACIÓN A CASOS REALES DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA

Para analizar si lo modelado en laboratorio se ajusta a lo observable en la práctica, se decide efectuar estudios sobre dos obras viales en las cuales se realice el fresado de la capa de rodamiento existente, con la presencia de un espesor remanente de mezcla bituminosa a ser reforzada. Uno de los estudios se realiza sobre materiales idénticos a los empleados en las experiencias en laboratorio, en una obra vial situada en la provincia de Buenos Aires (Argentina). El otro se realiza sobre

materiales diferentes a los analizados en laboratorio, y mediante la aplicación de una sistemática de ensayo distinta, relacionada con una obra efectuada en la provincia de Lérida (España).

2.1. Análisis de un caso en la Ruta Provincial N° 215 en Coronel Brandsen

La Ruta Provincial N° 215 (RP215) es una carretera en el noreste de la Provincia de Buenos Aires, que en diciembre de 2017 se encuentra sometida a una obra de ampliación y rehabilitación de calzada en su tramo entre las localidades de Coronel Brandsen y San Miguel del Monte; a cargo de la empresa ICF y bajo la jurisdicción de la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires (DVBA). Entre los ítems de obra se encuentran los de fresado de la carpeta bituminosa existente en la calzada en sus 5 cm superficiales (dejándose 8 cm de mezcla bituminosa remanente), la aplicación de un riego de adherencia bituminoso y la colocación de una capa bituminosa de refuerzo tipo CAC-D19; razón por la cual se la ha seleccionado para efectuar el análisis comparativo en obra respecto de lo observado en laboratorio. Como paso inicial se efectúan las determinaciones con la metodología análoga a la del Ensayo de Parche de Arena desarrollada, utilizándose el volumen de 40 cm³ de arena establecido como óptimo. En la Figura 9 se observa una imagen general con las determinaciones de *DPA* realizadas (izq.) y otra de extracción de los testigos (der.).



Figura 9. Determinaciones análogas al Ensayo de Parche de Arena efectuadas

Paso seguido, se efectúa la extracción en una misma hilera de fresado, correspondiente al sector en el cual se realizaron las determinaciones anteriormente señaladas, de testigos de 10 cm de diámetro de la mezcla bituminosa remanente. Los testigos extraídos en la obra son acondicionados, mediante su corte con sierra circular diamantada, en un espesor de 5 cm, análogo al de las bases de las probetas dobles moldeadas en las experiencias en laboratorio. Durante esta tarea se tiene especial cuidado en generar un plano de corte paralelo al de fresado. Al material sobrante del acondicionamiento por corte de los testigos se le realiza la determinación del contenido de bitumen y la recuperación de los agregados, mediante la aplicación combinada de una centrífuga de plato y una

centrífuga de vasos, de acuerdo a lo establecido por el procedimiento LEMaC-A01/06 [XXIV]. Se obtiene como resultado un contenido de bitumen del 4,8 %. Los áridos recuperados de la muestra dejan apreciar visualmente que se trata de una mezcla bituminosa típica de la zona, elaborada con árido granítico de trituración. A estos áridos se les determina su curva granulométrica, la cual se compara con las curvas límites de una mezcla CAC-D19 de DNV [XI], estableciéndose que encuadran perfectamente. Por todos los datos recabados se arriba a la conclusión de que la mezcla bituminosa remanente en obra es una típica mezcla CAC-D19 de la zona, con similares características a la mezcla bituminosa utilizada en las experiencias de laboratorio.

Si bien para la obra se cuenta con una dotación del riego de adherencia a ser aplicado, constituido por una emulsión bituminosa CRR-1, se plantea para el análisis comparativo considerar las dotaciones utilizadas en las experiencias en laboratorio, como una vía para establecer la validación de los resultados obtenidos. Por esto, se decide moldear probetas dobles que tienen como base a los testigos extraídos y en las cuales se emplea para el riego de adherencia y la capa de revestimiento los mismos materiales utilizados durante las experiencias de laboratorio previas. El análisis se realiza en laboratorio con la aplicación de tres dotaciones, de forma tal de ver si se ratifican los resultados obtenidos en las experiencias previas, correspondientes a las situaciones de:

- Dotación I: dotación de riego de adherencia óptima establecida para la interfase en superficies lisas (es decir, la Situación 4).
- Dotación II: dotación de riego de adherencia establecida mediante la fórmula desarrollada para estimar el *CIR* (es decir, la Situación 3).
- Dotación III: dotación de riego de adherencia establecida mediante el incremento directo de la superficie de contacto en la interfase, es decir empleando el *CIA* (es decir, la Situación 1).

