

ADAPTACION DEL ENSAYO DE PARCHE DE ARENA PARA ESTIMAR LA CORRECCION DE DOTACION DE RIEGOS DE ADHERENCIA EN REHABILITACIONES SOBRE FIRMES BITUMINOSOS SOMETIDOS A FRESADO SUPERFICIAL

J. Julián Rivera⁽¹⁾, Hugo D. Bianchetto ⁽²⁾, H. Gerardo Botasso⁽³⁾

(1) Magister en Transporte y Logística e Ingeniero Civil, LEMaC Centro de Investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, La Plata (Argentina).

(2) Doctor en Ingeniería Civil e Ingeniero en Vías de Comunicación, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda, Avellaneda (Argentina).

(3) Magister en Ingeniería Ambiental e Ingeniero Civil, LEMaC Centro de Investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, La Plata (Argentina).

Autor de contacto: jjulianrivera@hotmail.com.ar

Resumen: *Cuando un firme bituminoso es sometido a una rehabilitación mediante la aplicación de una nueva capa bituminosa superpuesta, es requisito extender sobre éste un riego bituminoso de adherencia, en una dotación generalmente preestablecida por el pliego de la obra. Pero cuando este firme es sometido además a operaciones de fresado superficial previas, la textura que ofrece se modifica. Por lo tanto, la dotación de riego de adherencia preestablecida debe afectarse en cierto grado.*

Por un lado, al fresar se produce un incremento de superficie en la interfase entre ambas capas, lo que podría llevar a un aumento de la dotación de riego a emplearse. Por el otro, se generan por el fresado surcos paralelos longitudinales, que pueden acarrear el escurrimiento del riego bituminoso incrementado desde sus cumbres hacia sus valles, generando una deposición excesiva en estos últimos. Entre ambas situaciones debe llegarse a una solución de compromiso intermedia, que permita alcanzar un comportamiento óptimo.

El presente trabajo aborda la temática y arriba a esta solución en base a ensayos al corte directo de especímenes con este tipo de interfase, en los distintos grados de textura hallados en la obra vial, aplicados sobre materiales característicos de la Argentina; complementándose con la aplicación de una adaptación del Ensayo de Parche de Arena, que permite establecer en obra el grado de textura de cada tramo de fresado en particular y aplicar así correcciones a la dotación en función de la misma.

Dicho trabajo se realiza en el marco de una Tesis Doctoral en Ingeniería en Materiales, desarrollada en el LEMaC, Centro de Investigaciones Viales de Argentina. Se presentan los detalles de las tareas efectuadas en laboratorio y obra a tales efectos, dándose como conclusión el modelo de solución para la situación descripta y el procedimiento para su aplicación.

Summary: *When an asphalt pavement is subjected to a rehabilitation with the overlay of a new asphalt layer, it is required to extend over it an asphalt tack coat, in a dosage usually pre-established by the general technical specifications of the project. But when this pavement is also subjected to previous surface milling operations, its texture is modified. Therefore, the pre-established tack coat dosage should be affected in some degree.*

On the one hand, when milling, there is an increase of the area at the interface between the two layers, which could lead to an increase in the tack coat dosage to be used. On the other hand, longitudinal parallel ruts are generated by milling, which can lead to the runoff of the increased asphalt coat from its summits to its valleys, generating an excessive deposition in the latter ones. Between both situations, an intermediate compromise solution must be reached, which allows an optimum performance to be achieved.

The present work analyzes this thematic and establishes a solution based on direct shear tests of specimens with this type of interface, in the different degrees of texture found in a road project, applied on characteristic materials of Argentina. This is complemented by the application of an adaptation of the Sand Patch Test, allowing to establish on site the degree of texture generated by milling in each road section, and the corrections of tack coat dosage depending on it.

This work was carried out in the framework of a Doctoral Thesis in Materials Engineering, developed in the LEMaC, Road Research Center of Argentina. The details of the tasks performed in the laboratory and on road site are presented, giving as a conclusion the solution model for the situation described and the procedure for its application.

Palabras clave: Refuerzos Bituminosos, Riego de Adherencia, Fresado de Firmes.

Key words: Asphalt Reinforcement, Tack Coat, Pavement Milling.

1. INTRODUCCION

La superficie de rodamiento de una vialidad ha de proporcionar una conducción cómoda y segura al usuario, por eso durante su fase de explotación se desarrollan actividades dirigidas a su mantenimiento y rehabilitación, con la finalidad de dotar nuevamente al firme de sus condiciones iniciales [1]. Entre los casos de rehabilitación, existen aquellos en donde la evaluación superficial y/o estructural del firme, establece 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 [2]. Esto puede deberse en muchos casos a una excesiva deformación transversal del firme, que genera el fenómeno de roderas o ahuellamiento, y/o al envejecimiento del mismo por la acción climática y la sollicitación del tráfico [3]. Por esta vía además se elimina el fenómeno de recrecido, con las correspondientes disminuciones en gálibos [1].

El proceso de fresado implica el empleo de equipos del tipo rotatorio, provistos de herramientas de desbaste. Las herramientas de desbaste pueden revestir diferentes características, dando lugar, según la textura resultante en la pista, a diversas tipologías de fresado. Entre estas tipologías, existen aquellas en donde la aplicación posterior de una nueva capa de revestimiento resulta aceptable y otras en las que no [4]. Las primeras constituyen el campo de estudio planteado. Cualquiera sea de las tipologías de fresado aptas para su refuerzo, 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 bituminosa, ya que la misma, en términos relativos, puede considerarse “lisa” [5,6].

En los casos de refuerzo de firmes bituminosos, como los abordados en este trabajo, corresponde disponer un riego de adherencia, consistente en la aplicación de emulsión bituminosa sobre la superficie fresada, con el objetivo de conseguir su unión con la capa de revestimiento que se vaya

a ejecutar con posterioridad para establecer una adecuada interfase [7]. Esta técnica de rehabilitación con capas adheridas se aplica en casos en donde se desea eliminar deterioros superficiales y el firme existente presenta una buena condición estructural [8]. Si la adherencia en la interfase es inadecuada, las tensiones y deformaciones generadas por efecto del tráfico se incrementan y, consecuentemente, se reduce la vida útil del firme [9]. Pero los estudios encarados hasta el momento en cuanto a las dotaciones, características y atribuciones estructurales de los riegos de adherencia bituminosos involucrados bajo este concepto, han abordado mayoritariamente los casos en donde son aplicados sobre la superficie original. Resta profundizar, por ello, el análisis de la aplicación de dichos riegos sobre las capas bituminosas fresadas, dadas las condiciones particulares que éstas presentan, de acuerdo a lo que se ha expuesto. Se encara entonces el análisis necesario correspondiente, el cual tiene como campo de aplicación la rehabilitación con capas bituminosas de firmes, constituyentes de las políticas de conservación y mantenimiento llevadas adelante por las reparticiones públicas en sus redes viales urbanas y rurales; o por empresas privadas en la materialización de estas tareas en redes viales de parques industriales, terminales de transporte, barrios cerrados, etc.

2. LA REHABILITACION DE LOS FIRMES BITUMINOSOS

2.1 La dotación del riego de adherencia

La cantidad de ligante bituminoso residual sobre la superficie del firme es el factor más importante en la obtención de un vínculo adecuado entre la superficie del firme existente y la nueva capa de mezcla bituminosa en caliente. En consecuencia, la tasa de aplicación de una emulsión bituminosa utilizada como riego de adherencia debe basarse en la cantidad deseada del residuo bituminoso estipulada por las Especificaciones Técnicas Particulares de la obra. Esta diferenciación entre dotación de emulsión y de residuo bituminoso resulta importante tenerla presente y se recomienda que en todos los casos sea empleado el término dotación refiriéndose al residuo bituminoso netamente proporcionado [10]. Cabe acotar lo establecido para vías de su jurisdicción por la Dirección Nacional de Vialidad de la Argentina (DNV) en su “Pliego de especificaciones técnicas generales para riegos de liga con emulsiones asfálticas”, donde se estipula que la emulsión a utilizarse sea del tipo CRR-0 o CRR-1 (encuadrando en la Norma IRAM 6691 como emulsión 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 corte sobre testigos, Leutner o de SBT, Figura 1) y que se ubique en el rango de 0,25 kg/m² a 0,40 kg/m² [11]. Si bien esto es así, como se explicará más adelante, estos valores sólo deben tomarse a los efectos del presente trabajo como indicativos, pues al implementar una metodología de ensayo que incluye algunas adaptaciones relacionadas con los objetivos en específico establecidos, las resistencias al corte esperables durante su ejecución no son directamente comparables a lo especificado.



Figura 1. Máquina de ensayo de Leutner (www.controls-group.com)

2.2 El empleo del fresado en la rehabilitación

El equipo de fresado, aplicable en los casos abordados, se concibe a partir de la segunda mitad de la década de 1970, simultáneamente tanto en Europa como en América del Norte, como herramienta adecuada para posibilitar y garantizar el desbaste del firme en profundidades predeterminadas [4]. De la simple observación de obras, cabe señalarse que esta técnica puede dar origen a diversos resultados de textura superficial, según se observa en las imágenes de la Figura 2, siendo alta la textura en la izquierda y baja en la derecha.