Al observar las probetas ensayadas se puede ver como con la Dotación I la rotura se genera casi en su totalidad en el riego de adherencia, con la Dotación II existe una mayor proporción de la rotura generada parte en el riego y parte en la superficie de la base y con la Dotación III nuevamente una rotura producida mayoritariamente en el riego. A partir de los resultados promedios se observa que la tensión de corte máxima S_{max} de 0,262 MPa y el desplazamiento al corte en la rotura TD de 5,4 mm se da con la Dotación II, que surge de la aplicación del *CIR* de acuerdo al modelo desarrollado. Por lo expresado, estos resultados guardan relación con los logrados en las experiencias en laboratorio. Resulta pertinente pensar por ello que la experiencia realizada valida los *CIR* obtenidos. Además, habría en el estudio dos series de probetas que se pueden individualizar y comparar, pues responden a una misma tipología de materiales. Por un lado, están aquellas confeccionadas con un testigo de una capa bituminosa fresada de una obra existente como base y un revestimiento de carpeta bituminosa nueva moldeado en laboratorio. Por el otro, se encuentran las que poseen la capa de base (con fresado simulado por aserrado) y de revestimiento nuevas moldeadas en laboratorio. Al analizar las resistencias al corte de ambas series, se ve que las primeras se encuentran por debajo de las segundas. Esto se condice por lo expresado por Berenguer et al.

(2017), en cuanto a que los testigos dobles extraídos en campo dan generalmente menores resistencias al corte que las probetas dobles moldeadas en laboratorio [XXV].

2.2. Análisis de un caso en una obra en la provincia de Lérida (España)

En la provincia de Lérida, situada en la comunidad autónoma de Cataluña, es habitual la conformación de capas viales bituminosas que emplean áridos calizos y bitumen de baja penetración. A raíz de la existencia de un proyecto de investigación conjunto con la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), relacionado con la temática que aborda el presente trabajo, se plantea la realización de una experiencia que haga uso de estos materiales, para observar la posible extrapolación de resultados en tal sentido.

Las mezclas bituminosas que constituyen el sistema a ser analizado, tanto en la capa de base fresada como en la de revestimiento, es del tipo de Concreto Asfáltico Semidenso de Tamaño Máximo 16 mm (AC16S), de acuerdo al Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) de España [XXVI]. Este último establece que esta mezcla bituminosa debe responder a ciertos límites granulométricos, presentar un contenido mínimo de bitumen de 4,5 % y estar colocada en espesores de entre 4 cm y 5 cm. También el PG-3 estipula las características a ser cumplidas por el riego de adherencia a ser utilizado, del tipo C60B3ADH. La formulación de la mezcla bituminosa se logra mediante un agregado grueso 8:16 (participando en un 28,58 %), un agregado intermedio 4:8 (en un 23,81 %), un agregado fino 0:4 (en un 42,86 %) y un bitumen 35/50 (en un 4,75 %). La emulsión bituminosa empleada para el riego de adherencia es del tipo C60B4ADH, la cual presenta una velocidad de rotura menor a la C60B3ADH, con un residuo de bitumen del 60 % y una penetración del asfalto residual (en 0,1 mm) de 180-200. A partir de estos materiales y dosificación, se moldean probetas dobles con interfase lisa correspondientes a diferentes dotaciones de residuo de bitumen del riego de adherencia. Dado lo que se estila en España, se emplean las dotaciones expresadas en unidad de peso por unidad de superficie. De todos modos, como el problema a resolver es de tipo volumétrico, si se desea analizar las dotaciones en l/m² no hace falta más que afectarlas por la densidad del residuo de bitumen. Para este moldeo se utiliza el sistema de compactación de martillo percutor, montado sobre un pie de compactación, que se hace actuar sobre la capa a compactarse durante 2 minutos.

Las probetas así moldeadas se analizan en su resistencia al corte mediante el Ensayo LCB adaptado a la potencial existencia del fresado en la interfase. Para ello se realiza el desmolde parcial de la probeta doble, hasta lograr una posición de ésta que permita el desarrollo de una luz de 15 mm a ambos lados de la interfase; es decir, entre la interfase y el molde y entre la interfase y el apoyo. Luego, se llevan durante al menos 4 horas al acondicionamiento a 20°C en cámara. Las probetas se ensayan finalmente mediante la metodología especificada. A partir de los resultados obtenidos se establece para esta sección del estudio un contenido óptimo de riego de adherencia para la interfase lisa de 400 g/m² con un S_{max} de 0,923 MPa y un TD de 1,17 mm. De todos modos, se observa también que el rango de ese contenido óptimo resulta notoriamente más amplio que el registrado