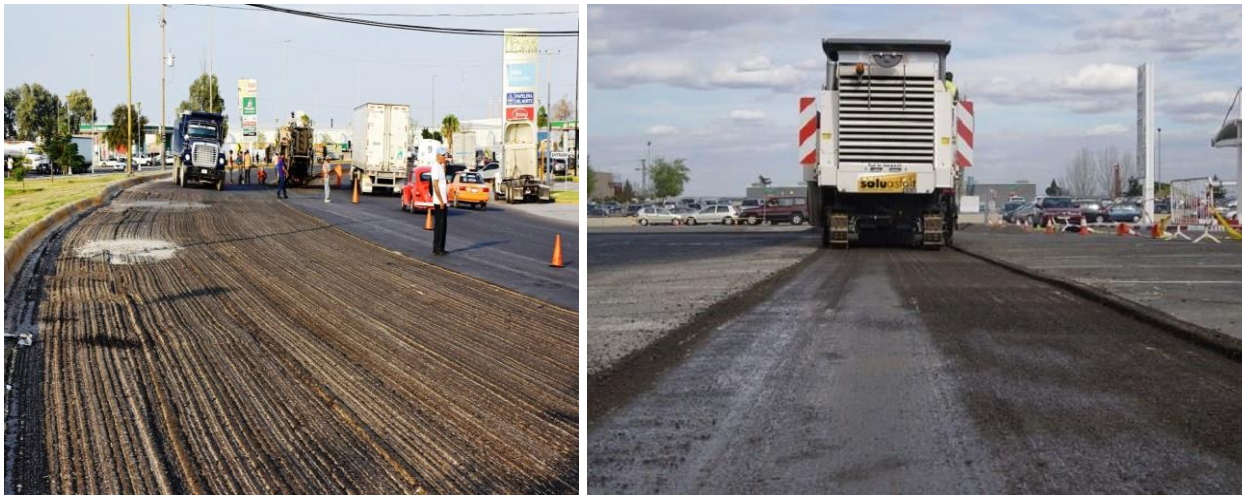


Figura 2. Obras de fresado (durangopress.com)

Resumiendo y aunando los valores recabados en la recopilación efectuada en cuanto al rango de texturas obtenibles, se puede establecer en vistas a los estudios a realizarse que, si se quisiera contar con una escala de seis casos patrones a ser considerados, los mismos podrían fijarse en los valores que se observan en la Tabla 1 [12,13,9,7].

Tabla 1. Casos patrones de fresado a ser 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

3. RESPUESTA MECANICA DE LA INTERFASE

La consideración estructural de la interfase que se realice en un caso en particular, estará condicionada al modelo estructural de análisis que se emplee, pues puede ser abordada desde diversos puntos de vista [14,15]. Genéricamente, en los firmes flexibles multicapas, particularmente abordados aquí, las solicitaciones del tráfico introducen tensiones importantes en la estructura que son absorbidas por el conjunto de las distintas capas que la componen. Las tensiones generadas por la acción del tráfico son introducidas en la estructura a través de la capa de rodamiento y transmitidas, a través de ésta, hacia las capas inferiores de la estructura y la subrasante [16,17]. Las mejoras en los procesos de análisis, incluyendo un adecuado modelado de la interfase, llevan a reducir costos de mantenimiento y rehabilitación [18]. Por esto, es necesario estudiar el modelado del paquete estructural reforzado y analizar de ser posible la incidencia del fresado, abarcándose los rangos de profundidad de surcos y separación de los mismos, que presentan físicamente diferencias en la constitución de la interfase [19].

Incluso las más modernas metodologías de análisis mecánico-empíricas; que emplean definiciones de las categorías funcionales de las vías [20,21], relacionables con las propiedades de rugosidad superficial, resistencia friccional del firme bituminoso a ser reforzado, y con la respuesta estructural de la interfase ante diferentes temperaturas y frecuencias de carga [22]; parten de estudios que se han encarado para materiales típicos de la zona de intervención de las agencias viales que les dan origen; por lo que se señala en todos los casos la necesidad de calibrar y validar los modelos de deterioro a los condicionantes y materiales locales [2,20].

La importancia de la textura de la interfase entre capas de un firme y la influencia negativa de la pérdida de adherencia en el comportamiento de la infraestructura, ha sido recién entendida a principios de la década de 1970. Los primeros logros de la mayoría de los investigadores fueron el diseño y desarrollo de nuevas metodologías de ensayo, capaces de caracterizar in situ o en laboratorio el comportamiento al esfuerzo de corte de interfases con diferentes texturas y tratamientos. Diversos procedimientos y ensayos existen en tal sentido, pero se desarrollan nuevos prototipos, típicamente usados para mejorar las investigaciones de diferentes factores afectando el esfuerzo de corte en la interfase. La comparación entre los dispositivos propuestos ha demostrado que los ensayos de corte son un buen y efectivo método para analizar la adherencia en interfases de firmes bituminosos [23]. La incógnita que surge se relaciona entonces en cuanto a cuál podría ser una forma de reflejar los niveles de adherencia que pueden darse en las interfases y, más específicamente, en las interfases entre capas bituminosas ante la existencia de tareas de fresado en las mismas.

En forma genérica, 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 [18]. Durante el deslizamiento, las interfases están sujetas a dos movimientos relativos:

- Movimiento normal de la interfase con resultados en la separación de las superficies en contacto (comportamiento dilatante).
- Movimientos tangenciales en el plano de la interfase.

Ante sollicitaciones estáticas hasta rotura, Romanoschi (1999) ha obtenido gráficas de las curvas típicas de esfuerzo de corte vs. desplazamiento y esfuerzo normal vs. desplazamiento al corte, en su estudio de interfases entre capas bituminosas, como se observan en la Figura 3 [18].

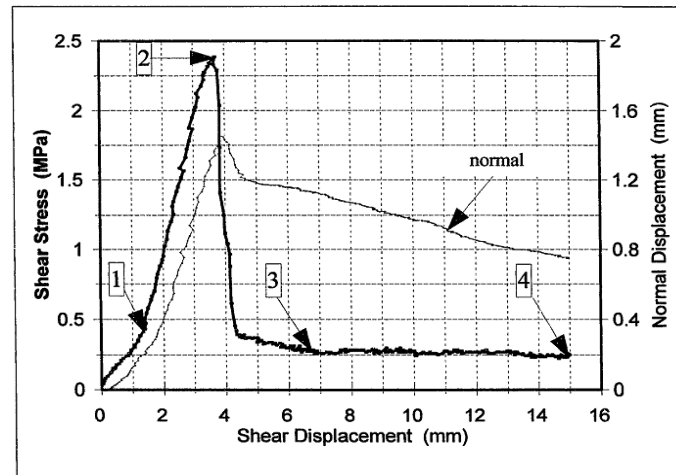


Figura 3. Gráfica típica de ensayos directos de cortes en interfases [18]

Allí se tienen 5 puntos de la curva de esfuerzo de corte vs. desplazamiento (señalados como 0, 1, 2, 3 y 4) separando a cuatro segmentos de la misma:

- Segmento 0-1: comportamiento lineal, caracterizado por un bajo módulo de reacción de la interfase K_1 . En esta etapa, la distribución de fuerzas de corte no es uniforme en la totalidad del área de la interfase. La extensión de este sector depende en gran medida de la superficie de contacto entre las probetas y su soporte metálico. Dada la diferencia entre el diámetro de la probeta y el diámetro interno del zuncho metálico, la probeta puede no estar fijada adecuadamente y se mueve levemente hasta que las fuerzas de corte están uniformemente distribuidas en el área de interfase. El Punto 1 de cambio en el módulo de reacción de la interfase se establece de manera visual.
- Segmento 1-2: comportamiento lineal, con un alto módulo de reacción de la interfase, K_2 . Los esfuerzos de corte se encuentran uniformemente distribuidos debajo del área de la interfase. El desplazamiento de corte se incrementa linealmente con los esfuerzos de corte. La falla de la interfase tiene lugar cuando el esfuerzo de corte alcanza la resistencia al corte de la interfase, en el Punto 2.
- Segmento 2-3: sector de post-falla. Los dos cuerpos en la interfase no están completamente separados, la interfase aun muestra algo de resistencia al corte.
- Segmento 3-4: sector de fricción. Los dos cuerpos en la interfase están completamente separados. Un modelo de fricción caracteriza el contacto entre los dos cuerpos.

Dado la naturaleza cíclica de la carga en las interfases de firmes, sólo los dos primeros sectores elásticos y el sector de fricción del ensayo estático hasta rotura son empleables en la descripción

de las condiciones de la interfase. El sector de post-falla debe aparecer en el ciclo cuando la interfase llega a rotura bajo el esfuerzo de corte. Por esto, no se efectúan análisis en este trabajo en cuanto a parámetros para caracterizar el sector de post-falla, habiendo sido considerado que luego de la falla las capas se encuentran completamente separadas. El modelo constitutivo de interfase propuesto que describe la interfase entre capas bituminosas es entonces un modelo de dos etapas. En la primera etapa, el desplazamiento de corte o el desplazamiento relativo de las dos capas en la interfase es proporcional a la fuerza de corte (modelo de Goodman), proporcionalidad proveniente del módulo de reacción de la interfase K en la dirección horizontal (Ecuación 1).

$$\tau = K \cdot du \quad (1)$$

En la mayoría de los casos, cuando el diámetro de la probeta es igual al del zuncho, el primer sector tiene continuidad con el segundo y $K_1 = K_2$, por lo que puede analizarse directamente un módulo de reacción de la interfase K en el modelo constitutivo, hasta el Esfuerzo de Corte Máximo (S_{max}). Si se considera que las variaciones de resultados obtenibles a diferentes temperaturas pueden ser acotadas si se toma una temperatura de referencia, adoptada como representativa, el análisis simplificado de la situación puede llevarse adelante. Por otro lado, en los antecedentes analizados se puede ver que en los casos de muestras sin riego de adherencia se ha observado que el módulo de reacción de la interfase K difiere más fuertemente con el nivel del esfuerzo normal aplicado que en los casos con riego de adherencia. Como mayoritariamente en este trabajo se analizan situaciones con riego de adherencia, puede pensarse entonces en un modelo resumido, en donde la primera etapa de la curva esfuerzo/deformación al corte se da cuando el esfuerzo al corte es menor que la resistencia al corte de la interfase (punto de falla S_{max}), dado que la interfase no ha llegado a su rotura; lo cual se da a un determinado Desplazamiento al Corte (TD). Una vez que la interfase ha fallado, y la segunda etapa comienza, la interacción entre capas puede ser descrita como de fricción simple, caracterizada por el coeficiente de fricción μ , quedando por lo ya explicado la determinación de este parámetro por fuera del alcance del presente trabajo. Este modelo constitutivo simplificado para la interfase entre capas bituminosas puede quedar representado entonces por lo que se observa en la Figura 4.

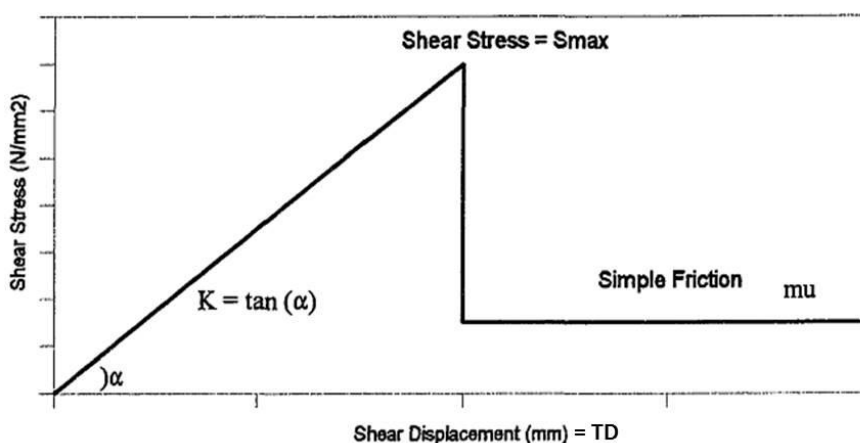


Figura 4. Modelo constitutivo simplificado de la interfase asfalto-asfalto [18]

4. EL ENSAYO AL CORTE DE LA INTERFASE

En la Argentina sólo en forma reciente se han generado especificaciones técnicas para ciertas obras viales sobre adherencia de productos bituminosos en su función de riego de adherencia, siendo de referencia el ensayo conocido como de corte sobre testigos o de SBT [11], sin poseer normativa nacional para su empleo. No obstante esto, a nivel mundial puede relevarse numerosos ensayos para la valoración de la adherencia. Sin embargo, los distintos investigadores de la temática no se han puesto de acuerdo, hasta el momento, en cuanto a cuál utilizar para evaluar la calidad de la adherencia o liga entre capas [24,25]. Para analizar estos ensayos, cabe recordar que la sollicitación en la interfase de capas de un firme puede responder a diversos esfuerzos característicos en función de la componente de carga [26]. Para traducir estas sollicitaciones en esfuerzos aplicables en sistemáticas de ensayo, se han desarrollado métodos que generan alguna de las sollicitaciones de ensayo.

El ensayo al corte se aproxima más a la sollicitación real en la que se encuentra sometido el riego de adherencia en una estructura de un firme, donde el valor de adherencia que se obtiene se ve influenciado por la resistencia friccional que aportan los agregados pétreos de ambas caras de las superficies adheridas y la textura de dichas caras [16]. Los ensayos de corte directo puro representan los equipos más comunes trabajando en la aplicación del desplazamiento de corte y el registro del esfuerzo de corte [23]. El ensayo seleccionado para su aplicación en el presente trabajo es el que sollicita al corte directo por tracción en forma paralela a la interfase del riego de adherencia. En la Figura 5 puede observarse una imagen de la realización de este ensayo.



Figura 5. Ensayo seleccionado para el estudio

White (2015) ha efectuado un relevamiento de los ensayos de corte directo existentes y señalado en cada caso la velocidad de carga, la temperatura de ensayo y la existencia o no de una fuerza normal [27]. De dicho relevamiento se extrae que existen variaciones en cuanto a cómo estos parámetros de ensayo se aplican en cada una de las sistemáticas. En función de los datos recabados y de las experiencias efectuadas por Delbono (2014) y Ricci (2011) en las propias instalaciones del LEMaC, se decide generar el esfuerzo cortante en el plano a evaluar, utilizando una prensa capaz de ejercer el esfuerzo de tracción a una velocidad de avance controlada de 1,27 mm/min [5,10]. Esta velocidad, en las pruebas realizadas por los autores citados, ha sido la que

mejor ha demostrado las variaciones en las muestras analizadas. Se decide además establecer la temperatura de ensayo en los 20 °C, por reflejar una temperatura utilizada en experiencias previas, y que puede ser fácilmente obtenible y mantenida mediante sistemas sencillos de acondicionamiento, tanto de las probetas como del ambiente de ensayo. Se establece para las experiencias un plazo mínimo de acondicionamiento a esa temperatura de 4 horas.

Por otro lado, según White (2015) el ensayo de corte directo es considerado el más apropiado para la aplicación sobre testigos, sin embargo existen numerosas investigaciones que lo han aplicado sobre probetas moldeadas con interfases no texturizadas, como por ejemplo las llevadas adelante por Lysenko (2006), el grupo de investigación liderado por Medeiros (2012), y los de Bae (2010), West (2005) y Tayebali (2004) [27]. Cabe aclarar que estos estudios estuvieron mayoritariamente focalizados en analizar el material de liga y su dosificación. Se decide por esto efectuar las determinaciones sobre probetas moldeadas a tales efectos.

El equipo de estudio liderado por D'Andrea (2013), ha relevado memorias de trabajos en donde con el compactador Marshall se confeccionaron probetas dobles cilíndricas de 130 mm de alto y 100 mm de diámetro, aplicando la compactación sólo en la cara superficial, alcanzándose la densidad comunmente requerida del 98 % de la densidad de referencia (obtenida por 75 golpes/cara del compactador Marshall sobre una probeta de 63,5 mm de altura) [23]. Ricci (2011) ha efectuado estudios de series de probetas dobles confeccionadas con una metodología de compactación análoga, determinando la distribución de densidades a lo largo de la altura de la probeta, para establecer posibles diferencias debidas a los distintos grados de energía aplicada. Para ello procedió a aserrar a las probetas en tres tercios, concluyendo que las diferencias halladas son estadísticamente despreciables [10].

Entre ambas capas de este tipo de probetas se materializa el tratamiento a ser analizado, el cual mayoritariamente conlleva un riesgo de adherencia con emulsión bituminosa, como ya fuera expresado. No obstante en campo el tiempo de curado especificado para este riesgo puede ir de unos pocos minutos a varias horas, dependiendo de las características del mismo y de las condiciones de entorno, es posible en los análisis en laboratorio estandarizar un lapso de curado si se utilizan estrategias a tales efectos [17]. Estas estrategias es posible establecerlas en función de que en laboratorio estos plazos pueden acortarse y normalizarse empleando algún sistema acelerado de curado, el cual generalmente lo consituye el uso de estufa de tiro forzado a temperaturas cercanas a los 60 °C.

Dado todo lo analizado, se establece para este trabajo que las probetas a ensayarse, denominadas como “probetas dobles” (compuestas por espesores de 50 mm tanto de base como de capa de refuerzo), se moldeen siguiendo el procedimiento de:

- Colocar en un juego de base y molde (de 100 mm de diámetro interno y altura mínima de 100 mm), acondicionado en estufa a 140 °C durante 15 minutos, la mezcla bituminosa en la cantidad necesaria para lograr una capa compactada de 50 mm de espesor (para el caso en estudio aproximadamente 1000 gr), calentada hasta la temperatura correspondiente a una viscosidad del ligante bituminoso de $2,8 \pm 0,3$ poises (para el caso en estudio 140 °C).
- Se acomoda la mezcla con una cuchara, se coloca un papel de filtro en la parte superior y se la compacta con el pisón Marshall mediante 100 golpes por única vez en su cara superior, asegurándose la limpieza y temperatura del pisón.
- Se retira del molde la probeta (previo inmersión en agua durante 15 minutos), se la deja secar y se aplica sobre la cara que estuvo en contacto con la base del molde el tratamiento en estudio, si lo hubiera.