mediante la sistemática de ensayo empleada con materiales locales en Argentina. Esto puede deberse a dos factores importantes, relacionados con la reología del ligante bituminoso implicado. Uno de ellos es que la penetración del bitumen residual del riego de adherencia utilizado es elevada, lo cual implica un importante componente viscoso en su comportamiento a la temperatura de 20°C de ensayo. El otro aspecto es que la velocidad de ensayo de 2,5 mm/min es el doble que la de 1,27 mm/min empleada en las experiencias en Argentina. En relación a esto último, cabe recordar que a mayor velocidad de ensayo se obtienen resultados mayores de resistencia al corte y menores de desplazamiento, lo cual no facilita la visualización de las diferencias relativas entre los diversos contenidos de dotación de riego de adherencia empleados.

A continuación, se procede a trasladar este contenido óptimo de riego de adherencia para la interfase lisa a una experiencia de obra análoga a la efectuada en el punto anterior. Para eso se tramita el acceso a un tramo de prueba de fresado superficial de una capa bituminosa realizada con los materiales en estudio. Dicho tramo de prueba, ubicado como ya se ha expresado en la provincia de Lérida, se encuentra en las instalaciones del obrador que la empresa Benito Arnó e Hijos SAU posee en el municipio de Alfarrás. El fresado se realiza en julio de 2018. En la Figura 10 se puede observar a la izquierda la realización de las mediciones con parche de arena de la textura del tramo y a la derecha la extracción de los testigos a emplearse en la continuidad del estudio. Los testigos extraídos son acondicionados en laboratorio mediante su aserrado en un espesor de 5 cm.



Figura 10. Tareas en el tramo en estudio. Fuente: Benito Arnó e Hijos SAU

Las dotaciones son aplicadas a los testigos. Paso seguido, se moldean las probetas dobles, las cuales una vez que se han enfriado son desmoldadas parcialmente para lograr la ubicación de la interfase en el punto intermedio de los 30 mm dejados de luz entre el borde del molde y el apoyo. Entonces, se procede al ensayo de las probetas, obteniéndose curvas de esfuerzo al corte versus desplazamiento en la interfase, en las que se ve cómo la pérdida de carga se da de manera más lenta que en los ensayos efectuados con el procedimiento desarrollado para el estudio. Esto deja en evidencia la existencia de ciertas diferencias en la aplicación de ambas metodologías de análisis.

Mediante los ensayos se obtienen los resultados óptimos de aproximadamente 0,850 MPa de S_{max} y 1,8 mm de TD , ubicados entre la Dotación I y la Dotación II, más cercana a la primera. De todos modos, se observa que estos valores logrados sólo deben ser tomados de manera indicativa, dado lo limitado de las muestras analizadas; razón por la cual se deduce la necesidad de profundizar los conocimientos en tal sentido en futuros estudios asociados.

3. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante el presente estudio 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; pudiéndoselos utilizar para establecer la Dotación de Riego Incrementada (DRI) a partir de una Dotación de Riego para la interfase lisa (DR), mediante $DRI = CIR \cdot DR$. 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 que permitirían ratificar los resultados obtenidos mediante la aplicación estática de la carga, pero que en regiones en las cuales 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 adherencia.

En aplicaciones sobre materiales notoriamente diferentes a los empleados en las experiencias y/o con metodologías de ensayo que disten de la desarrollada, es posible obtener resultados no totalmente coincidentes con los de laboratorio, razón por la cual se requiere conducir estudios adicionales en tal sentido.

REFERENCIAS

- [I] MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, M.J., “Estudio de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa”, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 2012.
- [II] NCHRP, “Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures”, National Research Board, 1-37A team, EEUU, 2004.
- [III] MILLER, J., BELLINGER, W., “Distress identification manual for the long-term pavement performance program”, fourth revised edition, report n° FHWDA-RD-03-031, Washington DC, EEUU, 2003.
- [IV] WIRTGEN, “El mundo de las fresadoras en frío de Wirtgen”, Wirtgen Group Company, Alemania, 2015.
- [V] BUSSARD, M., “Milling & Micro Milling”, P.R. Systems Inc., EE UU, 2014.