- Se introduce la probeta con la cara tratada hacia arriba, sobre una base, en un nuevo molde de 101 mm de diámetro interno y altura mínima de 130 mm.
- Se aplica la dotación de riego de adherencia en estudio, dejando una hora de reposo en estufa a 60 °C, para que se produzca el corte y curado de la emulsión.
- Se acondiciona el conjunto de moldes en estufa a 140 °C durante 15 minutos.
- Se introduce en el molde mezcla bituminosa en la cantidad necesaria para lograr una nueva capa compactada de 50 mm de espesor (para el caso en estudio aproximadamente 1000 gr), en las mismas condiciones que la capa inferior. Se acomoda la mezcla con una cuchara y se coloca un papel de filtro en la parte superior. Se compacta con 100 golpes del pisón Marshall en su cara superior, asegurándose la limpieza y temperatura del mismo. Terminada la compactación se deja enfriar en agua por un lapso de 15 minutos y se desmolda.
- Se deja secar y enfriar la probeta obtenida a temperatura ambiente.

Otra aclaración respecto del ensayo a ser empleado puede ser realizada, dado que para permitir el desarrollo de la interfase fresada se ha decidido separar los zunchos que toman la parte superior e inferior de la probeta doble unos 30 mm. Esto genera que además de la deformación propia registrada en la interfase durante el ensayo se tenga una deformación relacionada con ambas partes de la probeta en este sector. Lo expresado puede observarse en la Figura 6.



Figura 6. Deformación en zona central de la probeta doble durante el ensayo

Se obtiene de esta forma, mediante el ensayo a ser utilizado, una deformación tangencial diferente a la obtenible con el ensayo de corte SBT citado en la especificación técnica aplicable, y tensiones de corte también diferentes a las obtenibles cuando estos zunchos se encuentran separados una distancia mínima. Por lo expuesto, los resultados de TD y de S_{max} a ser obtenidos en este trabajo, es probable que sean sólo comparables en forma relativa entre sí, y no con los especificados u obtenibles con otras metodologías de ensayo.

5. ANALISIS DEL INCREMENTO DE AREA DE INTERFASE POR FRESADO

Las diversas fuentes consultadas asignan a la superficie dentada, generada por el fresado, diferentes perfiles típicos y dimensiones. En la Figura 7 puede observarse el esquema (a) con forma de picos ondulados [12], el esquema (b) con forma de pliegues rectos [13], el esquema (c) con la forma de ondulación [9] y el esquema (d) de perfil dentado [7], a manera de ejemplo.

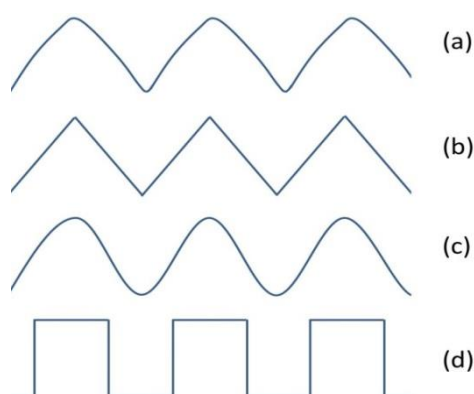


Figura 7. Estimaciones de perfiles de fresado

Más allá de cual sea el tipo de perfil que se decida tomar como representativo, puede observarse que al fresar se genera el aumento de superficie implicada por área tratada en planta, con la necesidad de establecer el incremento de riego a aplicarse por ello. La causa de esto reside en que la dotación de un riego de adherencia se especifica para una superficie lisa, como la obtenida en una capa de recientemente ejecución. Pero dado que cuando se aplica un fresado se da lugar a una superficie con un perfil no plano, se observa un incremento de ésta respecto de su componente proyectada. Diversos autores han estudiado el problema planteado, entre los que vale citar al equipo de Montetrusque (2015), quien ha desarrollado una metodología de análisis basada en el perfil dentado de la Figura 7c [9]. De este modo se han estimado los incrementos de área debido al fresado, tomando como parámetros indicativos a la profundidad de los surcos y la distancia entre sus ejes, ambos como medidas fijas de la superficie en cuestión. El empleo de la metodología citada, puede considerarse un aporte a la temática, pero presenta el inconveniente de sostenerse en el establecimiento de un valor único para cada variable, lo cual contrasta con lo observable en la práctica, ya que la aplicación del fresado presenta una amplia variabilidad en tal sentido. En busca de evitar este inconveniente señalado, se plantea la estandarización de otras metodologías preliminares existentes. Cabe citar en tal sentido, que se ha relevado que en Rhode Island y otros estados de EEUU, se aplica una técnica rudimentaria para estimar la textura de una superficie fresada, desparramando un volumen de microesferas de vidrio con un palo de hockey sobre hielo mediante movimientos circulares. Si la superficie que se genera abarca menos de un diámetro determinado, entonces no se tiene una adecuada superficie para la optimización del empleo de un espesor de refuerzo por resultar su textura excesiva [12]. Otras experiencias análogas se llevan a cabo en China, sin existir aun una normalización en tal sentido [28].

A partir de lo expresado, se ha visto como factible dirigir los esfuerzos a la adaptación de un método de ensayo de amplia difusión en el medio vial, como es el caso del Ensayo del Parche de Arena, el cual es originalmente empleado en la medición de la macrotextura de un firme. Este ensayo consiste en la distribución sobre una superficie de un volumen específico de una arena de río de grano redondeado (o microesferas de vidrio) de granulometría normalizada, utilizando para ello un pisón que posee una base de goma [29]. Cuando este volumen llena los huecos superficiales, se obtiene su máximo diámetro de dispersión.

Al contar con los resultados de los incrementos de área $\Delta(Area)$ registrados ante diversas combinaciones de ancho y profundidad del surco (es decir sus valores medios y dispersiones), se pueden hallar los modelos de regresión que permitan la estimación en futuras aplicaciones de dicho $\Delta(Area)$ a partir de los diámetros obtenibles del empleo de una metodología de ensayo análoga a la del Parche de Arena. Se plantea específicamente llevar la determinación de los $\Delta(Area)$ mediante técnicas de simulación numérica. Siguiendo esta línea de trabajo, los autores de

la presente divulgación, a partir del análisis de la silueta que responde a la tipología de la Figura 7d han logrado establecer que la fórmula que permite estimar el Coeficiente del Incremento del Area (*CIA*) en función del Diámetro del Parche de Arena (*DPA*) resultante para un volumen de arena de 40 cm³, es la que se observa en la Ecuación 2.

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

Esta correlación ha sido además corroborada con los resultados obtenibles al menos en laboratorio. Las memorias de las tareas llevadas adelante en tal sentido pueden consultarse en el trabajo “Metodología para estimación de dotación de riego de liga en refuerzos asfálticos sobre superficies fresadas”, presentado en el XIX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto llevado a cabo en noviembre de 2017 en Medellín, Colombia [30]. Vale señalar en tal sentido que esa corroboración se efectuó sobre probetas de los 6 casos representativos establecidos, confeccionadas con la mezcla bituminosa utilizada en el estudio, la cual se describe más adelante, y moldeadas con el equipo de Roller Compact. Sobre esas probetas se simuló mediante el uso de una hoja diamantada los distintos grados de fresado (Figura 8), estableciéndose luego los *DPA* en forma ortogonal y promedio (Tabla 2) a ser tomados de referencia más adelante para cada uno de los casos de estudio.



Figura 8. Simulación fresado probeta Caso 1

Tabla 2. 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

Como una vía para validar la elección del perfil de la Figura 7d como representativo para la realización de la simulación numérica y corroboración de laboratorio, se ha efectuado el escaneo comparativo que se observa en la Figura 9. La imagen superior de dicha figura proviene de un testigo extraído en obra luego del proceso de fresado. La imagen inferior proviene del escaneo de la sección lograda para el Caso 3, que se identifica como el correspondiente a la situación real. Ambas imágenes se encuentran volcadas en una misma escala. Puede observarse en el análisis visual comparativo de ambas la similitud lograda con la técnica de simulación del fresado mediante aserrado.



Figura 9. Perfil de fresado real versus simulación por aserrado

Finalmente cabe acotar que como conclusión de dicha publicación, además, se arriba a la Tabla 3 con los valores representativos basados en observaciones de campo de las dimensiones de los casos a ser considerados y su variabilidad, definidos por las medias μ y su desvío estándar σ de las dimensiones que se observan en la Figura 10.

Tabla 3. Dimensiones de los casos representativos

Caso	h_1		h_2		h_3	
	μ (mm)	σ (mm)	μ (mm)	μ (mm)	σ (mm)	
1	2,9	0,8	8,0	1,0	0,4	
2	4,1	1,1	11,4	2,4	0,9	
3	5,3	1,4	14,8	3,8	1,4	
4	6,5	1,7	18,2	5,2	1,9	
5	7,8	2,0	21,6	6,6	2,4	
6	9,0	2,4	25,0	8,0	3,0	

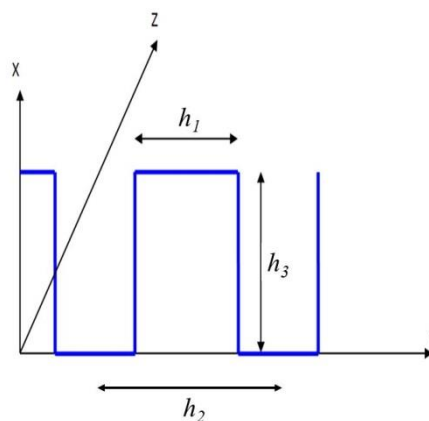


Figura 10. Dimensiones del perfil dentado

6. DETERMINACIÓN DEL 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, dada la existencia del fresado, se debe contar con una dotación de riego de adherencia en estudio representativa, que posibilite luego el arribo a conclusiones por el análisis comparativo de los resultados que se obtengan. Se aborda entonces la obtención de esta dotación para el caso de la no existencia del fresado en la interfase (superficie "lisa"), que será luego utilizada con diversas afectaciones en el análisis de las situaciones de interfase con fresado.

La emulsión bituminosa a ser empleada en los ensayos y análisis constituyentes de este estudio, cuya denominación comercial es Probimul CR-62 (emulsión catiónica de corte rápido), reúne las características que se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Caracterización de la emulsión para el riego de adherencia

Ensayos	Unidad	Resultado	Rango	Norma
De la emulsión				
Viscosidad Saybolt-Furol a 50 °C	seg	23	>20	IRAM 6721
Betún asfáltico residual	% en peso	63,2	>62	IRAM 6719
Sedimentación en 5 días	% en peso	1,2	<5	IRAM 6716
Residuo sobre tamis IRSM 850 μm (N°20)	% en peso	0,005	<0,1	IRAM 6717
Del residuo asfáltico				
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	0,1 mm	84	70-100	IRAM 6576
Punto de ablandamiento	°C	49	>40	IRAM 6841
Viscosidad a 60 °C (Aguja 29, 1 RPM)	dPa.seg	1190	800-1200	IRAM 6837

La mezcla bituminosa seleccionada para la investigación, tanto para la constitución del sustrato inferior como superior, es un Concreto Asfáltico en Caliente convencional Denso con Tamaño

Máximo de sus agregados de 19 mm (CAC-D19). De acuerdo a DNV (2017) dicha mezcla debe constituirse en un espesor que va de 2,5 a 6,0 veces su tamaño máximo nominal, es decir de 48 mm a 114 mm, lo cual encuadra muy bien con el espesor total y de las dos capas constituyentes de las probetas dobles a ser empleadas en la experiencia [11]. Se utiliza una muestra tomada de la producción de una planta por pastones de la zona de la ciudad de La Plata. Sobre esa muestra se determina el Contenido de Ligante Bituminoso de 4,8 % y la curva granulométrica de los áridos recuperados de la Tabla 5, graficada en la Figura 11.

Tabla 5. Granulom. de los áridos recuperados

Tamiz	Abert. (μm)	% Pasa tamiz		
		C. Mín.	Aridos Rec.	C. Máx.
1"	25400	100	100,0	100
3/4"	19100	83	99,1	100
3/8"	9520	60	70,2	75
N°4	4760	45	51,2	60
N°8	2380	33	40,8	47
N°30	590	17	21,8	29
N°50	297	12	15,0	21
N°200	74	5	5,1	8

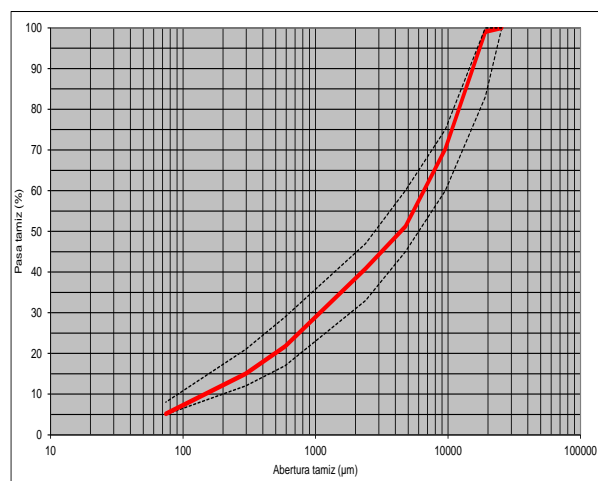


Figura 11. Gráfica de los áridos recuperados

Con la muestra además se procede a su análisis mediante la metodología Marshall, obteniéndose los resultados de la Tabla 6.

Tabla 6. Análisis de parámetros Marshall de la mezcla CAC-D19

Densidad Marshall (g/cm^3)	Estabilidad Prom. (kg)	Fluencia Prom. (mm)	Densidad Rice (g/cm^3)	Huecos Prom. (%)	Relación E/F (kg/cm)
2,412	1228	2,8	2,5	4,4	4385

Se decide efectuar el análisis con probetas dobles constituidas por estos materiales, con el empleo del ensayo de corte directo establecido como de referencia, buscando el contenido óptimo que arroje los máximos valores de resistencia ante la sollicitación aplicada. Dados los entornos de dotaciones recomendados por la bibliografía de consulta, se decide analizar los contenidos de riego de adherencia, expresados como su residuo asfáltico por unidad de superficie, de 0,0 l/m^2 , 0,1 l/m^2 , 0,2 l/m^2 , 0,3 l/m^2 y 0,4 l/m^2 . Estableciendo un número de 3 probetas por contenido, se procede a moldear entonces las 15 probetas a ser analizadas. En la Figura 12 se observan las probetas confeccionadas.



Figura 12. Probetas dobles 1 a 12 y I a III

A dichas probetas se le procede a la determinación de su densidad, obteniéndose resultados con una tendencia a la distribución normal, con una Densidad Media de un 99,4 % respecto de la Densidad de Referencia Marshall, lo cual se considera en un valor lo suficientemente aproximado, que verifica la metodología de moldeo especificada. En la Figura 13 se observan imágenes de las probetas una vez colocadas las mordazas, junto con las planchuelas rígidas de vinculación a la prensa de ensayo. Mediante la metodología desarrollada se ensayan la totalidad de las probetas dobles moldeadas, obteniéndose en todos los casos la rotura de las mismas en el riego de adherencia de la interfase.



Figura 13. Imágenes en vista y planta de la probeta doble con mordazas

Un juego de curvas resultantes tipo y los parámetros en análisis obtenidos para la serie de probetas ensayadas puede observarse de la Figura 14, correspondiente a la dotación de $0,1 \text{ l/m}^2$. Puede verse cómo las gráficas correspondientes a cada una de las probetas de la serie han sido desplazadas en el eje de las deformaciones, una distancia correspondiente a los 4,0 mm de deformación, de forma tal que puedan ser analizadas más fácilmente por evitarse su superposición.

Máquina: Emic DL3000N Célula: Trd 26 Extensómetro: - Data: 18/08/2017 Hora: 14:45:58 Trabalho n: 0697
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup lisa) Cliente: Julian Solicitación: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	11,1	0,3	2,3
CP 2	10,7	0,3	2,5
CP 3	11,6	0,3	2,3
Número CPs	3	3	3
Média	11,13	0,3004	2,359
Mediana	11,08	0,2970	2,333
Desv. Padrão	0,4273	0,01237	0,09718
Coef. Var. (%)	3,840	4,119	4,119
Mínimo	10,73	0,2900	2,278
Máximo	11,58	0,3141	2,467

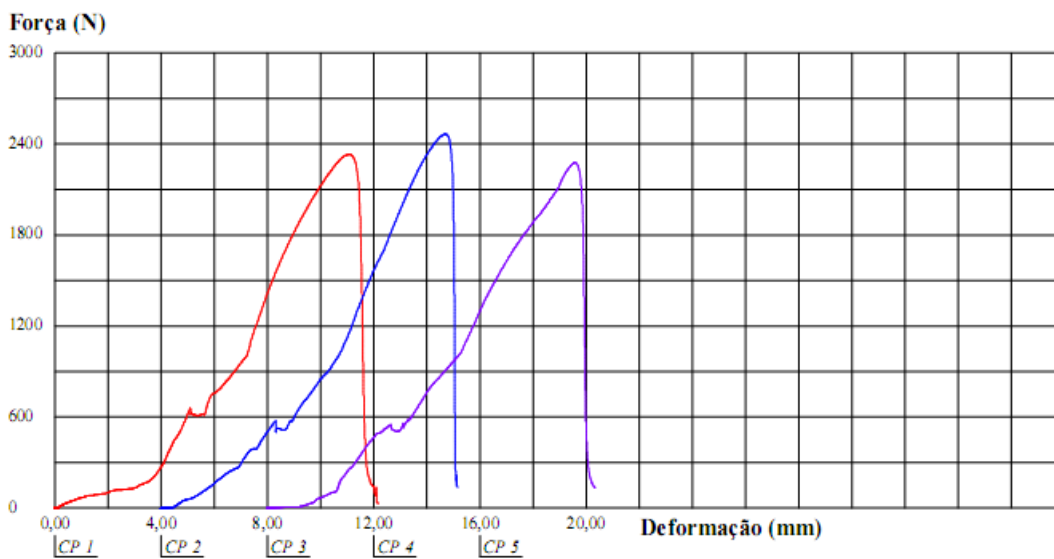


Figura 14. Resultados para las probetas con dotación 0,1 l/m²

Puede elaborarse luego el resumen de resultados de la Tabla 7 con los valores promedios de la tensión de corte máxima S_{max} y de desplazamiento al corte en la rotura TD .