- [VI] RIVERA, J., BIANCHETTO, H., QUEIZAN, A., "Modelo para corrección de dosaje de riegos de liga sobre superficies fresadas en refuerzos asfálticos", Revista Carreteras, N° 218, pp 46-54, marzo-abril de 2018.
- [VII] ESPINOZA, M., "Capas de refuerzo con hormigón adheridas como alternativa para la rehabilitación de pavimentos asfálticos", Revista Infraestructura Vial (ISSN 1409-4045), Universidad de Costa Rica, volumen 17, número 30, diciembre, Costa Rica, 2015.
- [VIII] MONTETRUSQUE, M., BERNUCCI, L., LEITE, F., TEORO CARMO, C.A., "Avaliação da aderência de geogrelhas entre camadas asfálticas", Memorias XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, ISBN 978-950-630-031-9, Bariloche, Argentina, 2015.
- [IX] RICCI, L., "Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético", Tesis de Maestría en Ingeniería en Transporte – Orientación Vial, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2011.
- [X] DUEÑAS, A., RECASENS, R., "Emulsiones de adherencia resistentes al tráfico de obra", Revista Carreteras, no 128, pp 27-36, 2003.
- [XI] DNV, "Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos", Dirección Nacional de Vialidad, Argentina, 2017. [Consultado en julio de 2017 en: http://www.vialidad.gov.ar/sites/default/files/PETG_1.pdf]
- [XII] THE ASPHALT CONTRACTOR, "How Micromilling is Saving States Money on Asphalt Road Repairs", The Asphalt Contractor Magazine, 30 de noviembre de 2011. [Consultado 12 de diciembre de 2016 en: <http://www.forconstructionpros.com/article/10456001/how-micromilling-is-saving-states-money-on-asphalt-road-repairs>]
- [XIII] EICAM, "Curso de actualización de diseño estructural de caminos, método AASHTO93", Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1998.
- [XIV] UZAN, J., LIVNEH, M., ESHED, Y., "Investigation of adhesion properties between asphalt concrete layers", Proc. Assoc. Asphalt Paving Technologists, St. Paul, Minn, 47, 495-521, EEUU, 1978.
- [XV] ROMANOSCHI, S.A., "Characterization of Pavement Layer Interfaces", Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, EEUU, 1999.
- [XVI] BROWN, S.F., BRUNTON, J.M., "The influence of bonding between bituminous layers", Highways Transportation, 31(5), 16-17, EEUU, 1984.
- [XVII] D'ANDREA, A., TOZZO, C., BOSCHETTO, A., BOTTINI, L., "Interface roughness parameters and shear strength", Modern Applied Science (ISSN 1913-1844), Canadian Center of Science and Education, vol 7, n 10, Canada, 2013.
- [XVIII] TOSTICARELLI, J.R., "Ensayos para evaluar la adherencia entre capas asfálticas", Memorias de la XXXII Reunión del Asfalto en Tafí del Valle (Tucumán), Comisión Permanente del Asfalto, Argentina, 2002.
- [XIX] BOTASSO, G., RICCI, L., FENSEL, E., DELBONO, L., RIVERA, J., "Sistema de membrana antifisuras con geocompuesto, una metodología de evaluación", Revista Carreteras, no. 175, pp 50-60, 2011.

- [XX] YAACOB, H., HAININ, M.R. et al., "Information for the malaysian asphalt industry towards better pavement interlayer bonding", Sains Malaysiana, n 43, vol 3, pp 467-474, Malasia, 2014.
- [XXI] IRAM, "Norma IRAM 1850: Agregados. Método de determinación de la profundidad de la macrotextura superficial de un pavimento mediante el círculo de arena", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 1997.
- [XXII] BELLO, M., "Apuntes de la capacitación sobre predicción y bondad de ajuste", Capacitaciones Software-Shop, Colombia, 2016.
- [XXIII] GIOVANON, O., BUONO, F., "Riego de liga su importancia estructural y análisis tensional", XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Rosario, Argentina, 2008.
- [XXIV] RIVERA, J., BOTASSO, G., "Guía de metodologías y procedimientos para uso vial desarrollados en el LEMaC", edUTecNe, Universidad Tecnológica Nacional, ISBN 978-987-4998-27-9, 2° Edición, 2019.
- [XXV] BERENGUER, J.M., CALVO, C., MOLINA, J., GOMARIZ, R., PEÑA, J.L., "El ensayo de adherencia de capas de firme según NLT-328/08. Estudio comparativo de los resultados obtenidos con los dispositivos A y B", XIX Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto, Medellín, Colombia, 2017.
- [XXVI] BOE, "Orden FOM/2523/2014 del Ministerio de Fomento", Boletín Oficial del Estado, número 3, sección III, página 584, 3 de enero, España, 2015.