Tabla 7. Valores promedio obtenidos versus dotación de riego de adherencia

Dotación (l/m ²)	S_{max} (MPa)	TD (mm)
0,0	0,268	13,0
0,1	0,300	11,1
0,2	0,318	9,9
0,3	0,327	10,1
0,4	0,303	11,3

Puede deducirse un máximo valor de S_{max} alcanzable en el entorno de la dotación de 0,25 l/m² a 0,3 l/m². Se efectúa entonces la verificación de lo observado, moldeando las probetas IV a VI con 0,25 l/m² de riego. Se obtiene así un S_{max} promedio de 0,325 MPa, muy cercano al obtenido para la dotación de 0,3 l/m². Se establece como dotación óptima a 0,25 l/m² por implicar una respuesta similar, a menor dotación de riego.

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 (o denominado como Leutner Test en algunas publicaciones) [11], 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, vale la pena considerar lo observado por Berenguer et al. (2017) respecto a lo especificado en España [31]. Allí, con la modificación del Artículo 531 del Pliego General de Especificaciones (PG-3) de diciembre de 2014, se establece la necesidad de realizar ensayos de adherencia entre capas según la norma NLT-382, para verificar que la resistencia al esfuerzo cortante supera el valor de 0,60 MPa, cuando una de las capas sea de rodadura. El ensayo permite el uso de dos dispositivos de corte diferentes; el Dispositivo A (Ensayo de SBT o de Leutner) y el Dispositivo B (Ensayo de LCB). Berenguer et al. (2017) al aplicar ambos dispositivos para un mismo caso de materiales típicos españoles, ha determinado que conducen a diferentes resistencias al esfuerzo de corte, obteniéndose resultados variables, pero aproximadamente en un 20 % superiores cuando se utiliza el dispositivo A [31]. El Ensayo de SBT especificado por DNV requiere además la sollicitación de testigos de 150 mm de diámetro. En tal sentido la norma española NLT-382 establece el ensayo indistinto de especímenes de 100 mm y 150 mm de diámetro. Dado lo expresado, se decide llevar adelante ensayos complementarios mediante el equipo de Ensayo de LCB disponible en el LEMaC, sobre probetas dobles de 100 mm de diámetro, a una velocidad de 2,5 mm/min y una temperatura de 21 °C según lo establecido por la norma, mayorando luego los resultados en un 20 % para compararlos a los resultados obtenibles del Ensayo de SBT. Para la experiencia se moldean las bases y luego las probetas dobles A, B y C mediante los procedimientos ya descriptos y con la dotación de riego de adherencia de 0,25 l/m² en análisis. Dichas probetas son ensayadas, obteniéndose los resultados que pueden observarse en la Tabla 8. En la Figura 15 se observa una imagen durante la realización de los ensayos, en todos los casos la rotura se ha producido en la interfase.

Tabla 8. Resultados Ensayo LCB

Probeta	Carga (kg)	S_{max} por LCB (MPa)	S_{max} corregida SBT (MPa)	TD (mm)
A	1250	0,772	0,926	1,6
B	1218	0,752	0,902	1,9
C	1169	0,721	0,866	1,7



Figura 15. Ensayo de LCB

De acuerdo a los resultados alcanzados de S_{max} , puede deducirse que corresponden a los de una situación que implicaría el cumplimiento de los valores establecidos por el pliego de DNV, ratificándose la dotación de 0,25 l/m² en análisis.

7. ANALISIS MEDIANTE ENSAYOS EN CASOS CON SUPERFICIES FRESADAS

Dada la dotación óptima de riego de adherencia establecida para la interfase de superficies lisas entre las capas en estudio, resta ahora analizar desde el punto de vista mecánico si en el caso de las superficies fresadas resulta efectivamente 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 a la fuerza de gravedad actuante durante la distribución del riego y el grado de fluidez de la emulsión, pudiéndose generar un depósito de mayor espesor en el valle de los surcos, de acuerdo a lo que se observa en la Figura 16.

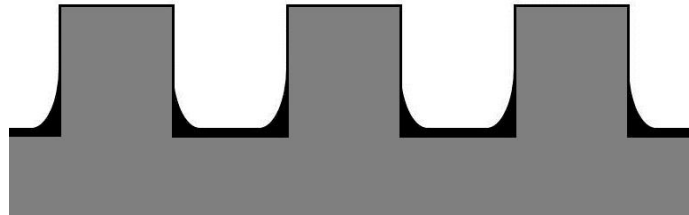


Figura 16. Exceso de riego de adherencia sobre una superficie fresada

Para efectuar entonces el análisis de esta situación se decide, a partir del contenido óptimo de riego de adherencia de $0,25 \text{ l/m}^2$ determinado para los materiales empleados en esta experiencia, estudiar cuatro situaciones. Estas situaciones 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, para la Situación 1 a la Situación 4, respectivamente. Para establecer las respuestas ante los ensayos de corte directo instrumentados, de los 6 casos de simulación de fresado, empleando los incrementos de riego calculados como necesarios, se procede al moldeo de las probetas dobles a ser analizadas, utilizando a tal fin el procedimiento diseñado y estableciendo un número de 3 probetas por caso. Luego de moldeadas las bases se procede al aserrado superficial de las probetas, de acuerdo a los parámetros ya establecidos para los 6 casos de simulación. En la Figura 17 se observa el proceso de aserrado de una probeta correspondiente al Caso 5.



Figura 17. Aserrado de una probeta del Caso 5

Para profundizar el análisis comparativo de los perfiles generados se elabora la Figura 18 con imágenes de detalle de los 6 casos en planta y en perfil. Se pueden ver en la imagen desde el Caso 1 en la parte superior hasta el Caso 6 en la parte inferior. Cabe aclarar que las imágenes en planta poseen entre si una misma escala, al igual que las imágenes correspondientes al perfil.

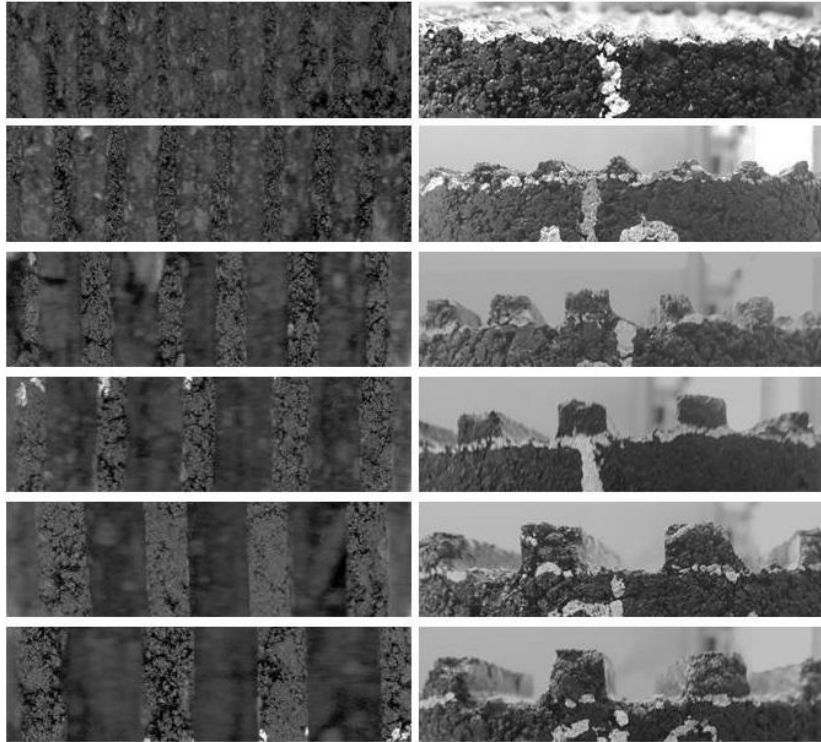


Figura 18. Imágenes en planta y perfil de los 6 casos simulados

Luego de la simulación del fresado y la aplicación del riego correspondiente se procede al moldeo de las probetas dobles, siguiendo el procedimiento ya descrito oportunamente. En la Figura 19 se observan las probetas moldeadas para la Situación 4, a manera de ejemplo.



Figura 19. Probetas de la Situación 4

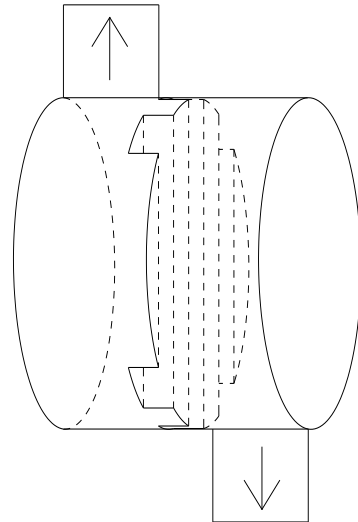


Figura 20. Orientación del fresado en el ensayo

Nuevamente, a dichas probetas se le procede a la determinación de su Densidad Marshall, obteniéndose los resultados que verifican la forma de moldeado adoptada. Luego se procede a su ensayo mediante el procedimiento desarrollado. Cabe destacar aquí 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 la orientación que puede observarse en la Figura 20. A manera de ejemplo se muestran las curvas resultantes y los parámetros en análisis obtenidos para la serie de probetas ensayadas del Caso 6 de la Situación 3, en la Figura 21. Cabe señalar que la rotura de estas probetas se ha producido en la Situación 1 y la Situación 4 mayormente en el riego, mientras que en la Situación 2 y la Situación 3 mayormente parte en el riego y parte en la textura de la probeta en la interfase.

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensómetro: - Data: 27/12/2017 Hora: 14:09:20 Trabajo n° 0743
 Programa: Tesc versão 3,05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitud: 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

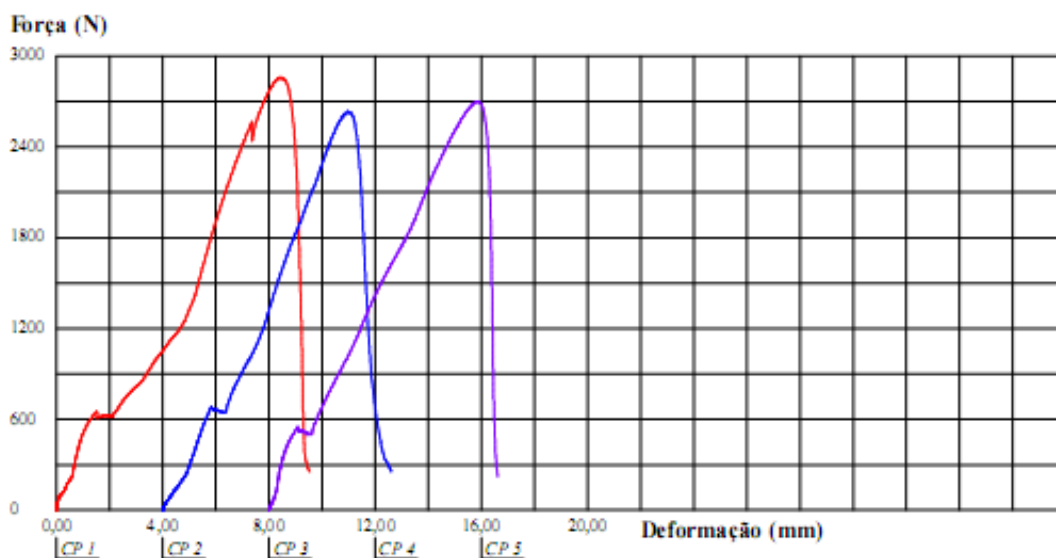


Figura 21. Resultados ensayo de corte Caso 6 de la Situación 3

Los resultados obtenidos permiten desarrollar la Tabla 9 y la Tabla 10, donde se vuelcan los valores promedio de *Smax* y *TD*, respectivamente, para los correspondientes valores de coeficiente de incremento del riego (*CI*), en cada Caso y cada Situación.

Tabla 9. Resumen de resultados de *Smax* para ensayos sobre superficie fresada

	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5		Caso 6	
	<i>CI</i>	<i>Smax</i> (MPa)	<i>CI</i>	<i>Smax</i> (MPa)	<i>CI</i>	<i>Smax</i> (MPa)	<i>CI</i>	<i>Smax</i> (MPa)	<i>CI</i>	<i>Smax</i> (MPa)	<i>CI</i>	<i>Smax</i> (MPa)
Situación 1	1,363	0,187	1,479	0,227	1,612	0,235	1,760	0,214	1,841	0,257	1,945	0,202
Situación 2	1,242	0,263	1,319	0,286	1,408	0,256	1,507	0,263	1,561	0,270	1,630	0,325
Situación 3	1,121	0,334	1,160	0,313	1,204	0,355	1,253	0,308	1,280	0,329	1,315	0,348
Situación 4	1,000	0,151	1,000	0,215	1,000	0,256	1,000	0,247	1,000	0,269	1,000	0,300

Tabla 10. Resumen de resultados de *TD* para ensayos sobre superficie fresada

	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5		Caso 6	
	<i>CI</i>	<i>TD</i> (mm)	<i>CI</i>	<i>TD</i> (mm)	<i>CI</i>	<i>TD</i> (mm)	<i>CI</i>	<i>TD</i> (mm)	<i>CI</i>	<i>TD</i> (mm)	<i>CI</i>	<i>TD</i> (mm)
Situación 1	1,363	7,6	1,479	4,5	1,612	5,9	1,760	5,2	1,841	6,2	1,945	6,2
Situación 2	1,242	8,8	1,319	7,2	1,408	4,9	1,507	4,1	1,561	7,3	1,630	7,0
Situación 3	1,121	7,5	1,160	4,7	1,204	7,7	1,253	7,4	1,280	8,6	1,315	7,8
Situación 4	1,000	3,0	1,000	4,7	1,000	5,9	1,000	8,2	1,000	7,2	1,000	7,3

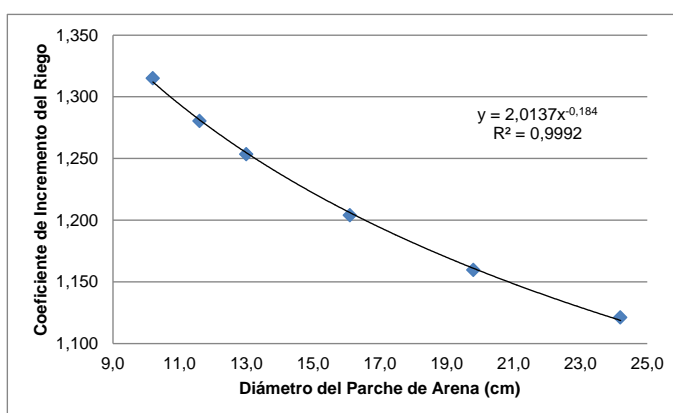
Dado que se obtiene para todos los Casos que la Situación 3 implica los *CI* óptimos, se puede proceder ahora a establecer el Coeficiente de Incremento de Riego (*CIR*), que permitiría finalmente, mediante la Ecuación 3, establecer la *DRI*, partiendo de una *DR*.

$$DRI = CIR \cdot DR \quad (3)$$

Para arribar a los *DRI* en función de los *DPA*, resta entonces correlacionar a los valores obtenidos para cada caso, volcados en la Tabla 2, con los *CI* óptimos establecidos (asumidos ahora como los *DRI*). En la Tabla 11 se observan los valores de ambas variables a ser correlacionadas y en la Figura 22 la gráfica con la correlación obtenida.

Tabla 11. Valores de *CIR* versus *DPA*

Caso	<i>CIR</i>	<i>DPA</i> (cm)
1	1,121	24,2
2	1,160	19,8
3	1,204	16,1
4	1,253	13,0
5	1,280	11,6
6	1,315	10,2

Figura 22. Gráfica de *CIR* versus *DPA*

Como se observa en la Figura 22, 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 [32].

La fórmula que permite finalmente establecer el *CIR* en función del *DPA*, resultante para un volumen de arena de 40 cm^3 , es la que se observa en la Ecuación 4.

$$CIR = 2,014 \cdot DPA^{-0,184} \quad (4)$$

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 al que se le han ido modificando partes, por ejemplo por razones de 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 partiendo de la determinación por algún medio directo de la dotación óptima a utilizarse en el caso de una interfase entre superficies lisas. Luego 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, en cada tipología de tramo homogéneo registrada en obra. La otra forma de empleo, es que en cada tramo representativo de los materiales de la obra se extraigan testigos de la carpeta de rodamiento existente luego de haber sido aplicado un fresado sobre dicha superficie y de haberse realizado las mediciones correspondientes con la metodología análoga al Parche de Arena desarrollada, a la manera de “tramo de prueba”. Se confeccionan con estos 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 establecida el modelo desarrollado 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. Alcanzada esta dotación, se procede luego al ajuste de la misma 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.

8. APLICACIÓN A UN CASO REAL DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA

Para analizar si lo modelado en laboratorio se ajusta a lo observable en la práctica, se decide efectuar estudios a tal fin sobre una obra vial en donde se aplique el fresado de la capa existente, con la existencia de un espesor remanente de mezcla bituminosa a ser reforzada. La obra abordada es la Ruta Provincial N° 215 (RP215), en el tramo de ampliación y rehabilitación de calzada entre las localidades de Coronel Brandsen y San Miguel del Monte, en la Argentina. Entre los ítems que involucran dicha obra se encuentran los de fresado de la carpeta bituminosa existente en la calzada en sus 5 cm superficiales, 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. En la Figura 23 se observa el espesor remanente de mezcla bituminosa (aproximadamente 8 cm) dispuestos sobre un firme de hormigón. Como paso inicial se efectuaron las determinaciones con la metodología análoga a la del Ensayo de Parche de Arena desarrollada, utilizando el volumen de 40 cm³ de arena establecido como óptimo para las determinaciones. En la Figura 24 se observa una imagen general con las tres determinaciones efectuadas sobre una misma línea de fresado. En la Tabla 12 se vuelcan los valores de DPA medidos, los que conducen a un valor promedio final DPA_{prom} de 21,6 cm.



Figura 23. Espesor bituminoso remanente



Figura 24. Determinaciones de DPA

Tabla 12. DPA medidos

Medición	D_1 (cm)	D_2 (cm)	DPA (cm)
1	22,0	21,0	21,5
2	21,5	21,0	21,3
3	21,5	22,5	22,0

Paso seguido se efectúa la extracción en una misma hilera de fresado, correspondiente al sector en donde se realizaron las determinaciones anteriormente señaladas, de 9 testigos de 10 cm de diámetro de la mezcla bituminosa remanente. En la Figura 25 se observan imágenes tomadas durante la extracción de dichos testigos.



Figura 25. Extracción de testigos en sector en análisis

Los testigos fueron acondicionados por corte a una altura de 5 cm, procediéndose con el material sobrante del acondicionamiento a la determinación del contenido de ligante bituminoso y la recuperación de los agregados. Se obtiene como resultado un contenido de ligante bituminoso del

4,8 % y una curva de áridos que se condice con una CAC-D19 de DNV [11]; razón por la cual se la considera con similares características a la mezcla bituminosa utilizada en las experiencias de laboratorio. Se decide para el análisis comparativo considerar las dotaciones aplicadas en las experiencias en laboratorio, como una vía para establecer la validación de los resultados obtenidos. De esta manera se aplican en laboratorio tres dotaciones, de forma tal de ver si resultan ratificados los resultados obtenidos en las experiencias previas, respondiendo a las situaciones de:

- Dotación I: Con la cantidad de riego óptima establecida para la interfase en superficies lisas.
- Dotación II: Con la cantidad de riego establecida mediante la fórmula desarrollada para estimar el *CIR*.
- Dotación III: Con la cantidad de riego establecida mediante el incremento directo de la superficie de contacto en la interfase, es decir empleando el *CIA*.

Las probetas dobles moldeadas, luego de haber sido aplicadas las dotaciones de riego, se muestran en la Figura 26; donde se observa en la columna de la izquierda las probetas correspondiente a la Dotación I, en la columna central las de la Dotación II y en la columna de la derecha la de la Dotación III. Las probetas se ensayan del modo ya señalado, obteniéndose el resumen de resultados promedios que se observa en la Tabla 13, donde se señala la tensión de corte máxima *S_{max}* y el desplazamiento al corte en la rotura *TD*.



Figura 26. Probetas dobles con testigos

Tabla 13. Resultados para la Dotación I a III

Dotación	<i>S_{max}</i> (MPa)	<i>TD</i> (mm)	<i>CIR</i>
I	0,164	4,7	1,000
II	0,262	5,4	1,144
III	0,219	4,3	1,428

Se deduce que, aunque con los ensayos realizados no es posible establecer si se trata de la dotación óptima ajustada, se observa que con la Dotación II, que surge de la aplicación del *CIR* de acuerdo al modelo desarrollado, se obtienen los mayores resultados promedio de *S_{max}* y *TD*. Por lo expresado, estos resultados guardan relación con los obtenidos en las experiencias en laboratorio. Se ve además que los resultados obtenidos utilizando como base un testigo de una capa bituminosa fresada de una obra existente y un revestimiento de carpeta bituminosa nueva moldeado en laboratorio, resultan por debajo de los obtenidos con capas de base (con fresado simulado) y revestimiento nuevas moldeadas en laboratorio; todo esto aceptando que en ambos casos se tratan de materiales muy similares. Esto en cierto modo 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 [31].

9. CONCLUSIONES

En función de los estudios realizados, puede concluirse que:

- El establecimiento de la dotación de un riego bituminoso de adherencia en la interfase entre capas bituminosas de un firme en rehabilitación, donde la capa previamente existente es sometida a un fresado superficial, es un tema que no había sido estudiado profundamente, al menos en lo que respecta a los materiales existentes en la Argentina.
- Para abordar esta temática es útil partir del conocimiento del grado de textura generado por el fresado, dado el espectro relevado existente en tal sentido, para lo cual puede adoptarse una sistemática de ensayo desarrollada análoga a la del Ensayo de Parche de Arena.
- Mediante los resultados de dicha aplicación es posible establecer, gracias al modelo arribado, el Coeficiente del Incremento del Riego a emplearse para afectar al contenido óptimo de riego de adherencia aplicable en el caso de que la interfase fuera lisa (sin fresado).
- Existen procedimientos variados, abordados en el trabajo, que permiten la aplicación en tramos homogéneos de fresado de obras viales de la metodología de análisis producto de los estudios llevados adelante.
- Uno de estos procedimientos ha sido empleado en una experiencia en obra, alcanzándose resultados que se condicen con los obtenidos previamente en laboratorio, lo cual es un aporte a su validación.

Referencias

- [1] Martínez-Echevarría, M. J. (2012). *Estudio de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa*, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España.
- [2] NCHRP. (2004). *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures*, National Research Board, 1-37A team, EEUU.
- [3] Miller, J., Bellinger, W. (2003). *Distress identification manual for the long-term pavement performance program*, fourth revised edition. Report No. FHWA-RD-03-031, Washington DC, EEUU.
- [4] Bonfim, V. (2008). *Fresado de pavimentos asfálticos*, Editorial Exceção, primera edición, Brasil.
- [5] Delbono, H. L. (2014). *Estudio de Grillas Poliméricas en Sistemas Anti-reflejo de Fisuras bajo Solicitaciones Dinámicas*, Tesis Doctoral en Ingeniería mención Materiales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata (inérita), 379 p. La Plata, Argentina.
- [6] Wirtgen. (2015). *El mundo de las fresadoras en frío de Wirtgen*, Wirtgen Group Company, Alemania.
- [7] Bussard, M. (2014). *Milling & Micro Milling*, P.R. Systems Inc., EE UU.
- [8] Espinoza, M. (2015). *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.
- [9] Montetrusque, M., Bernucci, et al. (2015). *Avaliação da aderência de geogrelhas entre camadas asfálticas*, Memórias XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, ISBN 978-950-630-031-9, Bariloche, Argentina.
- [10] Ricci, L. A. (2011). *Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético*, tesis de Maestría en Ingeniería en Transporte – Orientación Vial, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

- [11] DNV. (2017). *Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos*, Dirección Nacional de Vialidad, Argentina. [Consultado en julio de 2017 en: http://www.vialidad.gov.ar/sites/default/files/PETG_1.pdf]
- [12] The Asphalt Contractor. (2011). *How Micromilling is Saving States Money on Asphalt Road Repairs*, The Asphalt Contractor Magazine, EEUU. [Consultado 12 de diciembre de 2016 en: <http://www.forconstructionpros.com/article/10456001/how-micromilling-is-saving-states-money-on-asphalt-road-repairs>]
- [13] Wirtgen. (2013). *Wirtgen cold milling manual. Technology and application*, Wirtgen GmbH, Alemania.
- [14] EICAM. (1998). *Curso de actualización de diseño estructural de caminos, método AASHTO93*, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.
- [15] Uzan, J., Livneh, M., et al. (1978). *Investigation of adhesion properties between asphalt concrete layers*, Proc. Assoc. Asphalt Paving Technologists, St. Paul, Minn, 47, 495-521, EEUU.
- [16] Giovanón, O., Buono, F. (2008). *Riego de liga su importancia estructural y análisis tensional*, XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Rosario, Argentina.
- [17] Yaacob, H., Hainin, M.R., et al. (2014). *Information for the malaysian asphalt industry towards better pavement interlayer bonding*, Sains Malaysiana, n 43, vol 3, pp 467-474, Malasia.
- [18] Romanoschi, S.A. (1999). *Characterization of Pavement Layer Interfaces*, Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, EEUU.
- [19] Brown, S. F., Brunton, J. M. (1984). *The influence of bonding between bituminous layers*, Highways Transportation, 31(5), 16-17, EEUU.
- [20] Giovanón, O., Pagola, M. (2012). *Modelo mecanicista empírico para análisis de pavimentos flexibles desarrollado en Argentina*, Revista Carreteras, Asociación Argentina de Carreteras, número 208, diciembre, pp 76-86, Argentina.
- [21] Yoder, E. J., Witzack, M. W. (1975). *Principles of pavements design*, Wiley, New York, EEUU.
- [22] Zornberg, J. (2015). *Sistemas de pavimentos reforzados con geosintéticos*, University of Texas at Austin, EEUU.
- [23] D'andrea, A., Tozzo, C., et al. (2013). *Interfase roughness parameters and shear strength*, Modern Applied Science (ISSN 1913-1844), Canadian Center of Science and Education, vol 7, n 10, Canadá.
- [24] Tosticarelli, J.R. (2002). *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.
- [25] Muench, S.T., Moomaw, T. (2008). *De-Bonding of Hot Mix Asphalt Pavements in Washington State: An Initial Investigation*, TNW 2008-10, Transportation Northwest (TransNow), University of Washington, EEUU.
- [26] Rahman, A., Al, C., et al. (2016). *State-of-the-art review of interface bond testing devices for pavement layers: toward the standardization procedure*, Journal of Adhesion Science and Technology (ISSN 169-4243), EEUU.
- [27] White, G. (2015). *Asphalt overlay bond strength*, Australian Airports Association, Aircraft Pavement and Lighting Conference, Australia.
- [28] Zhang, N., Zheng, N.X., et al. (2016). *Influencing factors on bonding layer performance effect between the ultra-thin surface*, Functional Pavement Design (ISBN 978-1-138-02924-8), Proceedings of the 4th Chinese-European Workshop on Functional Pavement Design, CEW 2016, Netherlands.
- [29] IRAM. (1997). *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.
- [30] Rivera, J., Bianchetto, H., et al. (2017). *Metodología para estimación de dotación de riego de liga en refuerzos asfálticos sobre superficies fresadas*, Trabajo 049, XIX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Medellín, Colombia.
- [31] Berenguer, J. M., Calvo, C., et al. (2017). *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.
- [32] Bello, M. (2016). *Apuntes de la capacitación sobre predicción y bondad de ajuste*, Capacitaciones Software-Shop, Colombia.